Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transport, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle communication DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Integrierte Planung von Unterhaltsmassnahmen auf Strassenabschnitten, die aus Anlagen unterschiedlicher Art bestehen

Planification intégrée des travaux d'entretien sur des tronçons routiers avec des actifs de plusieurs types

Integrated planning of maintenance interventions on road sections comprised of assets of multiple types

ETHZ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Josia Meier
Simon Hässig
Prof. Dr. Bryan T. Adey

Infrastructure Management Consultants GmbH
Prof. Dr. Rade Hajdin

Forschungsprojekt TRU_20_04C_01
auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
September 2026 | 1831

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet. Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

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

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

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

Integrierte Planung von Unterhaltsmassnahmen auf Strassenabschnitten, die aus Anlagen unterschiedlicher Art bestehen

Planification intégrée des travaux d'entretien sur des tronçons routiers avec des actifs de plusieurs types

Integrated planning of maintenance interventions on road sections comprised of assets of multiple types

ETHZ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Josia Meier
Simon Hässig
Prof. Dr. Bryan T. Adey

Infrastructure Management Consultants GmbH
Prof. Dr. Rade Hajdin

Forschungsprojekt TRU_20_04C_01
auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
September 2026 | 1831

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Prof. Dr. Bryan T. Adey
Prof. Dr. Rade Hajdin (Stv.)

Mitglieder
Josia Meier
Simon Hässig

Begleitkommission

Präsident
Dr. Thomas Herrmann

Mitglieder
Prof. Dr. Eugen Brühwiler
Dr. Lily Poulikakos
Prof. Dr. Nicholas Bueche
Charles-Henri Demory
Prof. Dr. Alexander Erath

Antragsteller

Bundesamt für Strassen ASTRA

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von
https://www.mobilityplatform.ch/ heruntergeladen werden.

September 2026

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **9**

Tabellenverzeichnis **17**

Abkürzungsverzeichnis **22**

Hinweis **24**

Zusammenfassung **25**

Résumé **33**

Summary **41**

1 Einleitung **49**
1.1 Motivation 49
1.2 Ziele des Forschungsprojekts 50
1.3 Aufbau des Forschungsberichts 51
1.4 Terminologie 52
1.4.1 Begriffe der Infrastrukturabstraktion 52
1.4.2 Begriffe der Inspektion, Abschätzung und Prognose 55
1.5 Daten und Disclaimer 59

2 Der aktuelle Erhaltungsplanungsprozess **61**
2.1 Ausgangslage 61
2.2 Methodik 62
2.3 Prozessbeschreibung 63
2.3.1 Überwachung 63
2.3.2 Überblick 71
2.3.3 Handlungsbedarf 74
2.3.4 Projektvorbereitung 76
2.3.5 Realisierung und Projektbegleitung 82
2.4 Zusätzliche Ausführungen zum Verständnis des aktuellen Prozesses 83
2.4.1 Unterschiede von und zu den ASTRA internen Grundlagen 83
2.4.2 Rolle und Anwendung von Hilfsmittel 86
2.5 Ideen für Verbesserungen 86
2.5.1 Überwachung 86
2.5.2 Überblick Zustand und Projekte 87
2.5.3 Handlungsbedarf und Projektvorbereitung 87
2.6 Schlussfolgerung 89

3 Grundlagen der Teststrecke **91**
3.1 Brücken und Tunnel der Teststrecke 92
3.1.1 Die *Pont sur La Sorge* im Detail 94
3.2 Trassee 97
3.2.1 Erhaltungsobjekte 97
3.2.2 Trassee Teilstücke 98

4 Methodik 103
4.1 Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Infrastrukturzuständen (Kapitel 5) 103
4.1.1 Brücken (Kapitel 5.1) 103
4.1.1.1 Abschätzung des gegenwärtigen Zustands (Kapitel 5.1.1) 103
4.1.1.2 Abschätzung des zukünftigen Zustands (Kapitel 5.1.2) 103
4.1.2 Trassee (Kapitel 5.2) 103
4.1.2.1 Abschätzung des gegenwärtigen Zustands (Kapitel 5.2.1) 103
4.1.2.2 Abschätzung des zukünftigen Zustands (Kapitel 5.2.2) 103
4.2 Prognose von Unterhaltsmassnahmen (Kapitel 6) 104
4.2.1 Brücken (Kapitel 6.2) 104
4.2.2 Trassee (Kapitel 6.3) 104
4.3 Automatische Bündelung von Massnahmen (Kapitel 7) 104

5 Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Infrastrukturzuständen 105
5.1 Brücken 106
5.1.1 Abschätzung des gegenwärtigen Zustands 106
5.1.1.1 Keine Zustandsdaten vorhanden 106
5.1.1.2 Teilweise Zustandsdaten vorhanden 124
5.1.2 Abschätzung des zukünftigen Zustands 124
5.1.2.1 1-Jahres-Verfallsmatrizen 125
5.1.2.2 Nicht stationäre Verfallsmatrizen 127
5.1.3 Anwendung an der Teststrecke 128
5.2 Trassee 135
5.2.1 Abschätzung des gegenwärtigen Zustands 135
5.2.1.2 Methodik 138
5.2.1.3 Resultate 143
5.2.2 Abschätzung des zukünftigen Zustands 147
5.2.2.2 Methodik 148
5.2.2.3 Resultate 152
5.3 Bemerkungen zu Tunnel 163

6 Prognose von Unterhaltsmassnahmen 165
6.1 Ausgangslage 165
6.1.1 Ziel der Methodik 165
6.1.2 Prognosen von Unterhaltsmassnahmen 166
6.1.3 Risikomanagement im ASTRA 167
6.1.4 Einordnung der Methodik im Erhaltungsplanungsprozess 168
6.2 Brücken 169
6.2.1 Algorithmus 169
6.2.2 Risikoberechnung 177
6.2.2.1 Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Top-Ereignisses 178
6.2.2.2 Risikoberechnung im Detail 186
6.2.2.3 Delta-Risiko 189
6.2.3 Fallstudie 190
6.2.3.1 Auswertung der Algorithmus Ergebnisse 201
6.3 Trassee 203

6.3.1 Algorithmus 203
6.3.2 Risikoberechnung 209
6.3.3 Fallstudie 211

7 Automatische Bündelung von Massnahmen 219
7.1 Ausgangslage 219
7.1.1 Ziel der Methodik 219
7.1.2 Ausgangslage im ASTRA und der Forschung 220
7.1.2.1 Fachkonzept EMNS 221
7.1.2.2 Forschung 222
7.1.3 Einordnung der Methodik im Erhaltungsplanungsprozess 223
7.1.4 Automatisierte Aufstellung von Massnahmenprogramme 224
7.2 Netzwerkabstraktion 225
7.2.1 Topologische Struktur 225
7.2.2 Erhaltungsabschnitt 228
7.2.3 Rückkehrperiode- und Baustellenabstandsbedingung 230
7.3 Methodik 231
7.3.1 Berechnung des Nettonutzens 231
7.3.1.1 Bestimmung der Eingangsgrössen 233
7.3.1.2 Annahmen bei der Nutzerkostenberechnung eines Erhaltungsabschnitts 235
7.3.2 Abhängigkeiten 236
7.3.3 Netzwerkflussmodell 238
7.3.3.1 Netzwerkflussgraph 238
7.3.3.2 Knoten, Kanten, Entscheidungsvariablen und Koeffizienten 243
7.3.4 Zielfunktion und Nebenbedingungen 244
7.4 Fallbeispiel 247

8 Demonstration 257
8.1 Visuelle Hilfsmittel zur Darstellung von Informationen 257
8.1.1 BIM-Modell erstellen 257
8.1.2 Parameter definieren 259
8.1.3 Informationen verknüpfen 260
8.1.4 Visualisierungen ermöglichen 260
8.2 Integration der entwickelten Methoden in den Prozess 262

9 Diskussion 267
9.1 Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Infrastrukturzuständen ..267
9.2 Prognose von Unterhaltsmassnahmen 270
9.3 Automatische Bündelung von Massnahmen 274
9.4 Allgemein 276

10 Umsetzung und Forschungsbedarf 277
10.1 Umsetzung der Erkenntnisse aus dem Projekt MINERVA im ASTRA 277
10.2 Forschungsbedarf 278
10.2.1 Identifizierung des Handlungsbedarfs 278
10.2.2 Überwachung für präventive Massnahmen 279

10.2.3 Planung von Massnahmen mit Unsicherheiten bezüglich des Handlungsbedarfs einzelner Objekte 280
10.2.4 Planung von Massnahmen mit Unsicherheiten bezüglich des Handlungsbedarfs mehrerer Objekte 280
10.2.5 Informationsbeschaffung mit unbemannten Luftfahrzeugen (Bsp. Drohnen) 281
10.2.6 Nutzung von Informationsmodellen (BIM, GIS) 282

11 Schlussfolgerungen 285

Literaturverzeichnis 289

Anhang 295
Prozessdiagramm 295
Verfallsmatrizen 297
Unterhaltsmassnahmen: Einheitskosten und Erfolgsvektor 299
AHP-Fragebögen: Fragen, Antworten und Resultate 304
Unterhaltsmassnahmen Trassee 308

Projektabschluss 313

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtsplan der Teststrecke mit Beschriftung der Brücken und Tunnel. Kartenbasis © swisstopo, 01.10.25.....27

Abbildung 2: Mögliche Darstellung der prognostizierten Unterhaltsmassnahmen am Trassee mit Jahresfilter, interaktiven Karte und Werteübersicht. 30

Abbildung 3: Gebündelte Massnahmen nach Massnahmenprogramm für ein bestimmtes Jahr in der Zukunft (Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe). 31

Abbildung 4: BIM-Modell mit der Möglichkeit, Zustandsabschätzungen für verschiedene Bauwerksteile anzuzeigen (blau = selektiertes Bauwerksteil und grün bis rot die Farben der ASTRA Zustandsklassendefinition für Kunstbauten). 32

Figure 5: Plan d'ensemble du tronçon test avec indication des ponts et des tunnels. Carte de base © swisstopo, 01.10.25. 35

Figure 6: Présentation possible des mesures d'entretien prévues le long du tracé, avec filtre annuel, carte interactive et tableau récapitulatif des valeurs. 38

Figure 7: Ensemble de mesures prévues dans le Programme de mesures pour une année donnée à venir (actifs en couleur foncée, section d'entretien en couleur claire). 39

Figure 8: Modèle BIM permettant d'afficher des prévisions de l'état de différentes parties de l'ouvrage (bleu = partie de l'ouvrage sélectionnée ; vert à rouge : couleurs correspondant à la classification de l'état des ouvrages d'art définie par l'OFROU).....40

Figure 9: Overview map of the case study highway section with labels for bridges and tunnels. Map © swisstopo, 01.10.25. 43

Figure 10: Possible visualization of the estimated maintenance interventions on the pavement evaluation sections with an annual filter, interactive map, and value overview.....46

Figure 11: Bundled interventions according to the intervention program for a specific year in the future (assets in a dark color, maintenance section in a light color).....47

Figure 12: BIM model with the ability to display condition forecasts for various structural components (blue = selected structural element; green through red represent the colors of the ASTRA condition state definition for engineering structures).....48

Abbildung 13: Bezug eines Objekts zum RBBS (ASTRA, 2024b). 53

Abbildung 14: Illustrative Darstellung zu Aufbau und Verwendung der Zustandsdaten in der Methodik. 57

Abbildung 15: Das Schweizer Nationalstrassennetz mit den Filialen des ASTRA (ASTRA, o. J. [a]). 61

Abbildung 16: Überblick des gesamten Prozessdiagrammes mit der verwendeten Gliederung (Grossformat im Anhang, Abbildung 123). 63

Abbildung 17: Prozessausschnitt der Beobachtung durch die Gebietseinheiten im Betrieb. 63

Abbildung 18: Prozessausschnitt zur Beurteilung von Meldungen und projektfreiem Unterhalt. 65

Abbildung 19: Prozessausschnitt zur Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung der Infrastrukturobjekte. 67

Abbildung 20: Prozessausschnitt der Erhaltungsplanung mit den Prozessschritten betreffend den Netz-, respektive Abschnittsüberblick bezüglich des Zustands und den Projekten. 71

Abbildung 21: Illustratives Beispiel einer Mehrjahresplanung mit der betrachteten Strecke oben in der Horizontalen sowie den verschieden Erhaltungsprojekten über die Zeit dargestellt. 73

Abbildung 22: Prozessausschnitt der Erhaltungsplanung betreffend den Bedarf und den daraus folgenden Handlungen. 74

Abbildung 23: Prozessausschnitt der Erhaltungsplanung betreffend der Projekterarbeitung mit den verschiedenen Iterationen. 76

Abbildung 24: Zusammenstellung des Entscheidungsgremiums nach Projekttyp für den Unterschriftenlauf zur Freigabe der Projektgenerierung. (ASTRA, 2021c) 81

Abbildung 25: Prozessausschnitt zur Realisierung und Projektbegleitung. 82

Abbildung 26: Übersichtsplan der Testrecke mit Beschriftung der Brücken und Tunnel. Kartenbasis © swisstopo, 01.10.25. 91

Abbildung 27: Übersichtsplan der *Pont sur La Sorge* mit Beschriftung. Kartenbasis © swisstopo, 01.10.25. 94

Abbildung 28: Grundriss *Pont sur La Sorge - droit* mit Bauwerksteilbezeichnung (ASTRA, 2024a). 95

Abbildung 29: Längsschnitt *Pont sur La Sorge - droit* mit Bauwerksteilbezeichnung (ASTRA, 2024a). 95

Abbildung 30: Querschnitt *Pont sur La Sorge - droit* mit Bauwerksteilbezeichnung (ASTRA, 2024a). 95

Abbildung 31: Achsbanddarstellung der potenziellen Erhaltungsobjekte und des Zustandsindex I2 (ASTRA, 2024c, S. 14). 97

Abbildung 32: Verlaufskurve für die Zustandsprognose im ASTRA für Index I3 (ASTRA, 2024b, S. 91). Die Linien sind von unten nach oben VK1 bis VK4. 98

Abbildung 33: Beispielhafte Darstellung von den gewählten Erhaltungsobjekten bzw. Trasse-Teilstücke für das Fallbeispiel. 99

Abbildung 34: Trassee-Teilstücke in positiver (Grün und Blau) und negativer (Rot und Orange) Achsenrichtung (Farben abwechselnd zur Unterscheidung, Beschriftung nur für jedes dritte Trasse-Teilstück). 100

Abbildung 35: Bayes'sches Netz mit den Einflussgrössen für die Abschätzung des Zustands eines Bauwerksteils und den relativen Gewichten (RG) der einzelnen Einflussgrössen.....107

Abbildung 36: Karte der Schweiz mit der durchschnittlichen Anzahl der Frosttage. (Quelle MeteoSchweiz) 110

Abbildung 37: Karte der Schweiz mit der durchschnittlichen Anzahl der Hitzetage. (Quelle MeteoSchweiz) 110

Abbildung 38: Karte der Schweiz mit der durchschnittlichen Anzahl der Niederschlagstage. (Quelle MeteoSchweiz) 111

Abbildung 39: Histogramme der durchschnittlichen Anzahl Tage im Jahr für die drei Klimaindikatoren (Frost, Hitze, Niederschlag) für jeden Quadratkilometer in der Schweiz über die Jahre 1991 bis 2020 (Hervorhebung der Werte Min und Max sowie der Perzentile für die Normalisierung). 112

Abbildung 40: Histogramm der zusammengerechneten Werte für die Einflussgrösse Umwelt in der Schweiz für jeden Quadratkilometer mit zwei möglichen Schwellenwertpaaren über die Jahre 1991 bis 2020. 113

Abbildung 41: Karte der Schweiz mit dem berechneten Einflusswert Umwelt mit dem Schwellenwert der Drittels-Perzentile über die Jahre 1991 bis 2020 (entsprechend gleich viel Fläche für alle drei Einflusswerte). 113

Abbildung 42: Karte der Schweiz mit dem berechneten Einflusswert Umwelt mit den Schwellenwerten bei den Dritteln des Wertebereichs über die Jahre 1991 bis 2020. 114

Abbildung 43: Beispiel der Aggregierung von sechs unterschiedlichen Matrizen für den generalisierten Bauwerksteiltyp ‘Stütze, Pfeiler’ und den Schadensprozess ‘Korrosion im Stahlbeton’. 117

Abbildung 44: Stabilisierung der Wahrscheinlichkeiten für eine spezifische Einflussgrössenkombination (resultierend in zwei Zustandsklassen). 122

Abbildung 45: Stabilisierung der Wahrscheinlichkeiten für eine spezifische Einflussgrössenkombination (resultierend in drei Zustandsklassen). 123

Abbildung 46: Illustration der Herleitung des maximalen Verkehrsflusses über eine Brücke zwischen Ein- und Ausfahrten. 129

Abbildung 47: Illustrative Darstellung wie fehlende Zustandsdaten (Rot) anhand der benachbarten Daten (Blau) für ein Strassennetz abgeschätzt werden können. 136

Abbildung 48: Struktur des verwendeten ANN-Kriging-Modells am Beispiel von 4 Nachbarn (D=Distanz, Z=Zustandsnote, W=trainierte Gewichte). 138

Abbildung 49: Detailbetrachtung der Multiplikation der Nachbarsdaten (Distanz und Zustandsnote) mit den zu trainierenden Gewichten der ersten Gewichtsmatrix W_1 des neuralen Netzes. 139

Abbildung 50: Konstruktion der Datenfenster für das Modell. 140

Abbildung 51: Resultate des ANN-Krigings für den Indikator I0 mit dem Vergleich zur linearen Interpolation am Datensatz von 2024. 144

Abbildung 52: Resultate des ANN-Krigings für den Indikator I2 mit dem Vergleich zur linearen Interpolation am Datensatz von 2024. 145

Abbildung 53: Resultate des ANN-Krigings für den Indikator I3 mit dem Vergleich zur linearen Interpolation am Datensatz von 2024. 145

Abbildung 54: Resultate des ANN-Krigings für den Indikator I4 mit dem Vergleich zur linearen Interpolation am Datensatz von 2024. 146

Abbildung 55: Beispiel der Abschätzung der Zustandsnote für den Indikator I2 am Datensatz des Jahres 2024 an einer Strassenbewertungsfläche. 146

Abbildung 56: Übersicht der Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags mit der angeglichenen a priori Prozessfunktion für den Indikator I0. 153

Abbildung 57: Veranschaulichung der Abschätzung für I0 an der Beispiel-Bewertungsfläche 1. 153

Abbildung 58: Veranschaulichung der Abschätzung für I0 an der Beispiel-Bewertungsfläche 2. 154

Abbildung 59: Übersicht der Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags mit der angeglichenen a priori Prozessfunktion für den Indikator I2. 155

Abbildung 60: Veranschaulichung der Abschätzung für I2 an der Beispiel-Bewertungsfläche 1. 156

Abbildung 61: Veranschaulichung der Abschätzung für I2 an der Beispiel-Bewertungsfläche 2. 156

Abbildung 62: Übersicht der Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags mit der angeglichenen a priori Prozessfunktion für den Indikator I2. 158

Abbildung 63: Veranschaulichung der Abschätzung für I3 an der Beispiel-Bewertungsfläche 1. 159

Abbildung 64: Veranschaulichung der Abschätzung für I3 an der Beispiel-Bewertungsfläche 2. 159

Abbildung 65: Übersicht der Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags mit der angeglichenen a priori Prozessfunktion für den Indikator I2. 161

Abbildung 66: Veranschaulichung der Abschätzung für I4 an der Beispiel-Bewertungsfläche 1. 161

Abbildung 67: Veranschaulichung der Abschätzung für I4 an der Beispiel-Bewertungsfläche 2. 162

Abbildung 68: Prozess des integralen Risikomanagements beim ASTRA (ASTRA, 2017a, Abbildung 5.3). 167

Abbildung 69: Ausschnitt des Erhaltungsplanungsprozesses aus Kapitel 2.3 ergänzt mit der Einordnung der Methodik. 168

Abbildung 70: Algorithmus zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen im ASTRA für Brücken. 171

Abbildung 71: Beispiel eines Fehlerbaums. 178

Abbildung 72: Fehlerbaum für die kleine Leistungseinschränkung. 180

Abbildung 73: Fehlerbaum für die grosse Leistungseinschränkung. 181

Abbildung 74: Fehlerbaum für die totale Leistungseinschränkung. 182

Abbildung 75: Ausschnitt aus der Abbildung zur Ausfallsauswirkung auf der Nationalstrasse (Erath, 2011a, Abbildung 7.9). 189

Abbildung 76: Prognostizierte Zustandsklassenverteilung *Pont sur La Sorge - gauche*, Periode 0 - 4, ohne Unterhaltsmassnahmen. 192

Abbildung 77: Prognostizierte Zustandsklassenverteilung *Pont sur La Sorge - droit*, Periode 0-4, ohne Unterhaltsmassnahmen. 193

Abbildung 78: Sofortmassnahmenrisiko (absolut) - Teil 1. 195

Abbildung 79: Sofortmassnahmenrisiko (absolut) - Teil 2. 195

Abbildung 80: Delta-Sofortmassnahmenrisiko für alle Brücken auf der Teststrecke. 196

Abbildung 81: Wahrscheinlichkeit Unterhaltsmassnahmen der *Pont sur La Sorge - gauche* in den Periode 1-4. 198

Abbildung 82: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmenkosten auf den Brücken der Teststrecke, Teil 1. 200

Abbildung 83: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmenkosten auf den Brücken der Teststrecke, Teil 2. 200

Abbildung 84: Totales Risiko der Brücken *Pont du Cabinet* und *Viaduc de Chillon*. 203

Abbildung 85: Delta-Risiko der Brücken *Pont du Cabinet* und *Viaduc de Chillon*. 203

Abbildung 86: Algorithmus zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen im ASTRA für Brücken übernommen für das Trassee. 204

Abbildung 87: Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Massnahme an einem Beispiel mit den Anwendungsbereichen von Indikator I2. 208

Abbildung 88: Risiko in Mio. CHF für die Planungsperioden P1, P2, P3 und P4 der einzelnen Trassee-Teilstücke in negativer Achssegmentrichtung. Die orangefarbige, abgestufte Darstellung zeigt das Delta Risiko, wobei Weiss 0% und das dunkle Orange (z.B. bei T92) einen Wert von 100% oder mehr bedeutet. 213

Abbildung 89: Risiko in Mio. CHF für die Planungsperioden P1, P2, P3 und P4 der einzelnen Trassee-Teilstücke in positiver Achssegmentrichtung. Die orangefarbige, abgestufte Darstellung zeigt das Delta Risiko, wobei Weiss 0% und das dunkle Orange (z.B. bei T92) einen Wert von 100% oder mehr bedeutet. 214

Abbildung 90: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmen des Trassees für die Planungsperioden P1-P4. Die gelbfarbige, abgestufte Darstellung zeigt die Massnahmenwahrscheinlichkeit: Hellgelb steht für 20% (z. B. T86 in P1), dunkles Gelb für einen Wert von fast 100 % (z. B. T88 in P4).....216

Abbildung 91: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmen des Trassees für die Planungsperioden P1-P4. Die gelbfarbige, abgestufte Darstellung zeigt die Massnahmenwahrscheinlichkeit: Hellgelb steht für 20% (z. B. T59 in P4), dunkles Gelb für einen Wert von fast 100 % (z. B. T61 in P4).....217

Abbildung 92: Ausschnitt aus dem Erhaltungsplanungsprozess mit der Einordnung der Methodik zur Bündelung von Massnahmen.....223

Abbildung 93: Topologische Modellierung der ersten Kilometer der Teststrecke mit einem Luftbild im Hintergrund. 227

Abbildung 94: Schematische Darstellung der topologischen Modellierung der ersten Kilometer der Teststrecke. 227

Abbildung 95: Schematische Darstellung der Erhaltungsabschnittsoptionen der ersten Kilometer der Teststrecke. 229

Abbildung 96: Darstellung der berücksichtigten Abhängigkeiten zwischen Bauanlagen und Trassee-Teilstücken.....238

Abbildung 97: Beispielgraph G mit Unterhaltsmassnahme an Brücke B3. 241

Abbildung 98: Beispielgraph G für Massnahmen an mehreren Trasse-Teilstücken und der Brücke B3.....242

Abbildung 99: Netzwerkillustration zum Beispielgraph G für Massnahmen an mehreren Trasse-Teilstücken und der Brücke B3. 242

Abbildung 100: Massnahmenprogramm der Teststrecke räumlich dargestellt für jedes Jahr der Planungsperiode (Blau = Jahr 6, Grün = Jahr 7, Orange = Jahr 8, Violett = Jahr 9, Rot = Jahr 10).....252

Abbildung 101: Gebündelte Massnahmen im Jahr 6 (erstes Bündel, Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).....253

Abbildung 102: Gebündelte Massnahmen im Jahr 6 (zweites Bündel, Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).....253

Abbildung 103: Gebündelte Massnahmen im Jahr 7 (Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe). 254

Abbildung 104: Gebündelte Massnahmen im Jahr 8 (Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe). 254

Abbildung 105: Gebündelte Massnahmen im Jahr 9 (erstes Bündel, Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).....255

Abbildung 106: Gebündelte Massnahmen im Jahr 9 (zweites Bündel, Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).....255

Abbildung 107: Gebündelte Massnahmen im Jahr 10 (Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe). 256

Abbildung 108: BIM-Modelle aus dem Projekt MINERVA. a) *Pont sur le Flon*, b) *Pont sur la Sorge*, c) *Pont sur la Mèbre*, d) *Pont sur la Lutrive*, e) *Pont sur la Pétause*, f) *Tunnel du Flonzaley*, g) *Pont sur la Paudèze* 258

Abbildung 109: Definition der Parameter zur Darstellung (links) und Filterun (rechts) der Zustandsklassen in verschiedenen Planungsperioden. 259

Abbildung 110: Grobe Darstellung der Informationsverknüpfung mit Dynamo. 260

Abbildung 111: Auswahl einzelner Bauwerksteile mit der Möglichkeit diese isoliert zu betrachten. 261

Abbildung 112: Mögliche Darstellung der Bauwerksteile eines Modells in einem Übersichtsblatt. 262

Abbildung 113: BIM-Modell mit den Bauwerksteilen gemäss dem Zustand eingefärbt. 263

Abbildung 114: Netzübersicht zum Vergleich verschiedener Bauanlagen. 264

Abbildung 115: Darstellung des Risikos der Trassee-Teilstücke. 264

Abbildung 116: Spezifische Betrachtung eines Trasse-Teilstücks auf der Karte mit der Übersichtstabelle daneben, sortiert nach dem Delta-Risiko....265

Abbildung 117: Darstellung der Bündelung von Massnahmen für fünf verschiedene Jahre der Planungsperiode (Farben, Blau = Jahr 1, Grün = Jahr 2, Orange = Jahr 3, Violett = Jahr 4, Rot = Jahr 5). 265

Abbildung 118: Tabellendarstellung der gebündelten Massnahmen in Jahr 7 der Planungsperiode.....266

Abbildung 119: Tabellendarstellung der Erhaltungsabschnitte für unterschiedliche Jahre der Planungsperiode. 266

Abbildung 120: Beispiel eines mit KI erstellten BIM-Models basiert auf Konstruktionsplänen (https://imc-ch.ch/InfBim/home). 282

Abbildung 121: Darstellung von Schäden in BIM am Beispiel von (Isailović et al., 2020).....283

Abbildung 122: Darstellung eines BIM-Modells mit den Zuständen. 283

Abbildung 123: Erhaltungsplanungsprozess Teil 1. 295

Abbildung 124: Erhaltungsplanungsprozess Teil 2 296

Abbildung 125: Fragebogen für die AHP-Experteninterviews.....305

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Datenerhebung mit Bezugsdatum und Referenz. 59

Tabelle 2: Beschreibungskategorien für die Prozessschritte. 62

Tabelle 3: Die 5 Projekttypen mit den dazugehörigen Bestimmungen für die Durchführung der Projektsteuerungssitzung PSS-0. (ASTRA, 2021c) ...79

Tabelle 4: Nebeneinanderstellung der Prozessschritte und deren Äquivalent aus den verschiedenen schriftlichen Hauptgrundlagen. 84

Tabelle 5: Begründung und Erklärung zur Wahl der Benennung und des Zeitpunktes der verschiedenen Prozessschritte im Anbetracht der schriftlichen Hauptgrundlagen. 86

Tabelle 6: Brückenanlagen der Teststrecke mit: Baujahr, Länge, mittlere Höhe und Zustandsklasse (ZK) der letzten Inspektion. 93

Tabelle 7: Tunnelanlagen der Teststrecke mit: Baujahr, Länge, und Zustandsklasse (ZK) der letzten Inspektion.....93

Tabelle 8: Bauwerksteile der *Pont sur La Sorge – droit*, identisch mit denen der Seite *gauche*. 96

Tabelle 9: Trassee-Teilstücke auf der positiven Achssegment Richtung von Villars-Sainte-Croix (T2) nach Rennaz (T180). Hellgrau, Trassee-Teilstücke, die teilweise über eine Brücke führen und Dunkelgrau, Trassee-Teilstücke, die teilweise im Tunnel liegen. 101

Tabelle 10: Trassee-Teilstücke auf der positiven Achssegment Richtung von Villars-Sainte-Croix (T3) nach Rennaz (T191). Hellgrau, Trassee-Teilstücke, die teilweise über eine Brücke führen und Dunkelgrau, Trassee-Teilstücke, die teilweise im Tunnel liegen. 102

Tabelle 11: Mögliche Einflusswerte der Einflussgrössen sowie die möglichen Zustandsklassen von Bauwerksteilen. 108

Tabelle 12: Liste der generalisierten Bauwerksteiltypen mit deren erwarteten Nutzungsdauer.....109

Tabelle 13: Schwellenwerte für die Einteilung des DTV in die Einflusswerte gemäss den 33%- und 67%-Perzentilen. 110

Tabelle 14: Einteilungsbereich der Einflusswerte sowie der Zustandsklasse basierend auf der festgelegten Wahrscheinlichkeitsverteilung. 115

Tabelle 15: Definition der Skalenwerte, welche für den paarweisen Vergleich im AHP benutzt werden. (Nach Saaty 1990) 116

Tabelle 16: Beispiel einer ausgefüllten AHP-Matrix für den generalisierten Bauwerksteiltyp ‘Stütze, Pfeiler’ und den Schadensprozess ‘Korrosion im Stahlbeton’. 116

Tabelle 17: Beispiel von 12 MC-Simulationen mit dem Einflusswert entsprechend den Zufallswerten....118

Tabelle 18: In den letzten beiden Spalten sind der berechnete Wert der Zustandsklasse für die MC-Simulationen und die entsprechende Einteilung. 119

Tabelle 19: Beispiel der Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung anhand der Anzahl Simulationsergebnisse in der resultierenden Zustandsklasse. 120

Tabelle 20: Beispiel einer Tabelle mit der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zustands für jede mögliche Kombination der drei Einflusswerte. ..122

Tabelle 21: Beispiel einer 5-Jahres-Verfallsmatrix für den Schadensprozess ‘Korrosion im Stahlbeton’ bei neutralem Einfluss. 125

Tabelle 22: Die berechnete 1-Jahres-Verfallsmatrix für den Schadensprozess ‘Korrosion im Stahlbeton’ bei neutralem Einfluss. 126

Tabelle 23: Die rekonstruierte 5-Jahres-Verfallsmatrix aus der 1-Jahres-Verfallsmatrix für den Schadensprozess ‘Korrosion im Stahlbeton’ bei neutralem Einfluss. 127

Tabelle 24: Anzahl der Bauwerksteile mit Zustandsklasse ausserhalb der gewünschten Skala von 1 bis 5 aufgeschlüsselt nach generalisiertem Bauwerksteiltyp. 128

Tabelle 25: Mittlere Abweichungen der abgeschätzten Zustandsklassenverteilungen für unterschiedliche generalisierte Bauwerksteiltypen anhand von vier Metriken. 132

Tabelle 26: Mittlere Abweichungen der abgeschätzten Zustandsklassenverteilungen in Bezug auf die Schadensprozesse. 132

Tabelle 27: Auswertung der Abschätzung am Querträger 1 mit der EMD-Metrik....134

Tabelle 28: Auswertung der Abschätzung am Querträger 4 mit der EMD-Metrik....134

Tabelle 29: Beispiel der Verwendung der Zustandsschätzung anhand von vier Querträgern einer Brücke. 134

Tabelle 30: Deskriptive Statistik zum Datensatz von I0 für das Jahr 2024, mit den sich leicht ändernden verwertbaren Daten abhängig der Anzahl berücksichtigter Nachbarn. 142

Tabelle 31: Deskriptive Statistik zum Datensatz von I2 für das Jahr 2024, mit den sich leicht ändernden verwertbaren Daten abhängig der Anzahl berücksichtigter Nachbarn. 142

Tabelle 32: Deskriptive Statistik zum Datensatz von I3 für das Jahr 2024, mit den sich leicht ändernden verwertbaren Daten abhängig der Anzahl berücksichtigter Nachbarn. 142

Tabelle 33: Deskriptive Statistik zum Datensatz von I4 für das Jahr 2024, mit den sich leicht ändernden verwertbaren Daten abhängig der Anzahl berücksichtigter Nachbarn. 143

Tabelle 34: Abschneiden der Abschätzungen für den Indikator I0. 155

Tabelle 35: Abschneiden der Abschätzungen für den Indikator I2. 157

Tabelle 36: Abschneiden der Abschätzungen für den Indikator I3. 160

Tabelle 37: Abschneiden der Abschätzungen für den Indikator I4. 163

Tabelle 38: Kurzbeschreibung der Schritte im Algorithmus zur Bestimmung von Unterhaltsmassnahmen. 170

Tabelle 39: Schritt 1 «Auswahl [Teil]netz» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen. 172

Tabelle 40: Schritt 2 «Datenaufbereitung» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen. 172

Tabelle 41: Schritt 3 «Zustandsprognose» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen. 173

Tabelle 42: Schritt 4 «Sofortmassnahmenrisiko» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen. 173

Tabelle 43: Schritt 5 «Massnahmenstrategie» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen. 174

Tabelle 44: Schritt 6 «Kostenschätzung» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen. 175

Tabelle 45: Schritt 7 «Priorisierung» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen. ..176

Tabelle 46: Schritt 8 «Ausgabe» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen. 176

Tabelle 47: Definition der Top-Ereignisse. 177

Tabelle 48: Erklärung der Symbole eines Fehlerbaums (Andrews & Lunt, 2012)...179

Tabelle 49: Standartwerte für die Eintrittswahrscheinlichkeit der Basisereignisse..183

Tabelle 50: Auflistung aller angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeiten der Basisereignisse. 186

Tabelle 51: Nutzerkosten pro Tag [CHF/d] für jede Auswirkungskategorie und Top-Ereignis. 189

Tabelle 52: Unterhaltsmassnahmen der *Pont sur La Sorge - gauche*. 199

Tabelle 53: Anzahl Unterhaltsmassnahmen pro Periode für jede Brücke der Teststrecke 202

Tabelle 54: Erhaltungsmassnahmenarten im Modul PMS (ASTRA, 2024b, S. 89). 206

Tabelle 55: Erhaltungsmassnahmen und deren Anwendungsbereich (Gnehm, 2008, S. 56) 207

Tabelle 56: Massnahmenstrategie Anwendungsbereich. 207

Tabelle 57: Massnahmenstrategie angewendet auf zwei fiktive Trasse-Teilstücke. 209

Tabelle 58: Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ereignisse fürs Trassee. 210

Tabelle 59: Auszug aus den Daten der topologischen Modellierung der Teststrecke mit den Teilstücken und Anlagen; der Route, der Position und den Nachbaren 228

Tabelle 60: Auszug aus den Erhaltungsabschnittsoptionen entlang der Teststrecke für die ersten 17 Kilometer 230

Tabelle 61: Vier beispielhafte Szenarien und deren Erhaltungsabschnitte 231

Tabelle 62: Modelparameter für die BPR-Funktion nach Vrtic et al. (2018). 234

Tabelle 63: Die kommentierten Variablen für die Nutzerkostenberechnung. 235

Tabelle 64: Annahmen über die Dauern von Unterhaltsmassnahmen. 236

Tabelle 65: Berücksichtigte Abhängigkeiten zwischen Bauanlagen und Trassee-Teilstücken. 237

Tabelle 66: Knoten des Netzwerkflussgraphen. 243

Tabelle 67: Parameter und Entscheidungsvariablen des Netzwerkflussgraphen. 244

Tabelle 68: Unterhaltsmassnahmen in den Jahre 6 bis 10 in der Zukunft. 249

Tabelle 69: Ergebnisse aus der automatischen Bündelung von Massnahmen in den Jahre 6 bis 10 in der Zukunft. 251

Tabelle 70: Demonstration anhand eines Beispiels von vier Querträgern einer Brücke für den Vergleich der Zustandsmodelle mit den Inspektionsresultaten. 263

Tabelle 71: Verfallsmatrizen für die Schadensprozesse 10 bis 40 unter neutralem Einfluss mit den entsprechenden Übergangswahrscheinlichkeiten in Prozent zur Abschätzung der Zustände nach einem bzw. fünf Jahren. 297

Tabelle 72: Verfallsmatrizen für die Schadensprozesse 50 bis 90 unter neutralem Einfluss mit den entsprechenden Übergangswahrscheinlichkeiten in Prozent zur Abschätzung der Zustände nach einem bzw. fünf Jahren. 298

Tabelle 73: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozess "Korrosion im Stahlbeton". 299

Tabelle 74: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozess "Frostschäden am Beton". 300

Tabelle 75: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozess "Ausblühen" 300

Tabelle 76: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozess "Korrosion am Baustahl". 301

Tabelle 77: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozess "Schaden am Mauerwerk". 301

Tabelle 78: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozessen «Schäden an Fahrbahnübergängen», «Schäden an Lagern», «Schäden am Belag» und «Schäden an der Abdichtung». 302

Tabelle 79: Erfolgsvektoren für die Unterhaltsmassnahmen bei allen Schadensprozessen. 303

Tabelle 80: Anzahl Antworten und Anteil an konsistenten Antworten aus den AHP-Fragebögen. 304

Tabelle 81: Geometrisch gemittelte Ergebnisse aus den AHP-Interviews für die Einflussgrössen und das resultierende Konsistenzverhältnis. 307

Tabelle 82: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmen auf der feien Strecke für die Planungsperioden P1. Für jede Massnahme ist die Wahrscheinlichkeit, der auslösende Index, der Typ und die Kosten angeben. 309

Tabelle 83: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmen auf der feien Strecke für die Planungsperioden P2-P4. Für jede Massnahme ist die Wahrscheinlichkeit, der auslösende Index, der Typ und die Kosten angeben. 310

Tabelle 84: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmen für das Trassee auf Brücken und in Tunnel für die Planungsperioden P1-P4. Für jede Massnahme ist die Wahrscheinlichkeit, der auslösende Index, der Typ und die Kosten angeben. 312

Abkürzungsverzeichnis

AHP	analytischer Hierarchieprozess
ANN	Artificial Neural Network (künstliches neuronales Netz)
Art.	Artikel
ASTRA	Bundesamt für Strassen
Bd.	Band
BPMN 2.0	Business Process Model and Notation 2.0
BPR	Bureau of Public Roads
BSA	Fachbereich Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen
Bsp.	Beispiel
bspw.	beispielsweise
BWT	Bauwerksteil
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CR	Konsistenzverhältnis (‘Consistency Ratio’)
CRPS	Continuous Ranked Probability Score
Diff.	Differenz
DTV	durchschnittlicher Tagesverkehr
Einf.-Wert	Einflusswert
EK	Erhaltungskonzept
EKF	Extended Kalman Filter
EM	Erhaltungsmanagement (oder je nach Kontext Einzelmassnahme(-n))
EMD	Earth Mover’s Distance (W1 für diskrete Verteilungen)
EMNS	Fachapplikation Erhaltungsmanagement der Nationalstrassen
EP	Erhaltungsplanung/-planer (oder je nach Kontext Erhaltungsprojekt(-e))
F1 (1-5)	Bsp. Filiale 1 (Filialen 1 bis 5)
GE	Gebietseinheiten
Gen. Bwt. Typ	Generalisierter Bauwerksteiltyp
gLei	Grosse Leistungseinschränkung (nur in Formeln verwendet)
GW	Grenzwert (nur in Formeln verwendet)
I (-O/-W)	Abteilung Strasseninfrastruktur (-Ost/-West)
Insp.	Inspektion (periodische visuelle Tätigkeit zur Feststellung der Zustände von Brücken)
IQR	Inter-Quartil-Range (deutsch: Interquartilsspanne)
K	Fachbereich Kunstbauten
KBU	Kleiner baulicher Unterhalt
KI	Künstliche Intelligenz
KUBA	Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel
kLei	Kleine Leistungseinschränkung (nur in Formeln verwendet)
LiDAR	Light Detection And Ranging
MAE	Mean Absolute Error (mittlerer absoluter Fehler)
MC	Monte-Carlo(-Simulationen)
MCW	Monte-Carlo(-Simulations)-Wert

MINERVA	Abkürzung des vorliegende Forschungsprojekt: Integrierte Planung von Unterhaltsmassnahmen auf Strassenabschnitten, die aus Anlagen unterschiedlicher Art bestehen
MISTRA	Management-Informationssystem Strasse und Strassenverkehr
MK	Massnahmenkonzept
MP	Massnahmenprogramm
N	Abteilung Strassennetze
Nr.	Nummer
PA	Offenporiger Asphalt (oder Belag)
PM	Projekt Management (Filialbereich)
PMF	Probable Maximum Flood (deutsch: grösstmögliches Hochwasser)
RBBS	Räumliches Basis-Bezugssystem
Ref	Referenz(massnahmen)programm
RG	relatives Gewicht
RMSE	Root Mean Squared Error (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers)
SDA	Semidichtes Mischgut (bzw. oft auch Asphalt oder Belag)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Sim.	Simulation
SM	Sofortmassnahme (nur in Formeln verwendet)
SSI	Standards und Sicherheit der Infrastruktur
T	Fachbereich Trassee
T/G	Fachbereich Tunnel und Geotechnik
TRA	Fachapplikation MISTRA Trassee
tLei	Totale Leistungseinschränkung (nur in Formeln verwendet)
UM	Unterhaltsmassnahme (nur in Formeln und Tabellen verwendet)
UPlaNS	Unterhaltsplanung Nationalstrassen
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
W1	Wasserstein-Distanz 1. Ordnung
ZK	Zustandsklasse

Hinweis

In diesem Bericht wird aus Gründen der besseren Verständlichkeit an manchen Stellen das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten sind dabei ausdrücklich mitgemeint.

Bei der Erstellung dieses Berichts kamen digitale Schreibhilfen und Übersetzungswerkzeuge (DeepL) zum Einsatz, um den Stil und die Grammatik zu verbessern.
Bei der Entwicklung der Programmierung der Methoden in Python und R kamen generative KI-Modelle zum Einsatz.

Zusammenfassung

Einleitung und Ziele
Gemäss Bundesgesetz ist das Bundesamt für Strassen (ASTRA) verantwortlich, die Funktionsfähigkeit der Nationalstrassen zu gewährleisten. Mit zunehmendem Alter der Infrastruktur wird deren Erhaltung wichtiger. Eine effektive und effiziente Planung der Unterhaltsmassnahmen rückt daher immer mehr ins Zentrum. Fortschritte in der Forschung legen nahe, dass digitale Hilfsmittel und der Gebrauch von Datenmodellen für gute Abschätzungen des aktuellen und zukünftigen Zustands den Prozess der Erhaltungsplanung noch effektiver und effizienter gestalten können. Effektiv in dem Sinne, dass es unterstützt, die «richtigen» Massnahmen zu bestimmen, und effizient in dem Sinne, dass die Entscheidungen ressourcenschonend getroffen werden können.

Zur Ausarbeitung konkreter Ziele für die Forschungsarbeit ist in einem ersten Schritt der Prozess der Erhaltungsplanung dokumentiert und beschrieben. Als Grundlage dienen vorhandene öffentliche sowie interne Dokumente des Bundesamts für Strassen. Durch Gespräche mit involvierten Personen der Filiale Estavayer-le-lac konnte das Verständnis des Prozesses zudem entscheidend vertieft werden. Mithilfe der Analyse können spezifische und hilfreiche Vorschläge für Verbesserungen und neue Hilfsmittel des Prozesses erarbeitet werden. Zudem wird das Risiko eines Scheiterns der Anwendung neuer Hilfsmittel in der Praxis verringert, da diese stets mit der Vorgehensweise des Bundesamts für Strassen abgestimmt werden können.

Allgemeine Erkenntnisse zur aktuellen Umsetzung des Prozesses sind, dass die vorhandenen Fachapplikationen als Datenbanken genutzt werden. Es werden jedoch kaum digitale Hilfsmittel benutzt, die dabei helfen, Zustandsabschätzungen oder Priorisierungen von Unterhaltsmassnahmen durchzuführen. Vielmehr herrscht die Wahrnehmung, dass Empfehlungen aus periodisch durchgeführten Inspektionen bzw. Zustandserfassungen und -bewertungen (ca. alle 5 Jahre für Trassee bzw. Kunstbauten) auslösenden Charakter haben, anstatt dass eine mittel- bis langfristige Planung unter Berücksichtigung von Massnahmenstrategien die Wahl der Unterhaltsmassnahmen beeinflusst.

Der Abschluss der Prozessanalyse identifiziert konkrete Bereiche, in denen die Effektivität und Effizienz gesteigert werden kann. Diese Handlungsfelder bilden die Grundlage für die Zielsetzung dieser Arbeit:

- Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Infrastrukturzuständen
  Im ASTRA werden bereits Inspektionen und Zustandserfassungen durchgeführt, der aktuelle Zustand ist jedoch nicht immer vollständig bekannt und dies kann mit einer Abschätzung ergänzt werden. Auf Grundlage dieser Abschätzungen kann die zukünftige Entwicklung der Zustandsnote bzw. der Zustandsmerkmale abgeschätzt werden.
- Prognose von Unterhaltsmassnahmen.
  Mithilfe der Zustandsdaten können unter Berücksichtigung vorgegebener Unterhaltsmassnahmenstrategien Prognosen über die zu erwartenden Unterhaltsmassnahmen erstellt werden. Diese Möglichkeit besteht für Brücken in computergestützter Form, für das Trassee jedoch nicht. Zudem gibt es keine Entscheidungsstütze, wenn Unterhaltsmassnahmen nicht zum geeigneten Zeitpunkt ausgeführt werden können.
- Automatische Bündelung von Massnahmen
  Die Koordination von Massnahmenprogrammen, also die Bündelung von Massnahmen an Anlagen unterschiedlicher Art, erfolgt in fachübergreifender Abstimmung. Dies ist vorteilhaft für die Betreiber- und Nutzerkosten, da dabei Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Die Bündelung erfolgt anhand von Erfahrungswerten. Es gibt kein Massnahmenprogramm, das automatisch erstellt wird und zur Entscheidungshilfe dient.

Das Hauptziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines methodischen Rahmenwerks zur Planung, Priorisierung und optimalen Bündelung von Unterhaltsmassnahmen. Mithilfe dieser Methoden soll sowohl die Effektivität als auch die Effizienz gesteigert werden, d. h., es sollen rechtzeitig die richtigen Massnahmen zum optimalen Zeitpunkt ausgewählt und Risiken ressourcenschonend gemanagt werden. Konkret geht es um die Darstellung von Informationen, die für die Inspektion bzw. Zustandserfassung und -bewertung sowie die Definition des Handlungsbedarfs hilfreich sind. Ebenfalls wird die Verwendung von Methoden vorgestellt, die konsistente und transparente Analysen als Grundlage für Entscheidungen bezüglich Unterhaltsmassnahmen ermöglichen, auf Basis vergleichbarer aktueller Zustände sowie Abschätzungen für den zukünftigen Zustand. So können die richtigen Massnahmen rechtzeitig ausgewählt werden. Dies ermöglicht einen konsistenten Überblick und die Verwendung von Algorithmen zur optimalen Bündelung von Unterhaltsmassnahmen, welche wiederum die Effizienz massgeblich erhöhen können. Die Methoden werden mit Daten einer Testrecke validiert und demonstriert. Die Teststrecke erstreckt sich vom Autobahnkreuz Villars-Sainte-Croix bis zur Ortschaft Rennaz (Achssegment der N9) und ist in Abbildung 1 zu sehen. Da sich die Strecke vorwiegend in einer Hanglage befindet und viele kleine Täler überquert sowie durch diverse Hügel führt, gibt es entsprechend viele Bauanlagen und -werke, die diese Hindernisse in Form von Brücken überqueren bzw. in Form von Tunneln durchqueren. Die entwickelten Methoden, die dazu beitragen, die Teilziele zu erfüllen, sind nachfolgend beschrieben.

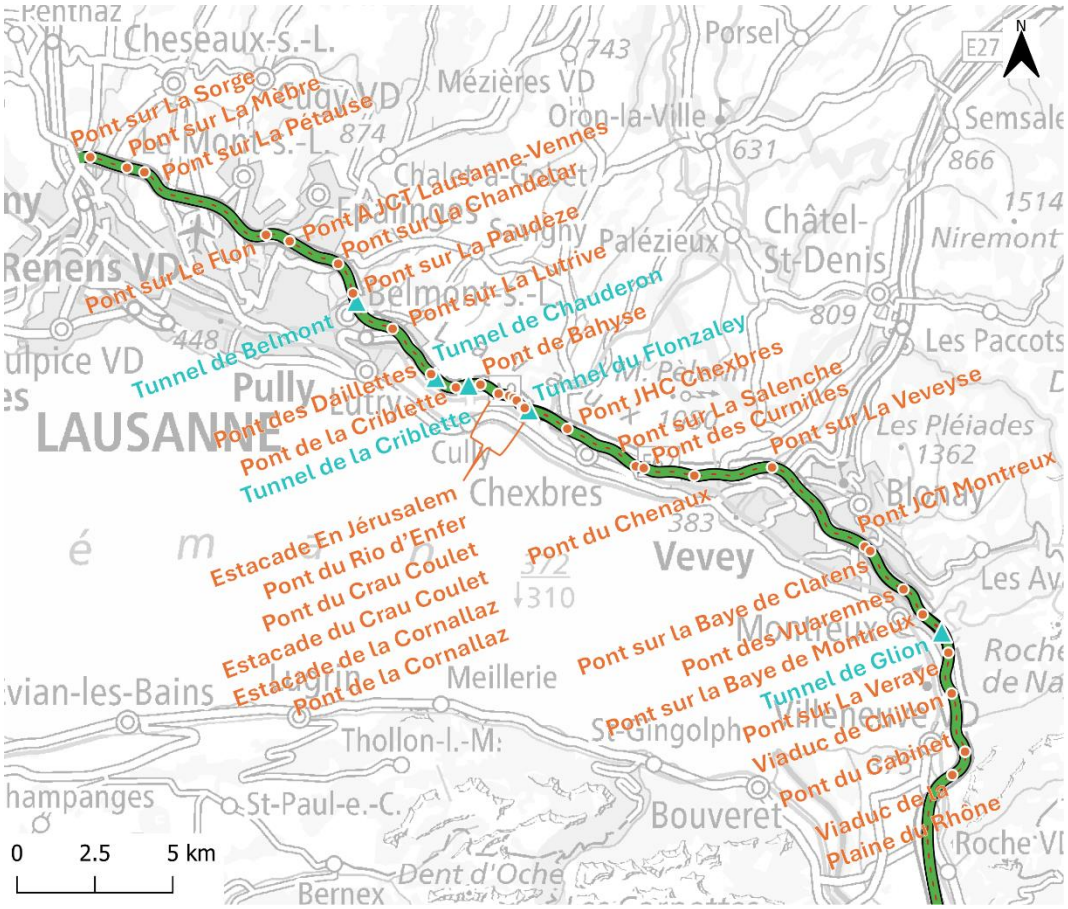


Abbildung 1: Übersichtsplan der Teststrecke mit Beschriftung der Brücken und Tunnel. Kartenbasis © swisstopo, 01.10.25.

Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Infrastrukturzuständen

Für die Abschätzung von Infrastrukturzuständen sind die Methoden für die Brücken und das Trassee separat erarbeitet worden, da diese unterschiedliche Zustandsskalen verwenden. Für das Trassee wurden zudem nur dichte Beläge explizit erarbeitet. Inwiefern diese Methodik auf andere Beläge, beispielsweise lärmarme, angewendet werden kann, wurde nicht geprüft. Für Tunnel sind Bemerkungen zur Adaption der Methodik verfasst.

Für die Abschätzung des gegenwärtigen Zustands von Brückenbauwerksteilen wird eine Methodik verwendet, welche anhand von einfach zugänglichen Einflussgrössen mithilfe eines Bayes'schen Netzes eine probabilistische Abschätzung des gegenwärtigen Zustandes geben kann. Die gewählten Einflussgrössen: Alter (Nutzungsdauer), Verkehr (Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung) und Umwelt (Temperatur, Niederschlag, Sonnenstunden etc.) wurden mittels des Analytischen Hierarchieprozesses durch Experteninterviews gewichtet. Dies resultierte für verschiedene generalisierte Bauwerksteiltypen und Schadensprozesse in bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen, welche abhängig von den Einflussgrössen, eine probabilistische Zustandsabschätzung enthalten. Die zur Validierung herangezogene «Earth Mover's Distance» (kurz EMD, entspricht Wasserstein-Distanz 1. Ordnung für diskrete Verteilungen) über alle 2861 Bauwerksteile beträgt 0.62. Die EMD beschreibt wieviel «Verteilungsmasse» verschoben werden müsste, um eine Verteilung optimal in eine andere zu überführen.

Ein EMD-Wert von 0.62 bedeutet, dass die abgeschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilung im Durchschnitt etwas mehr als eine halbe Zustandsklasse verschoben werden müsste, um mit der tatsächlichen Verteilung übereinzustimmen, was bezogen auf die ganze Zustandsklassenskala (1–5) ca. 15 % sind. In Anbetracht dessen, dass die Abschätzung des Zustands auf eher allgemeinen Einflussgrössen basiert, ist dieser Fehlerwert akzeptabel.

Für die Abschätzung des zukünftigen Zustands von Brückenbauwerksteilen werden Verfallsmatrizen verwendet. Diese Verfallsmatrizen sind spezifiziert durch den primären Schadensprozess und die Auswahl der Einflusskategorie (negativ, neutral, positiv). Um die Zustände verschiedener Bauwerksteile aus unterschiedlichen Inspektionsjahren in einem gemeinsamen Jahr vergleichbar darzustellen, wird eine Methode verwendet, welche die vorhandenen 5-Jahres-Matrizen in 1-Jahres-Matrizen umwandelt. Ergänzend wird die Verwendung nicht stationärer Verfallsmatrizen vorgestellt. Diese sind insbesondere dann sinnvoll, wenn davon auszugehen ist, dass sich der Verfallsprozess über die Nutzungsdauer eines Bauteils verändert, beispielsweise aufgrund veränderter Materialeigenschaften nach Unterhaltsmassnahmen. Dies führt zu einer realistischeren Abbildung des Verfalls, macht die Berechnung kostenoptimierter Massnahmenstrategien aber komplexer. Da Daten zu Unterhaltsmassnahmen fehlen, werden für die Demonstration altersabhängige, nicht stationäre Verfallsmatrizen für die Abschätzung zukünftiger Zustände verwendet.

Zur Abschätzung des aktuellen Zustands von Trassee-Bewertungsflächen wird eine Methode verwendet, die fehlende Zustandsdaten anhand der räumlichen Korrelation schätzt. Dafür wird ein hybrider Ansatz aus Kriging und einem künstlichen neuronalen Netz verwendet. Die resultierenden Abschätzungen für den Zustandsindex I2 zeigen einen Abschätzungsfehler, gemessen mit dem RMSE, für den Testdatensatz zwischen 0.59 und 0.53 (abhängig von der Anzahl der berücksichtigten benachbarten Bewertungsflächen in einer seriellen Sequenz entlang einer «Fahrspur»). Die Abschätzungen für die anderen Zustandsindizes weisen durchwegs einen geringeren RMSE auf. Der RMSE ist insofern eine geeignete Metrik, dass er grössere Abweichungen stärker gewichtet und damit empfindlicher auf signifikante Fehler reagiert als beispielsweise ein MAE.

Zur Abschätzung des zukünftigen Zustands von Trassee-Bewertungsflächen kommt ein erweiterter Kalman-Filter zum Einsatz. Dieser basiert auf einer angeglichenen Verlaufsfunktion der Zustandsentwicklung, die auf den vorhandenen Zustandsdaten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags basiert. Der Filter kann aufgrund neuer Informationen (Messwerte) die Verlaufskurve einer Bewertungsfläche anpassen. Mit dieser Methode kann nicht nur der Erwartungswert des Zustands in der Zukunft ermittelt werden, sondern auch die Varianz dieser Abschätzung als Mass der Unsicherheit berücksichtigt werden. Die Zeitreihen der Zustandsindexwerte weisen eine grosse Streuung auf, wobei auch markante Zustandsverbesserungen zu beobachten sind. Die Analyse dieser Phänomene ist nicht Teil dieser Arbeit, hat aber natürlich einen Einfluss auf die ermittelten Verlaufsfunktionen der Zustandsentwicklung und den Abschätzungsfehler des Filters. Beispielsweise wird bei der Abschätzung des zukünftigen Zustands für den Zustandsindex I3 ein RMSE von 0.818 erreicht. Die 2-Sigma-Deckung zeigt, dass rund

95 % der Messwerte innerhalb des Bereichs von zwei Standardabweichungen der Vorhersage liegen, also im ungefähren 95-%-Konfidenzintervall der Abschätzungen.

Die mithilfe der Methodiken geschätzten aktuellen und zukünftigen Zustände bilden die Basis für die Prognose von Unterhaltsmassnahmen und die automatische Bündelung von Massnahmen.

Prognose von Unterhaltsmassnahmen

Auch für die Prognose von Unterhaltsmassnahmen (Wahrscheinlichkeit in jeder Planungsperiode, Ausführungszeitpunkt nach Massnahmenstrategie, Typ, Kosten, Risiko) unterscheidet sich die Methodik für die Brücken und das Trassee. Zudem werden beim Trassee nur dichte Beläge erarbeitet. Abbildung 2 zeigt, wie die Ergebnisse für das Trasse dargestellt werden können. Beispielsweise mit einer Filterfunktion für das betrachtete Jahr oder Planungsperiode, einem interaktiven Kartenausschnitt, in dem jedes Trassee-Teilstück angewählt werden kann, sowie einer Werteübersicht mit dem Namen des Trassee-Teilstücks, dem Massnahmentyp und der dazugehörigen Wahrscheinlichkeit, den Kosten und dem Risiko. Trassee-Teilstücke sind definierte Abschnitte von ca. 100 m bis 1000 m, meist aber 500 m, welche die Breite einer Fahrtrichtung überspannen.

Zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen an Brücken wird eine Methodik verwendet, die auch eine Priorisierung ermöglicht. Mithilfe von Daten zum gegenwärtigen und zukünftigen Zustand wird das Risiko der Notwendigkeit einer Sofortmassnahme (kurz auch Sofortmassnahmenrisiko) für eine Brücke anhand von drei standardisierten Fehlerbäumen berechnet. Die drei Fehlerbäume unterscheiden sich in der Leistungseinschränkung, die für die Nutzer aufgrund einer Sofortmassnahme resultiert. Alle drei Fehlerbäume haben die gleichen drei Hauptäste: das Auffinden alarmierender sichtbarer Schäden, anthropogene und natürliche Ereignisse und nicht ausreichende statische Nachweise. Das Sofortmassnahmenrisiko der Brücken dient als Entscheidungshilfe, wenn eine Priorisierung stattfinden muss unter Ressourcenknappheit.

Ähnlich wie bei Brücken werden auch für das Trassee mögliche Unterhaltsmassnahmen aufgrund der Zustandsdaten und der Massnahmenstrategie prognostiziert. Im Gegensatz zu Brücken erfolgt die Abschätzung des Sofortmassnahmenrisikos nicht mit Fehlerbäumen, sondern anhand des zustandsbasierten Risikos der Notwendigkeit eines totalen Belagsersatzes. Der totale Belagsersatz wird herangezogen, da dieser für einen schlechten Zustand vorgesehen ist. Für diesem Zustand wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit einer zustandsbedingten Sofortmassnahme erhöht ist. Das Sofortmassnahmenrisiko dient somit als Entscheidungshilfe, wenn eine Priorisierung unter Ressourcenknappheit stattfinden muss.

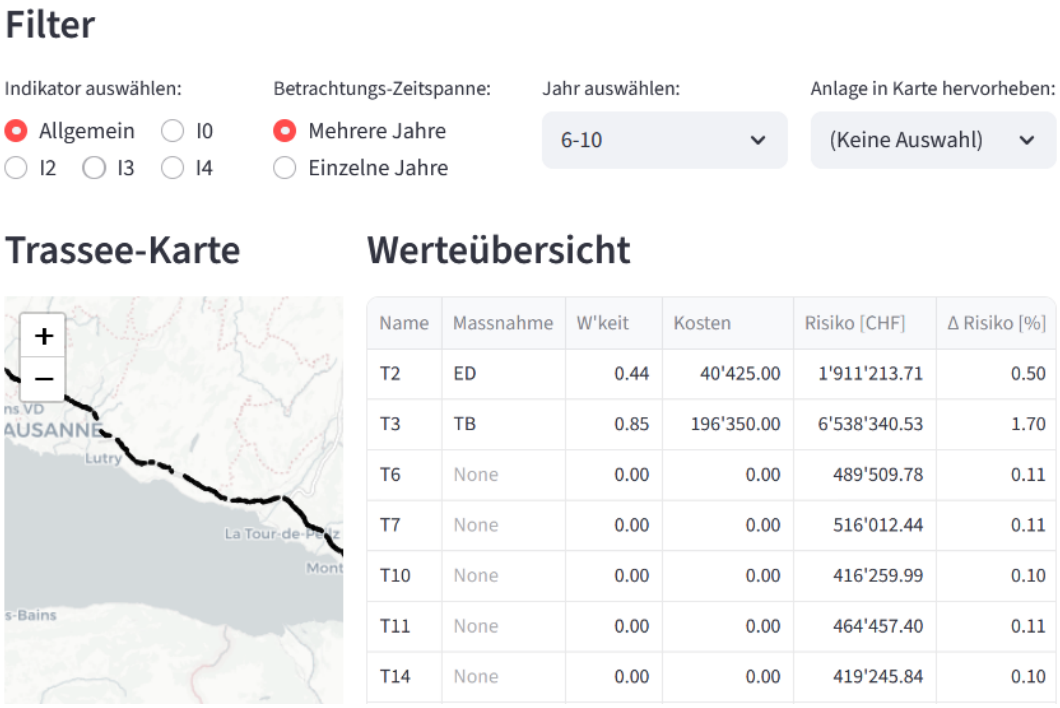


Abbildung 2: Mögliche Darstellung der prognostizierten Unterhaltsmassnahmen am Trassee mit Jahresfilter, interaktiven Karte und Werteübersicht.

Automatische Bündelung von Massnahmen

Bei der automatischen Bündelung von Massnahmen wird ein Netzwerkflussmodell als gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem formal definiert und gelöst. Diese Methode wird auf der Teststrecke angewendet, um ein Massnahmenprogramm zu erstellen, was nur möglich ist mit den Prognosen von den Unterhaltsmassnahmen auf allen Berücksichtigten Anlagearten. Die dafür notwendige Netzwerkabstraktion unterteilt die Teststrecke in benachbarte Anlagen, also Trasse-Teilstücke, Brücken und Tunnel, die durch die Optimierung gebündelt werden sollen. Es wird davon ausgegangen, dass die erforderliche zeitliche Gruppierung der Unterhaltsmassnahmen auf Anlagenebene vorhanden ist und das Jahr, in dem die Massnahmen ausgeführt werden sollen, bekannt ist. Aus der Prognose der Unterhaltsmassnahmen sind zudem die Betreiberkosten und das Sofortmassnahmenrisiko bekannt. Unter verschiedenen Annahmen, beispielsweise zur Dauer einer Massnahme, ist die Berechnung der Nutzerkosten möglich. Die Optimierung ist so formuliert, dass eine Lösung für ein gesuchtes bzw. aufzustellendes Massnahmenprogramm gesucht wird, welches den besten Nettonutzen im Vergleich zu einem Referenzprogramm aufweist. In diesem werden die Massnahmen für jede Anlage zum optimalen Zeitpunkt ausgeführt. Das gesuchte bzw. das aufzustellende Massnahmenprogramm versucht, durch ökonomische Abhängigkeiten (das Teilen von Fixkosten) und durch funktionale Abhängigkeiten (das gleichzeitige Ausführen von Massnahmen, wodurch sich die Bauzeit verkürzt) die Betreiber- und Nutzerkosten zu senken. Der Nutzen wird als Differenz zwischen den beiden Massnahmenprogrammen berechnet, um Verschiebungen von Massnahmen an Anlagen weg vom optimalen Zeitpunkt zu berücksichtigen. Abbildung 3 zeigt beispielhaft, wie die Ergebnisse in einer interaktiven Karte für ein bestimmtes Jahr aussehen könnten.

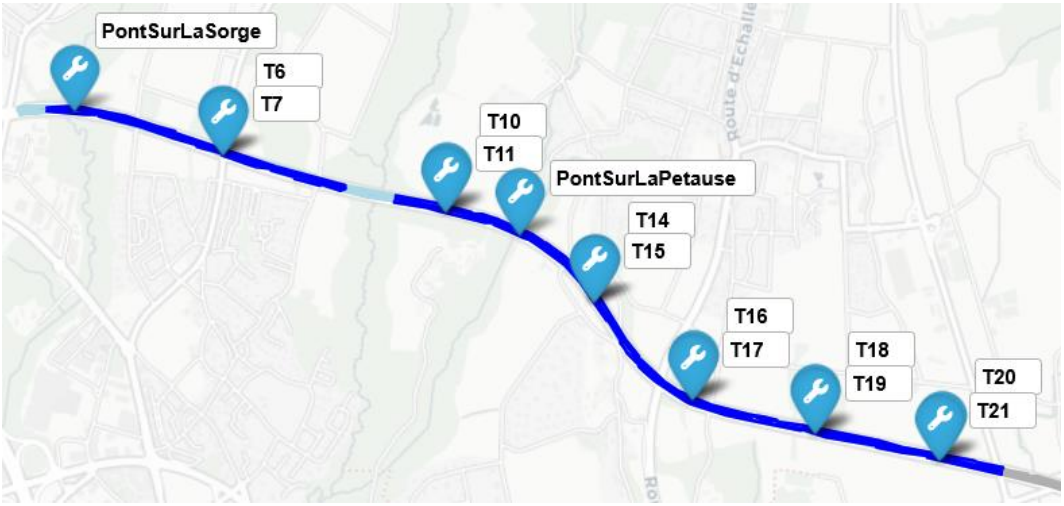


Abbildung 3: Gebündelte Massnahmen nach Massnahmenprogramm für ein bestimmtes Jahr in der Zukunft (Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).

Diskussion und Forschungsbedarf

Mit der Erarbeitung des methodischen Rahmenwerks wurde die fachliche Machbarkeit der Methoden aufgezeigt. Die entwickelten Methoden bilden die Grundlage für zukünftige digitale Entscheidungshilfsmittel innerhalb der Erhaltungsplanung. Um dieses Potenzial für den täglichen Einsatz im Management-Informationssystem Strasse und Strassenverkehr (MISTRA) voll auszuschöpfen, ist in einem nächsten Schritt die softwaretechnische Integration der Methoden in die spezifischen Fachapplikationen vorzusehen. Zur Veranschaulichung wurde eine Vision skizziert, wie die Erhaltungsplanung an der Teststrecke unter Berücksichtigung der vorgestellten Modelle und Algorithmen aussehen könnte. Erstens können die Daten in einer zeitnahen Verwendung visueller Hilfsmittel wie BIM zur Darstellung von Informationen genutzt werden, wie in Abbildung 4 dargestellt. Dabei sind die Bauwerksteile anhand der Zustände zu einem ausgewählten Zeitpunkt eingefärbt. Zweitens stehen in einer (Web-)Applikation, wie dargestellt in Abbildung 2, alle Daten zu den prognostizierten Massnahmen inklusive einer räumlichen Zuordnung zur Verfügung. Mithilfe eines Filters können diese selektiv betrachtet werden. In derselben Applikation kann die Ansicht auf die automatisch gebündelten Massnahmen gewechselt werden (vgl. Abbildung 3), für die ebenfalls eine tabellarische Darstellung der Ergebnisse zur Verfügung steht. Aufbauen auf den erarbeiteten Methoden und der skizzierten Vision ergibt sich künftiger Forschungsbedarf, um den Erhaltungsplanungsprozess technologisch zu vervollständigen. So ist zu erforschen, wie BIM neben der Visualisierung direkt der Erhaltungsplanung dienen kann und welche Rolle die Informationsbeschaffung mit unbemannten Luftfahrzeugen (z. B. Drohnen) spielt. Zudem bleibt zu klären, wie Daten vollautomatisiert in die Datenbanken einfliessen und wie neuartige Überwachungstechnologien, die Diagnosen in Echtzeit übermitteln, auf notwendige Sofortmassnahmen hinweisen können.

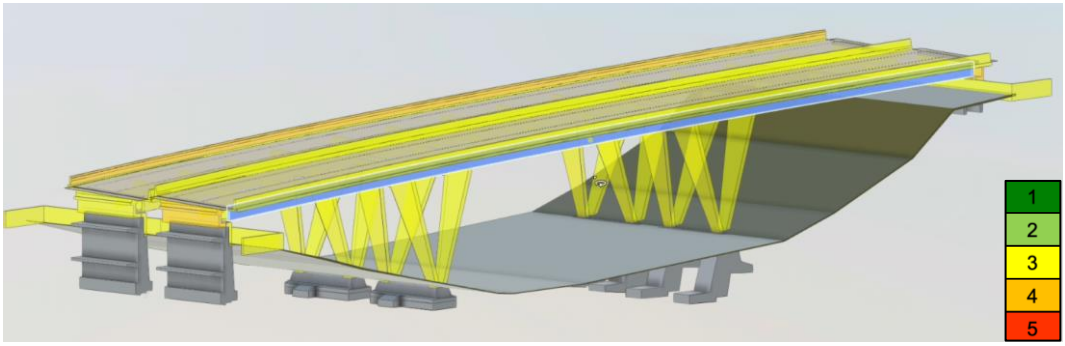


Abbildung 4: BIM-Modell mit der Möglichkeit, Zustandsabschätzungen für verschiedene Bauwerksteile anzuzeigen (blau = selektiertes Bauwerksteil und grün bis rot die Farben der ASTRA Zustandsklassendefinition für Kunstbauten).

Schlussfolgerung

Die Forschungsarbeit zeigt, dass die heutige Erhaltungsplanung zwar auf bewährten Prozessen basiert, diese jedoch oft uneinheitlich umgesetzt werden und dadurch an Konsistenz und Nachvollziehbarkeit verlieren. Eine Vereinheitlichung der Abläufe und die Unterstützung durch digitale Hilfsmittel – insbesondere Abschätzungs- und Prognosemodelle – können wesentlich dazu beitragen, fundiertere und langfristig tragfähige Entscheidungen effizienter und effektiver zu ermitteln. Über die methodischen Entwicklungen hinaus hat die Arbeit auch gezeigt, dass die Wirksamkeit von eingesetzten digitalen Lösungen wesentlich von den zugrundeliegenden Planungsprozessen abhängt. Heute wird die Erhaltungsplanung zwar nach etablierten Abläufen durchgeführt, doch fehlt es oft an Einheitlichkeit und Konsistenz in der Umsetzung. Inspektionsberichte bzw. externe Zustandserfassungen & -bewertungen haben dabei teilweise schon fast projektauslösenden Charakter, wodurch die langfristige strategische Planung in den Hintergrund tritt. Digitale Hilfsmittel und transparente Abschätzungsmodelle können hier helfen, die Abläufe zu vereinheitlichen und nachvollziehbarer zu machen. Auch Algorithmen zur automatischen Bündelung von Massnahmen können einen wesentlichen Beitrag leisten, mit geringerem Aufwand verschiedene Projektideen zu generieren. Dadurch wird nicht nur die Qualität der Entscheidungen verbessert, sondern auch ermöglicht, Risiken und Ressourcenengpässe systematisch und frühzeitig zu berücksichtigen.

Insgesamt verdeutlichen die Arbeiten, dass eine systematischere Erhaltungsplanung für das ASTRA möglich ist. Sie erfordert jedoch (1) die weitere Validierung der Methoden an realen Fallstudien, (2) die Einbettung in bestehende Systeme wie TRA und KUBA sowie (3) eine enge Abstimmung mit den Bedürfnissen der Praxis. Werden diese Schritte umgesetzt, können die entwickelten methodische Ansätze einen wichtigen Beitrag leisten, um die vorhandenen Ressourcen effizienter und effektiver einzusetzen und gleichzeitig die Sicherheit und Verfügbarkeit der Nationalstrasseninfrastruktur nachhaltig zu gewährleisten.

Résumé

Introduction et objectifs
Conformément à la loi fédérale, l'Office fédéral des routes (OFROU) est chargé de garantir le bon fonctionnement des routes nationales. À mesure que les infrastructures vieillissent, leur maintenance revêt une importance croissante. Une planification autant efficace qu'efficiente des mesures de maintenance occupe donc une place de plus en plus centrale. Les progrès de la recherche suggèrent que les outils numériques et l'utilisation de modèles de données permettant d'évaluer avec précision l'état actuel et futur des infrastructures peuvent rendre le processus de planification de la maintenance encore plus efficace et efficient. Efficace dans le sens où ces outils peuvent aider à déterminer les «bonnes» mesures, et efficient dans le sens où les décisions peuvent être prises en préservant les ressources.

Afin de définir des objectifs concrets pour ce travail de recherche, la première étape a consisté à documenter et décrire le processus de planification de la maintenance. Les documents publics existants ainsi que les documents internes de l'Office fédéral des routes ont servi de base à cette démarche. Des entretiens avec les personnes concernées de la filiale de l'OFROU d'Estavayer-le-Lac ont en outre permis d'approfondir considérablement la compréhension du processus. Cette analyse a permis d'élaborer des propositions spécifiques et utiles d'améliorations, ainsi que de nouveaux outils pour compléter le processus. De plus, le risque d'échec de la mise en œuvre de nouveaux outils dans la pratique est réduit, car ceux-ci peuvent toujours être harmonisés avec la procédure de l'Office fédéral des routes.

D'une manière générale, on constate que, dans la mise en œuvre actuelle du processus, les applications spécialisées existantes sont utilisées comme bases de données. Cependant, on recourt très peu aux outils numériques dans l'objectif de faciliter la prévision de l'état des ouvrages ou la hiérarchisation des mesures d'entretien. Au contraire, on constate que les recommandations issues d'inspections périodiques ou d'évaluations de l'état (environ tous les 5 ans pour les tracés et les ouvrages d'art) ont un caractère déclencheur. Et que ce n'est pas une planification à moyen ou long terme tenant compte de stratégies d'entretien qui influence le choix des mesures.

L'analyse des processus permet d'identifier des domaines concrets dans lesquels l'efficacité et l'efficience peuvent être améliorées. Ces axes d'action constituent la base de la définition des objectifs du présent travail:

- Prévision de l'état actuel et futur des infrastructures
  L'OFROU effectue déjà des inspections et des relevés d'état, mais l'état actuel n'est pas toujours entièrement connu. Ce dernier peut être complété par une prévision, sur la base de laquelle, il est ensuite possible d'évaluer l'évolution future de la note ou des caractéristiques d'état.
- Estimation des mesures d'entretien
  À l'aide des données d'état, il est possible d'établir des estimations concernant les mesures d'entretien à prévoir, en tenant compte des stratégies d'entretien définies. Cette possibilité existe pour les ponts sous forme informatisée, mais pas pour les tracés. De plus, il n'existe pas d'aide à la décision lorsque les mesures d'entretien ne peuvent pas être exécutées au moment opportun.
- Regroupement automatique des mesures
  La coordination des programmes de mesures, c'est-à-dire le regroupement de mesures d'entretien concernant des actifs de nature différente, s'effectue dans le cadre d'une concertation interdisciplinaire. Cela présente un avantage en termes de coûts pour les exploitants et les utilisateurs, car les interdépendances sont ainsi prises en compte. Le regroupement s'appuie sur des données empiriques. Il n'existe pas de programme de mesures qui soit généré automatiquement et serve d'aide à la décision.

L'objectif principal de ce travail de recherche est de développer un cadre méthodologique pour la planification, la hiérarchisation et la coordination optimale des mesures d'entretien. Ces méthodes visent à améliorer à la fois l'efficacité et l'efficience, c'est-à-dire à sélectionner les mesures appropriées au moment opportun ainsi qu'à gérer les risques de manière à préserver les ressources. Concrètement, il s'agit de présenter des informations utiles pour l'inspection, l'étude et l'évaluation de l'état, ainsi que pour la définition des actions à entreprendre. Le rapport présente également des méthodes permettant de réaliser des analyses cohérentes et transparentes, qui serviront de base aux décisions relatives aux mesures d'entretien. Ces analyses s'appuient sur des données comparables concernant la situation actuelle et des estimations des conditions futures. Elles permettent la sélection des mesures appropriées en temps opportun, le tout avec une vue d'ensemble cohérente. De plus, l'efficacité est considérablement augmentée grâce à l'utilisation d'algorithmes pour regrouper de manière optimale les mesures d'entretien. Ensuite, les méthodes sont validées et démontrées à l'aide de données provenant d'un tronçon test. Ce tronçon s'étend de l'échangeur autoroutier de Villars-Sainte-Croix jusqu'à la localité de Rennaz (segment de l'axe de la N9) et est représenté sur la Figure 5. Le tronçon se trouvant principalement en pente et traversant de nombreuses petites vallées ainsi que diverses collines, il comporte de nombreux ouvrages d'art et de génie civil (ponts ou de tunnels). Les méthodes développées, qui contribuent à la réalisation des objectifs partiels, sont décrites ci-après.

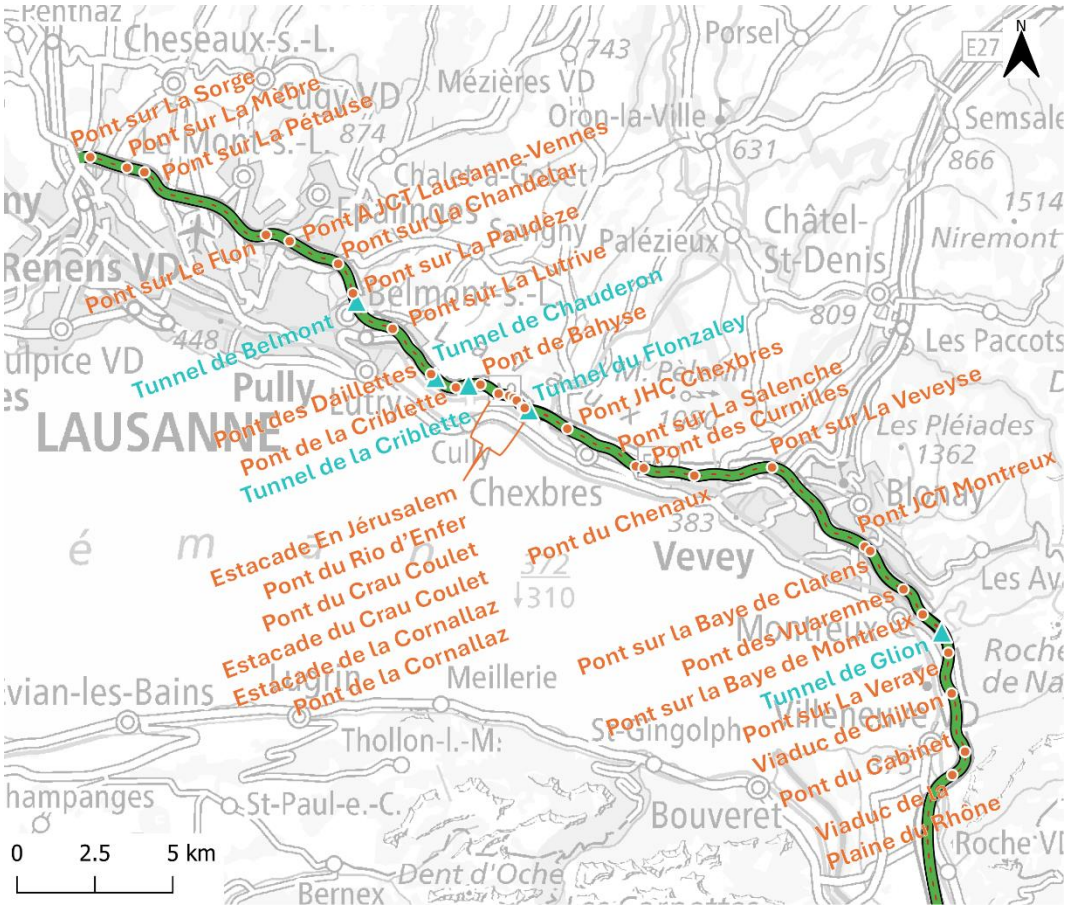


Figure 5: Plan d'ensemble du tronçon test avec indication des ponts et des tunnels. Carte de base © swisstopo, 01.10.25.

Prévision de l'état actuel et futur des infrastructures

Pour la prévision de l'état des infrastructures, les méthodes ont été élaborées séparément pour les ponts et le tracé, car celles-ci utilisent des échelles d'état différentes. Pour le tracé, seules les revêtements denses ont en outre été explicitement pris en compte. La possibilité d'appliquer cette méthodologie à d'autres revêtements, comme ceux à faible émission sonore, n'a pas été examinée. Pour les tunnels, des remarques concernant l'adaptation de la méthodologie ont été rédigées.

Pour évaluer l'état actuel des éléments de ponts, on utilise une méthodologie qui, à partir de paramètres facilement accessibles et à l'aide d'un réseau bayésien, permet de fournir une prévision probabiliste de cet état. Les paramètres sélectionnés – âge (durée d'utilisation), trafic (volume et composition du trafic) et environnement (température, précipitations, ensoleillement, etc.) – ont été pondérés à l'aide d'un processus hiérarchique analytique, développé sur la base d'entretiens avec des experts. Il en a résulté des tableaux de probabilités conditionnelles, cela pour différents types d'éléments de construction généralisés ainsi que pour différents processus de détérioration. Ces tableaux contiennent une prévision de l'état de l'objet en fonction des facteurs d'influence. Pour la validation sur l'ensemble des 2861 éléments de construction, la « Earth Mover's Distance » de 0,62 (EMD, qui correspond à la distance de Wasserstein du premier ordre pour les distributions discrètes), est utilisée. L'EMD décrit la quantité de « masse de distribution » qu'il faudrait déplacer pour faire passer de manière

optimale une distribution à une autre. Une valeur EMD de 0,62 signifie que la distribution de probabilité estimée devrait être décalée en moyenne d'un peu plus d'une demi-classe d'état pour correspondre à la distribution réelle, ce qui représente environ 15 % sur l'ensemble de l'échelle des classes d'état (1–5). Étant donné que la prévision de l'état repose sur des facteurs d'influence plutôt généraux, cette valeur d'erreur est acceptable.

Des matrices de dégradation sont utilisées pour la prévision de l'état futur des éléments de ponts. Ces matrices de dégradation sont définies par le processus de détérioration principal et le type de catégorie d'influence (négative, neutre, positive). Afin de présenter de manière comparable les états de différents éléments de structure issus de différentes années d'inspection pour une même année, une méthode qui convertit les matrices quinquennales existantes en matrices annuelles est utilisée. En complément, l'utilisation de matrices de dégradation non stationnaires est présentée. Celles-ci sont particulièrement utiles lorsqu'il est possible de supposer que le processus de dégradation évolue au cours de la durée de vie d'un élément de construction, par exemple en raison de la modification des propriétés des matériaux suite à des mesures d'entretien. Cela permet une représentation plus réaliste de la dégradation, mais rend le calcul de stratégies des mesures optimisées plus complexe. En l'absence de données sur les mesures d'entretien, des matrices de dégradation non stationnaires dépendantes de l'âge sont utilisées pour la prévision des états futurs.

Pour effectuer la prévision de l'état actuel des parcelles d'évaluation du tracé, on utilise une méthode qui estime les données d'état manquantes à partir de la corrélation spatiale. À cette fin, on recourt à une approche hybride combinant le kriging et un réseau neuronal artificiel. Les prévisions obtenues pour l'indice d'état I2 présentent une erreur de prévision, mesurée par la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), comprise entre 0,59 et 0,53 pour l'ensemble de données de test (en fonction du nombre de zones d'évaluation voisines prises en compte dans une séquence séquentielle le long d'une « voie »). Les prévisions pour les autres indices d'état présentent toutes un RMSE plus faible. Le RMSE est une mesure appropriée dans la mesure où il pondère davantage les écarts importants et réagit donc de manière plus sensible aux erreurs significatives qu'un MAE, par exemple.

Un filtre de Kalman étendu est utilisé pour effectuer la prévision de l'état futur des zones d'évaluation du tracé. Celui-ci repose sur une courbe d'évolution ajustée de l'état, qui s'appuie sur les données d'état disponibles en fonction de l'âge du revêtement. Le filtre peut ajuster la courbe d'évolution d'une surface d'évaluation en fonction de nouvelles informations (valeurs mesurées). Cette méthode permet non seulement de déterminer la valeur attendue de l'état futur, mais aussi de prendre en compte la variance de cette prévision comme mesure de l'incertitude. Les séries chronologiques des valeurs de l'indice d'état présentent une grande variation, mais on observe également des améliorations notables de l'état. L'analyse de ces phénomènes ne fait pas partie de ce travail, mais elle a bien sûr une influence sur les fonctions d'évolution de l'état déterminées et sur l'erreur d'estimation du filtre. Par exemple, lors de la prévision de l'état futur pour l'indice d'état I3, on obtient un RMSE de 0,818. La couverture 2-sigma montre qu'environ 95 % des valeurs mesurées se situent dans la plage de deux

écarts-types de la prévision, c'est-à-dire dans l'intervalle de confiance d'environ 95 % des prévisions.

Les états actuels et futurs estimés à l'aide de ces méthodologies constituent la base pour l'estimation des mesures d'entretien et le regroupement automatique de ces dernières.

Estimation des mesures d'entretien
La méthodologie diffère également entre les ponts et le tracé pour l'estimation des mesures d'entretien (probabilité pour chaque période de planification, date de réalisation selon la stratégie des mesures, type, coûts, risque). De plus, pour le tracé, seuls les revêtements denses sont pris en compte. La Figure 6 montre comment les résultats peuvent être présentés pour le tracé. Par exemple, à l'aide d'une fonction de filtrage pour l'année ou la période de planification considérée, l'extrait de carte interactif dans lequel chaque tronçon de tracé peut être sélectionné, présente un aperçu des valeurs indiquant le nom du tronçon, le type de mesures d'entretien et la probabilité respective, ainsi que les coûts et risques correspondants. Les tronçons de tracé sont des sections définies d'environ 100 m à 1 000 m, mais le plus souvent de 500 m, qui couvrent la largeur d'un sens de circulation.

Pour l'estimation des mesures d'entretien des ponts, on utilise une méthodologie qui permet également d'établir des priorités. À l'aide de données sur l'état actuel et futur, le risque de devoir prendre une mesure immédiate (ou « risque de mesure immédiate ») pour un pont est calculé à l'aide de trois arbres de défaillance standardisés. Ces trois arbres de défaillance se distinguent par la restriction de performance qui en résulte pour les usagers en raison d'une mesure d'urgence. Tous trois comportent les trois branches principales suivantes : la détection de dommages visibles alarmants, les événements anthropiques et naturels, et l'insuffisance des justifications statiques. Le risque de mesures d'urgence pour les ponts sert d'aide à la décision lorsqu'une hiérarchisation s'impose en cas de pénurie de ressources.

À l'instar des ponts, des mesures d'entretien d'urgence possibles sont également prévues pour le tracé sur la base des données d'état et de la stratégie des mesures. Contrairement aux ponts, la prévision du risque de mesures d'urgence ne s'effectue pas à l'aide d'arbres de défaillance, mais sur le risque que l'état du revêtement justifie un remplacement total. Ce dernier est pris en compte, car le remplacement total est prévu en cas de mauvais état. Pour cet état, on part du principe que la probabilité d'une mesure d'urgence est accrue. Le risque lié aux mesures d'urgence sert ainsi d'aide à la décision lorsqu'il faut établir des priorités en cas de pénurie de ressources.

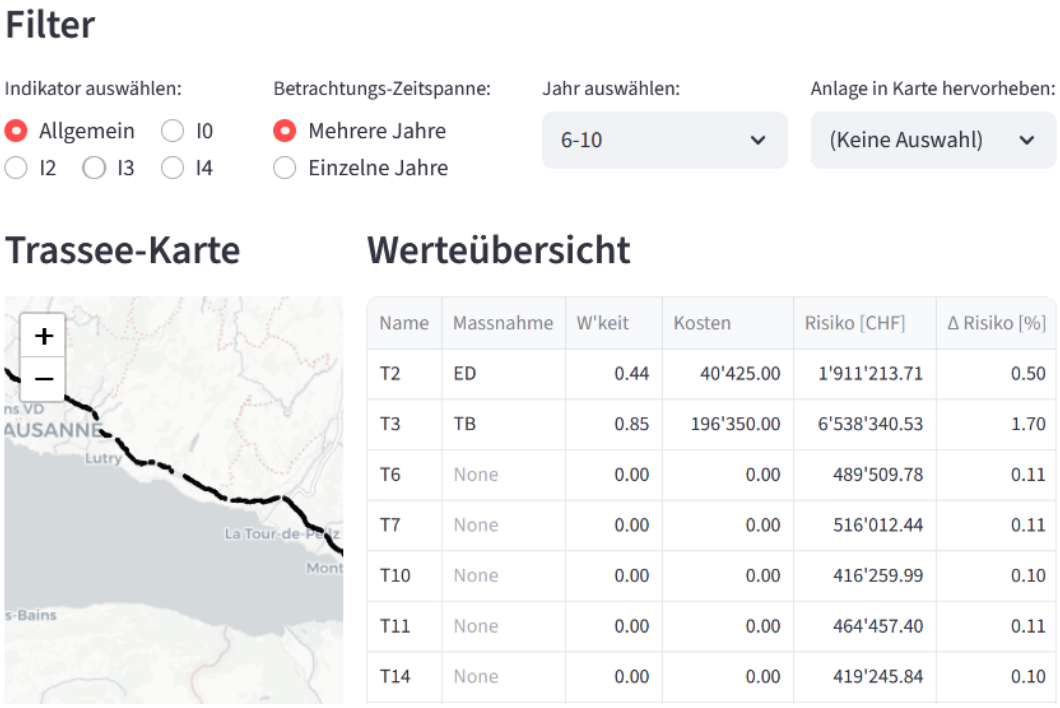


Figure 6: Présentation possible des mesures d'entretien prévues le long du tracé, avec filtre annuel, carte interactive et tableau récapitulatif des valeurs.

Regroupement automatique des mesures

Dans le cadre du regroupement automatique des mesures, un modèle de flux de réseau est défini et résolu sous la forme d'une optimisation mixte en nombres entier. Cette méthode est appliquée au tronçon test afin d'élaborer un programme de mesures, possible uniquement à partir des estimations relatives aux mesures d'entretien sur tous les types d'ouvrages pris en compte. L'abstraction du réseau nécessaire à cet effet subdivise le tronçon test en ouvrages voisins, c'est-à-dire en tronçons de voie, ponts et tunnels, qui doivent être regroupés par l'optimisation. On part du principe que le regroupement temporel requis des mesures d'entretien est disponible et que l'année au cours de laquelle les mesures doivent être exécutées est connue. L'estimation des mesures d'entretien permet en outre de connaître les coûts d'exploitation et le risque lié aux mesures d'urgence. Sous différentes hypothèses, par exemple concernant la durée d'une mesure, le calcul des coûts pour les usagers est possible. L'optimisation est formulée de manière à rechercher une solution pour un programme de mesures recherché ou à établir, qui présente le meilleur bénéfice net par rapport à un programme de référence. Dans ce programme, les mesures sont mises en œuvre pour chaque actif au moment optimal. Le programme de mesures recherché ou à établir vise à réduire les coûts d'exploitation et d'utilisation grâce à des interdépendances économiques (le partage des coûts fixes) et fonctionnelles (la mise en œuvre simultanée de mesures, ce qui raccourcit la durée des travaux). L'avantage est calculé comme la différence entre les deux programmes de mesures et tient compte des décalages des mesures par rapport au moment optimal. La Figure 7 montre à titre d'exemple à quoi pourraient ressembler les résultats sur une carte interactive pour une année donnée.

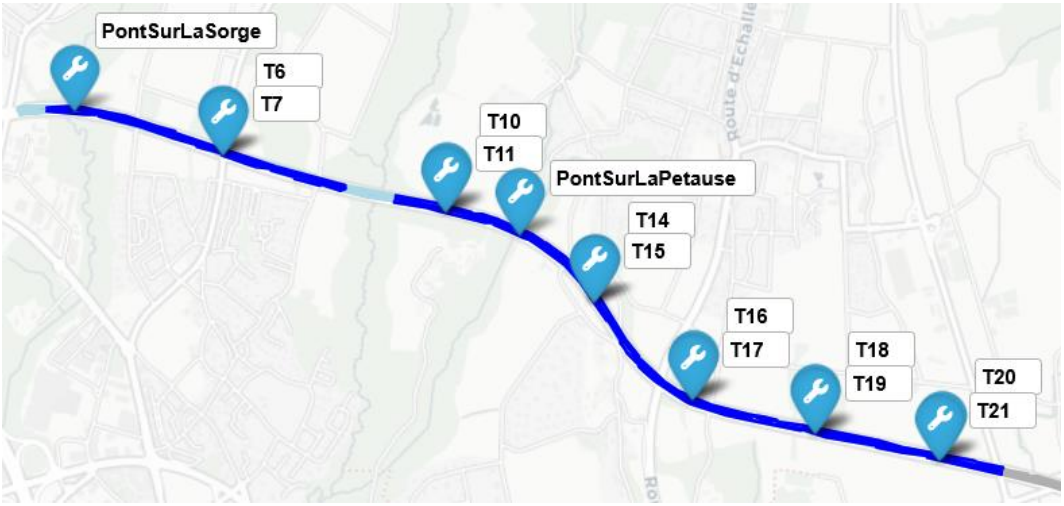


Figure 7: Ensemble de mesures prévues dans le Programme de mesures pour une année donnée à venir (actifs en couleur foncée, section d'entretien en couleur claire).

Discussion et besoins en matière de recherche

L'élaboration du cadre méthodologique a permis de démontrer la faisabilité technique des méthodes. Les méthodes développées constituent la base des futurs outils numériques d'aide à la décision pour la planification de la maintenance. Afin d'exploiter pleinement ce potentiel et pour une utilisation quotidienne dans le système d'information de gestion des routes et du trafic routier (MISTRA), la prochaine étape consistera à prévoir l'intégration technique de ces méthodes dans les applications spécialisées spécifiques. À titre d'illustration, une vision a été esquissée de ce à quoi pourrait ressembler la planification de la maintenance sur le tronçon test en tenant compte des modèles et algorithmes présentés. Premièrement, les données peuvent être utilisées en temps réel avec des outils visuels tels que le BIM pour la représentation des informations, comme le montre la Figure 8. Les éléments de l'ouvrage sont colorés en fonction de leur état à un moment donné. Deuxièmement, toutes les données relatives aux mesures prévues, y compris leur localisation géographique, sont disponibles dans une application (web), comme le montre la Figure 6. Un filtre permet de les consulter de manière sélective. Dans la même application, il est possible de passer à la vue des mesures regroupées automatiquement (cf. Figure 7), pour lesquelles une présentation sous forme de tableau est également disponible. Sur la base des méthodes élaborées et de la vision esquissée, des recherches supplémentaires s'imposent afin de compléter le processus de planification de l'entretien. Il convient ainsi d'étudier comment le BIM peut servir directement à la planification de la maintenance, au-delà de la visualisation, et quel rôle joue la collecte d'informations à l'aide de véhicules aériens sans pilote (par exemple des drones). Il reste en outre à clarifier comment les données sont intégrées de manière entièrement automatisée dans les bases de données et comment les nouvelles technologies de surveillance, qui transmettent des diagnostics en temps réel, peuvent signaler les mesures d'urgence nécessaires.

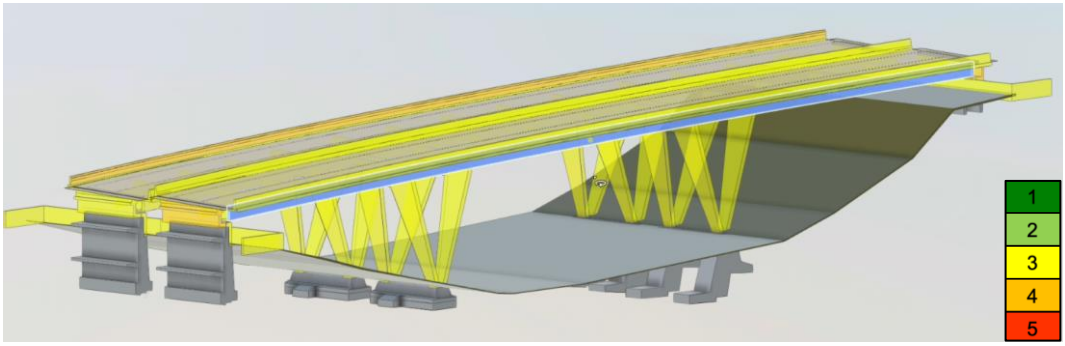


Figure 8: Modèle BIM permettant d'afficher des prévisions de l'état de différentes parties de l'ouvrage (bleu = partie de l'ouvrage sélectionnée ; vert à rouge : couleurs correspondant à la classification de l'état des ouvrages d'art définie par l'OFROU).

Conclusion

Les travaux de recherche montrent que, si la planification actuelle de la maintenance repose sur des processus éprouvés, ceux-ci sont souvent mis en œuvre de manière hétérogène, ce qui leur fait perdre en cohérence et en traçabilité. Une harmonisation des procédures et le recours à des outils numériques – en particulier des modèles de prévision et d'évaluation – peuvent contribuer de manière significative à l'élaboration plus efficace et plus efficiente de décisions mieux fondées et viables à long terme. Au-delà des développements méthodologiques, ce travail montre également que l'efficacité des solutions numériques mises en œuvre dépend largement des processus de planification sous-jacents. Aujourd'hui, la planification de la maintenance est certes réalisée selon des procédures établies, mais la mise en œuvre manque souvent d'uniformité et de cohérence. Les rapports d'inspection ou les relevés et évaluations externes de l'état des ouvrages ont parfois un caractère déclencheur de projets, ce qui relègue la planification stratégique à long terme au second plan. Les outils numériques et les modèles d'évaluation transparents peuvent aider à uniformiser les processus et à les rendre plus compréhensibles. Les algorithmes permettant de regrouper automatiquement les mesures peuvent également contribuer de manière significative à générer différentes idées de projets avec un minimum d'efforts. Cela permet non seulement d'améliorer la qualité des décisions, mais aussi de prendre en compte systématiquement et à un stade précoce les risques et les goulots d'étranglement en matière de ressources.

Dans l'ensemble, ces travaux montrent qu'une planification de la maintenance plus systématique est possible pour l'OFROU. Elle nécessite toutefois (1) la poursuite de la validation des méthodes à l'aide d'études de cas réels, (2) leur intégration dans les systèmes existants tels que TRA et KUBA, ainsi que (3) une coordination étroite avec les besoins pratiques. Si ces étapes sont mises en œuvre, les approches méthodologiques développées pourront apporter une contribution importante à une utilisation plus efficace et efficiente des ressources disponibles, tout en garantissant durablement la sécurité et la disponibilité de l'infrastructure routière nationale.

Summary

Introduction and Objectives
Under federal law, the Federal Roads Office (FEDRO) is responsible for ensuring the functionality of national highways. As infrastructure ages, its maintenance becomes increasingly important. Effective and efficient planning of maintenance measures is therefore becoming a growing priority. Advances in research suggest that digital tools and the use of data models for accurate assessments of current and future conditions can make the maintenance planning process even more effective and efficient. Effective in the sense that it helps determine the “right” measures, and efficient in the sense that decisions can be made in a resource-conserving manner.

To develop specific objectives for the research project, the first step involved documenting and describing the maintenance planning process. Existing public and internal documents from the Federal Roads Office served as the basis for this work. Discussions with key personnel at the Estavayer-le-Lac branch also significantly deepened the understanding of the process. The analysis enables the development of specific and helpful suggestions for improvements and new tools for the process. Furthermore, it reduces the risk of new tools failing in practice, as they can always be aligned with the Federal Roads Office’s procedures.

General findings regarding the current implementation of the process indicate that the existing specialist applications (German: Fachapplikationen) are used merely as databases. However, hardly any digital tools are utilized to assist in carrying out condition assessments or prioritizing maintenance interventions. Instead, the prevailing perception is that recommendations from periodically conducted inspections, condition surveys, and evaluations (approx. every 5 years for pavements and engineering structures, respectively) act as the primary trigger, rather than a medium- to long-term planning process influenced by intervention strategies determining the choice of maintenance interventions.

The conclusion of the process analysis identifies specific areas where effectiveness and efficiency can be increased. These fields of action form the basis for the objectives of this work:

- Forecasting of Current and Future Infrastructure Conditions
  Inspections and condition surveys are already carried out within FEDRO but the current condition is not always fully known and can be supplemented by a forecast. Based on these current conditions (know or forecasted), the future development of the condition state or the condition attributes can be forecasted.
- Estimation of Maintenance Interventions
  Using the condition data and taking predefined intervention strategies into account, estimates can be generated regarding the expected maintenance interventions. This capability exists in a computer-aided form for bridges, but not for the pavements. Furthermore, there is no decision support available if maintenance interventions cannot be executed at the most suitable time.
- Automatic Bundling of Interventions
  The coordination of intervention programs—meaning the bundling of interventions on multiple types of assets—takes place through cross-disciplinary coordination. This is beneficial for both operator and user costs, as dependencies are taken into account. Currently, bundling is based on expert opinion. There is no intervention program that is generated automatically to serve as a decision support tool.

The main objective of this research project is the development of a framework for planning, prioritization, and optimal bundling of maintenance interventions. With the help of these methods, both effectiveness and efficiency are to be increased; meaning that the right interventions are selected at the optimal time and risks are managed in a resource-saving manner. Specifically, it involves the presentation of information that is helpful for inspections, condition surveys, and evaluations, as well as for defining the need for action. Furthermore, the use of methods is introduced that enable consistent and transparent analyses as a basis for decisions regarding maintenance interventions, based on comparable current conditions as well as forecasts for the future condition. This allows the right interventions to be selected in a timely manner. This enables a consistent overview and the use of algorithms for the optimal bundling of interventions, which in turn can significantly increase efficiency. The methods are validated and demonstrated using data from a case study highway section. The case study highway section extends from the Villars-Sainte-Croix motorway junction to the village of Rennaz (axis segment of the N9) and can be seen in Figure 9. Since the route is predominantly located on a slope, crosses many small valleys, and passes through various hills, there are a correspondingly large number engineering structures that cross these obstacles in the form of bridges or traverse them in the form of tunnels. The developed methods that contribute to achieving the sub-objectives are described below.

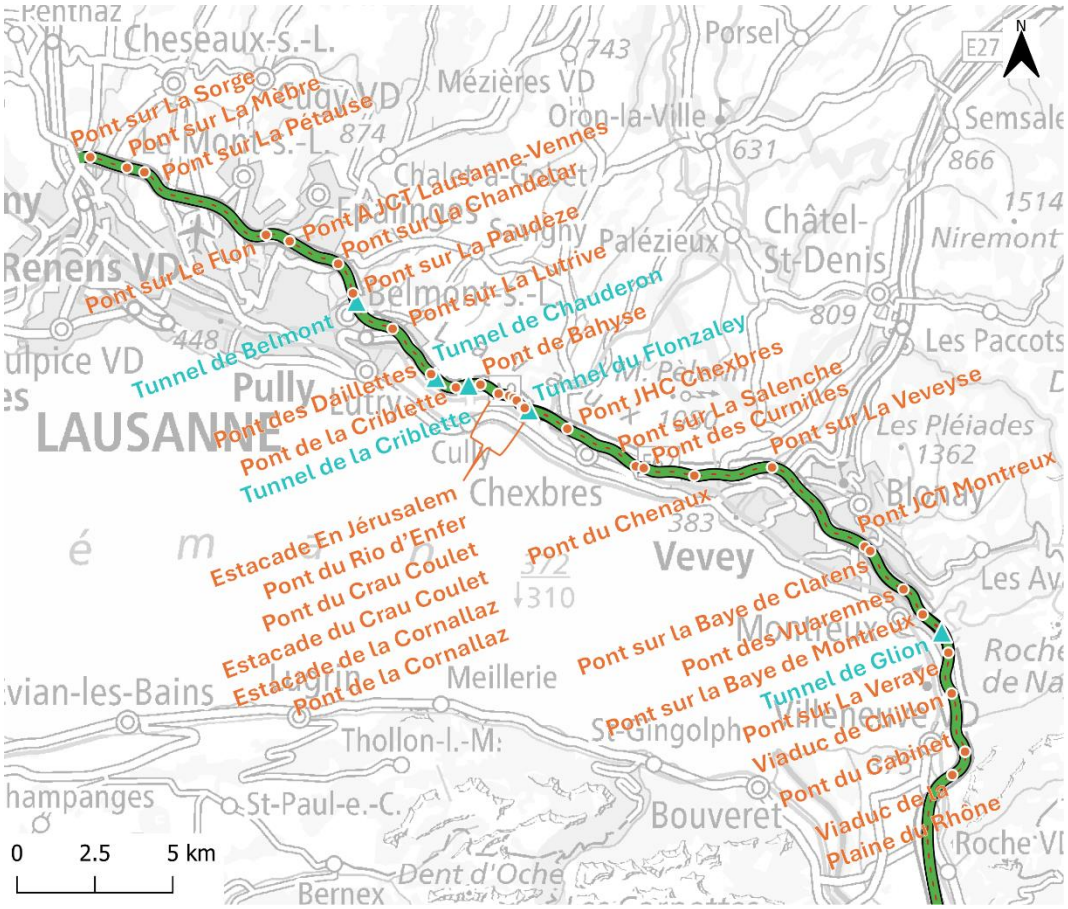


Figure 9: Overview map of the case study highway section with labels for bridges and tunnels. Map © swisstopo, 01.10.25.

Forecasting of Current and Future Infrastructure Conditions

For the forecasting of infrastructure conditions, the methods for bridges and pavements were developed separately, as they use different condition scales. Furthermore, for the pavements, only dense asphalt layers were explicitly looked at. The extent to which this methodology can be applied to other types of asphalt, such as low-noise pavements, was not evaluated. For tunnels, remarks regarding the adaptation of the methodology have been compiled.

For forecasting the current condition of bridge elements, a methodology is used that can provide a probabilistic forecast of the current condition based on easily accessible influencing factors using a Bayesian network. The selected influencing factors: age (service life), traffic (traffic volume and composition), and environment (temperature, precipitation, hours of sunshine, etc.) were weighted by experts through interviews using the Analytic Hierarchy Process. For various generalized element types and deterioration processes, this resulted in conditional probability tables containing a probabilistic condition forecast depending on the influencing factors. The “Earth Mover's Distance” (EMD for short, corresponding to the 1st-order Wasserstein distance for discrete distributions) used for validation across all 2,861 elements is 0.62. The EMD describes how much “distribution mass” would have to be shifted to optimally transform one distribution into another. An EMD value of 0.62 means that, on average, the forecasted probability distribution would have to be shifted by slightly more than half a condition

state to match the actual distribution, which corresponds to approximately 15% of the entire condition state scale (1–5). Considering that the forecast of the condition is based on rather general influencing factors, this error is acceptable.

For forecasting the future condition of bridge elements, deterioration matrices are used. These deterioration matrices are specified by the primary deterioration process and the selection of the influence category (negative, neutral, positive). In order to comparably display the condition states of different elements from various inspection years in a common year, a method is used that converts the existing 5-year matrices into 1-year matrices. Additionally, the use of non-stationary deterioration matrices is introduced. These are particularly useful when it can be assumed that the deterioration process changes over the service life of a element, for example, due to altered material properties following maintenance interventions. This leads to a more realistic representation of deterioration but increases the complexity of calculating cost-optimized intervention strategies. Due to a lack of data on maintenance interventions, age-dependent, non-stationary deterioration matrices are used for the demonstration of forecasting future conditions.

To forecast the current condition of pavement evaluation sections, a method is used that estimates missing condition data based on spatial correlation. A hybrid approach consisting of Kriging and an artificial neural network is applied for this purpose. The resulting forecasts for the condition index I2 shows a forecasting error, measured by the RMSE, for the test dataset between 0.59 and 0.53 (depending on the number of neighboring evaluation sections considered in a serial sequence along a “lane”). The forecasts for the other condition indices consistently show a lower RMSE. The RMSE is a suitable metric in that it weights larger deviations more heavily and is therefore more sensitive to significant errors than, for example, an MAE.

An extended Kalman filter is used to forecast the future condition of pavement evaluation sections. This is based on a fitted curve function of the condition development, which is based on the available condition data as a function of the age of the surface course. Based on new information (measured values), the filter can adjust the trajectory curve of an evaluation section. With this method, it is not only possible to determine the expected value of the condition in the future, but also to consider the variance of this forecast as a measure of uncertainty. The time series of the condition index values show a large scatter, with significant condition improvements also being observed. The analysis of these phenomena is not part of this work but naturally has an influence on the determined curve functions of the condition development and the forecasting error of the filter. For example, an RMSE of 0.818 is achieved when forecasting the future condition for the condition index I3. The 2-sigma coverage shows that around 95% of the measured values lie within the range of two standard deviations of the prediction, i.e., within the approximate 95% confidence interval of the forecasts.

The current and future conditions forecasted using these methodologies form the basis for the estimation of maintenance interventions and the automatic bundling of interventions.

Estimation of Maintenance Interventions

The methodology for bridges and pavements also differs for the estimation of maintenance interventions (probability in each planning period, execution time according to the intervention strategy, type, costs, risk). Furthermore, only dense asphalt was looked at for the pavements. Figure 10 shows how the results for the pavements evaluation sections can be displayed. For example, with a filter function for the considered year or planning period, an interactive map section in which each pavement evaluation section can be selected, as well as a value overview with the name of the pavement evaluation section, the intervention type, and the corresponding probability, costs, and risk. Pavement evaluation sections are defined segments of approximately 100 m to 1000 m, but usually 500 m, which span the width of one driving direction of the road.

For the estimation of maintenance interventions on bridges, a methodology is used that also enables prioritization. Using data on the current and future condition, the risk of the necessity for an emergency intervention for a bridge is calculated using three standardized fault trees. The three fault trees differ in the service reduction that results for users due to an emergency intervention. All three fault trees have the same three main branches: the discovery of alarming visible damage, anthropogenic and natural events, and insufficient structural verifications. The emergency intervention risk of bridges serves as a decision support tool when prioritization must take place under resource constraints.

Similar to bridges, possible maintenance interventions for the pavements are also estimated based on condition data and the intervention strategy. Unlike bridges, the forecast of the emergency intervention risk is not carried out using fault trees, but rather on the basis of the condition-based risk of the necessity for a total pavement replacement. The total pavement replacement is used because it is intended for a poor condition state. For this condition, it is assumed that the probability of a condition-related emergency intervention is increased. The emergency intervention risk thus serves as a decision support tool when prioritization must take place under resource constraints.

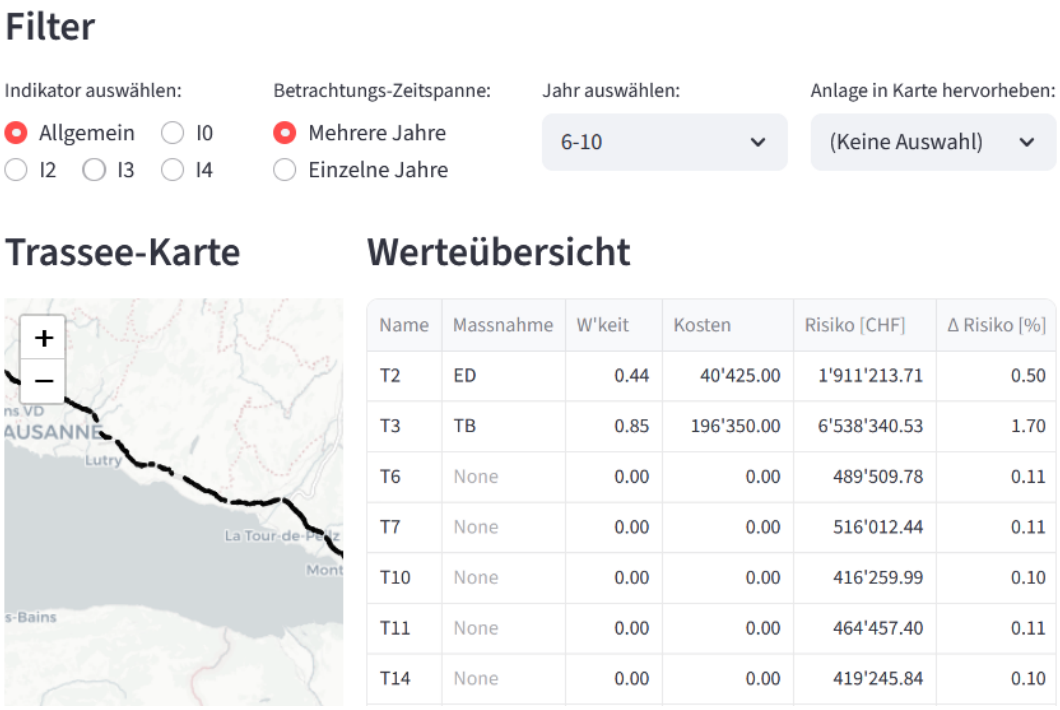


Figure 10: Possible visualization of the estimated maintenance interventions on the pavement evaluation sections with an annual filter, interactive map, and value overview.

Automatic Bundling of Interventions

For the automatic bundling of interventions, a network flow model is formally defined and solved as a mixed-integer optimization problem. This method is applied to the case study highway section to create an intervention program, which is only possible with the estimations of maintenance interventions across all asset types considered. The network abstraction required for this divides the test track into adjacent assets—meaning pavement sections, bridges, and tunnels—that are to be bundled by the optimization. It is assumed that the required temporal grouping of element interventions is available at the asset level and that the year in which the interventions are to be executed is known. Furthermore, the operator costs and the emergency intervention risk are known from the estimation of maintenance interventions. Under various assumptions, such as the duration of an intervention, the calculation of user costs is possible. The optimization is formulated to identify a solution for a proposed program of measures that yields the greatest net benefit compared to a reference program. In this reference program, the interventions for each asset are executed at the optimal time. The target intervention program attempts to reduce operator and user costs through economic dependencies (sharing fixed costs) and functional dependencies (simultaneous execution of interventions, which shortens construction duration). The benefit is calculated as the difference between the two intervention programs to account for shifts in interventions on assets away from the optimal time. Figure 3 shows an example of what the results could look like on an interactive web app for a specific year.

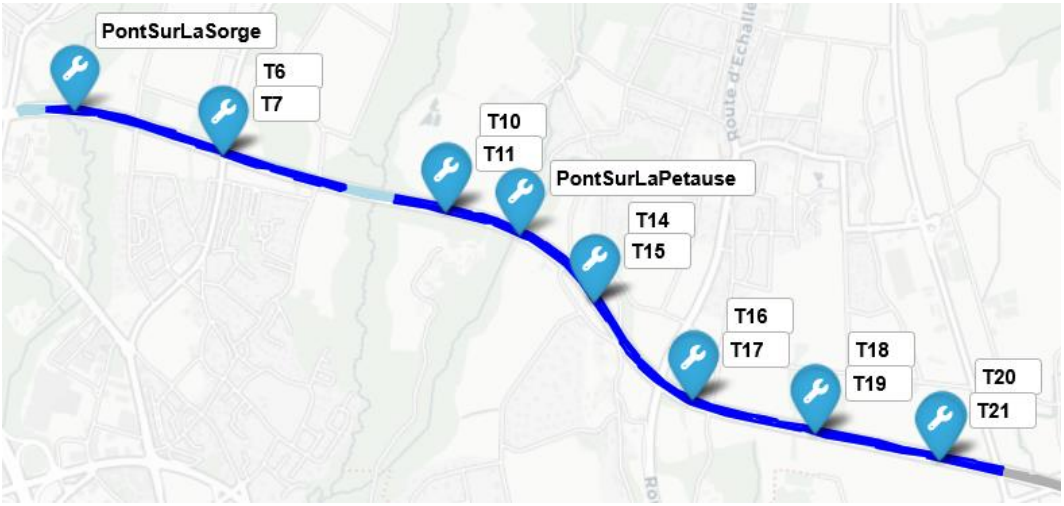


Figure 11: Bundled interventions according to the intervention program for a specific year in the future (assets in a dark color, maintenance section in a light color).

Discussion and Future Research Needs

With the development of the framework, the technical feasibility of the methods was demonstrated. The developed methods form the basis for future digital decision support tools within intervention planning process. In order to fully exploit this potential for daily use within the Management Information System for Roads and Road Traffic (MISTRA), the software integration of the methods into the specific specialist applications must be planned as a next step. For illustrative purposes, a vision was outlined showing what intervention planning on the test track could look like, taking into account the presented models and algorithms. First, the data can be used in a timely manner within visual tools such as BIM to display information, as shown in Figure 12. In this setup, the elements are color-coded based on their condition states at a selected point in time. Second, in a web application, as shown in Figure 10, all data on the estimated interventions are available, including their spatial locations. Using a filter, these can be viewed selectively. Within the same application, the view can be switched to the automatically bundled interventions (see Figure 11), for which a tabular presentation of the results is also available. Building on the developed methods and the outlined vision, future research needs arise to technologically complete the intervention planning process. Thus, it remains to be investigated how BIM can directly serve intervention planning in addition to visualization, and what role information procurement using unmanned aerial vehicles (e.g., drones) plays. Furthermore, it needs to be clarified how data can flow fully automatically into the databases and how innovative monitoring technologies that transmit real-time diagnoses can indicate necessary emergency interventions.

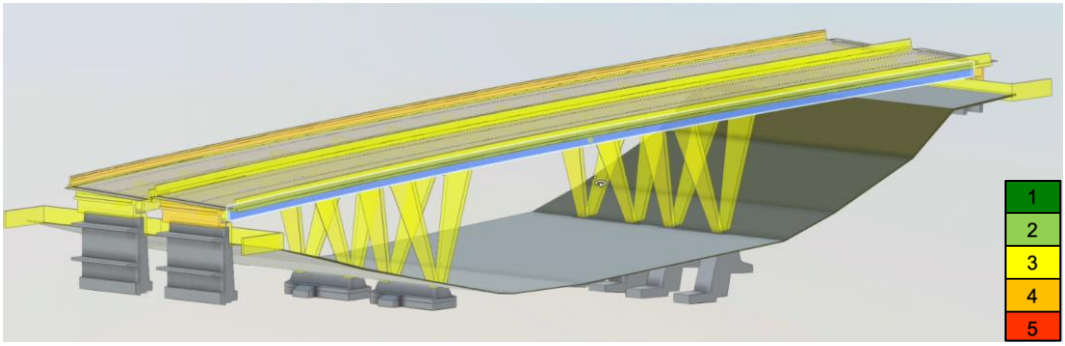


Figure 12: BIM model with the ability to display condition forecasts for various structural components (blue = selected structural element; green through red represent the colors of the ASTRA condition state definition for engineering structures).

Conclusion

The research project shows that while today's intervention planning is based on proven processes, these are often implemented inconsistently, thereby losing clarity and traceability. Standardization of workflows and support from digital tools—particularly forecasting and estimation models—can contribute significantly to determining more well-founded and long-term sustainable decisions more efficiently and effectively. Beyond the methodical developments, the work has also shown that the effectiveness of the digital solutions deployed depends heavily on the underlying planning processes. Today, intervention planning is indeed carried out according to established procedures, but there is often a lack of uniformity and consistency in implementation. Inspection reports and external condition surveys & evaluations sometimes almost take on a project-triggering character, causing long-term strategic planning to recede into the background. Digital tools and transparent forecasting models can help here to standardize workflows and make them more traceable. Algorithms for the automatic bundling of interventions can also make a significant contribution to generating various project ideas with less effort. This not only improves the quality of decisions but also enables risks and resource bottlenecks to be considered systematically and at an early stage.

Overall, the work illustrates that a more systematic intervention planning process is possible for FEDRO. However, it requires (1) further validation of the methods on real case studies, (2) embedding into existing systems such as TRA and KUBA, and (3) close alignment with practical needs. If these steps are implemented, the developed methodical approaches can make an important contribution to utilizing available resources more efficiently and effectively while sustainably ensuring the safety and availability of the national road infrastructure.

1 Einleitung

Das vorliegende Forschungsprojekt «Integrierte Planung von Unterhaltsmassnahmen auf Strassenabschnitten, die aus Anlagen unterschiedlicher Art bestehen» (MINERVA) untersucht, wie eine integrierte Planung von Unterhaltsmassnahmen für Strassenabschnitte mit unterschiedlichen Anlagen in einem weiterentwickelten Erhaltungsplanungsprozess aussehen kann.

1.1 Motivation

Die Planung von Unterhaltsmassnahmen auf der Strasseninfrastruktur wird in der Praxis vorwiegend durch den fortschreitenden Verfall ausgelöst, wobei auch andere Faktoren – wie etwa Normanpassungen – eine Rolle spielen können. Mit zunehmendem Schadensausmass sinkt die Fähigkeit der Infrastruktur, die geforderten Leistungsanforderungen zu erfüllen. Daher ist ein vorausschauendes Handeln erforderlich, um sicherzustellen, dass das geforderte Leistungsniveau nicht unterschritten wird (Adey, 2019). Im ASTRA übernimmt die Erhaltungsplanung[1] diese Aufgabe. Während der gesamten Nutzungsdauer einer Anlage ist die Erhaltungsplanung verantwortlich für die systematische Planung der notwendigen Unterhaltsmassnahmen. Eine Instandsetzung oder Erneuerung eines Strassenabschnitts wird oftmals dadurch angestossen, dass zunächst Unterhaltsmassnahmen für einzelne Anlagen festgelegt werden. Anschliessend wird entschieden, ob und in welchem Umfang weitere Anlagen in ein gemeinsames Erhaltungsprojekt gebündelt werden.

Der gesetzliche Auftrag für die Erhaltungsplanung im ASTRA bildet unter anderem das «Bundesgesetz vom 8. März 1960 über die Nationalstrassen (NSG)», in dem Art. 49 die Grundsätze für den Unterhalt und Betrieb der Nationalstrasseninfrastruktur festlegt (Bundesgesetz über die Nationalstrassen (NSG), 1960):
Art. 49 I. Unterhalt und Betrieb 1. Grundsatz
Die Nationalstrassen und ihre technischen Einrichtungen sind nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten so zu unterhalten und zu betreiben, dass ein sicherer und flüssiger Verkehr gewährleistet ist und die Verfügbarkeit der Strasse möglichst uneingeschränkt bleibt.

Der Prozess der Erhaltungsplanung ist somit im Sinne der Vorgaben von Art. 49 I. zu gestalten. Im ASTRA besteht jedoch die Herausforderung, Daten und dazu geeignete Modelle zur Entscheidungsunterstützung konsequent anzuwenden. Dies betrifft spezifisch die Zustandsdaten, die zwar erhoben und in die Datenbanken eingetragen werden, aber oft nicht weiter für Abschätzungen zukünftiger Zustände, Prognosen sowie die Bündelung von Massnahmen genutzt werden, obwohl diese Möglichkeit für Brükken für die Massnahmenprognose in der Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel (KUBA) grundsätzlich besteht (ASTRA, 2021a, 2024c). Die durchgeführten

[1] Gemäss der «Erhaltungsmanagement: Grundnorm» (VSS, 2022) umfasst die Erhaltungsplanung auch Veränderungsmassnahmen, welche die ursprüngliche, geplante Funktionalität verändern. Die in diesem Bericht besprochenen Massnahmen beziehen sich jedoch immer nur auf den baulichen Unterhalt bzw. auf Unterhaltsmassnahmen innerhalb der Erhaltungsplanung, auch wenn der Begriff «Erhalt» verwendet wird.

Inspektionen und Zustandserfassungen weisen zudem Datenlücken auf, d. h., der aktuelle Zustand ist zum Planungszeitpunkt nicht immer vollständig bekannt und muss daher für die weitere Verwendung in der Massnahmenprognose abgeschätzt werden.

Fortschritte in der Forschung legen nahe, dass digitale Hilfsmittel und der Gebrauch von Datenmodellen im Bereich der Zustandsabschätzung, der Massnahmenprognose und der Massnahmenbündelung den Prozess der Erhaltungsplanung noch effektiver und effizienter gestalten können. Effektiv in dem Sinne, dass sie dabei unterstützen, die «richtigen» Massnahmen zu bestimmen, und effizient in dem Sinne, dass Entscheidungen ressourcenschonend getroffen werden können.

Basierend auf dieser Ausgangslage und den identifizierten Herausforderungen werden im nachfolgenden Kapitel die Ziele des Forschungsprojekts formuliert.

1.2 Ziele des Forschungsprojekts

Das Gesamtziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines methodischen Rahmenwerks zur Entscheidungsunterstützung in der Planung, Priorisierung und optimalen Bündelung von Unterhaltsmassnahmen. Dazu wird der Erhaltungsplanungsprozess im ASTRA dokumentiert und beschrieben, um sicherzustellen, dass die entwickelten Methoden in den Prozess integriert werden können und bestmöglich eine Steigerung der Effektivität sowie der Effizienz bewirken. Konkret geht es um die Berechnung und Darstellung von Informationen, die für die Inspektion bzw. Zustandserfassung und -bewertung sowie die Definition des Handlungsbedarfs hilfreich sind. Ebenfalls soll die Verwendung von Methoden vorgestellt werden, die konsistente und transparente Analysen als Grundlage für Entscheidungen bezüglich Unterhaltsmassnahmen ermöglichen, auf Basis vergleichbarer aktueller Zustände sowie Abschätzungen für den zukünftigen Zustand. So können Methoden verwendet werden, welche die Massnahmen rechtzeitig prognostizieren. Darauf aufbauend soll ein konsistenter Überblick und die Verwendung eines Algorithmus zur optimalen Bündelung von Unterhaltsmassnahmen vorgestellt werden. Damit der Nutzen von den Methoden an einem realen Beispiel gezeigt werden kann, werden die Methoden mit Daten einer Testrecke validiert und demonstriert. Diese erstreckt sich vom Autobahnkreuz Villars-Sainte-Croix bis zur Ortschaft Rennaz (Achssegment der N9). Da sich die Strecke vorwiegend in einer Hanglage befindet und viele kleine Täler überquert sowie durch diverse Hügel führt, gibt es entsprechend viele Bauanlagen und -werke, die diese Hindernisse in Form von Brücken überqueren bzw. in Form von Tunneln durchqueren.

Die dazu beitragenden Teilziele sind die Entwicklung von Methoden für die Anlagetypen Brücken und Trassee zur:

- **Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Infrastrukturzuständen**
  Die aus Inspektionen bzw. Zustandserfassungen gewonnenen Daten zum Zustand sollen mit einer geeigneten Methodik vervollständigt werden, d. h., es sollen systematisch Informationen zum aktuellen Zustand ergänzt werden, wo diese fehlen. Unter Berücksichtigung der bereits im ASTRA vorhandenen Zustandsverfallsberechnungen sollen neue oder erweiterte Modelle zur Abschätzung der zukünftigen Zustände einer Anlage vorgestellt werden.

- **Prognose von Unterhaltsmassnahmen**
  Mithilfe der Abschätzung der gegenwärtigen und zukünftigen Zustandsdaten sollen unter Berücksichtigung der vorgegebenen Unterhaltsmassnahmenstrategien Prognosen über die zu erwartenden Unterhaltsmassnahmen erstellt und eine Priorisierung ermöglicht werden. Die Priorisierung dient als Entscheidungsstütze für den Fall, dass nach der Prognose von Unterhaltsmassnahmen vertiefte Untersuchungen aufgrund von Ressourcenknappheit verschoben werden müssen.
- **Automatische Bündelung von Massnahmen**
  Bei der gemeinsamen Ausführung profitieren Anlagen unterschiedlicher Art von den Abhängigkeiten, die sie zueinander haben. Diese sollten bei der Erstellung eines Massnahmenprogramms berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wird ein Algorithmus vorgeschlagen, mit dem sich ein optimiertes Massnahmenprogramm ermitteln lässt, das ökonomische und funktionale Abhängigkeiten berücksichtigt.

1.3 Aufbau des Forschungsberichts

Die Analyse des Erhaltungsplanungsprozesses im ASTRA bildet die Ausgangslage für diesen Bericht und wird in Kapitel 2 aufgezeigt. Dabei wird der aktuelle Prozess so beschrieben, wie er nach dem Verständnis der Autoren, nach Gesprächen mit beteiligten Akteuren, tatsächlich umgesetzt wird. Der Prozess bildet die Erhaltungsplanung von Kunstbauten und dem Trassee ab, nicht aber von der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA). Grundlage der Analyse bilden einerseits eine grafische Darstellung in Form eines BPMN-2.0-Diagramms (OMG, 2014), andererseits eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Prozessschritte. Ziel ist es, ein umfassendes Verständnis für den bestehenden Erhaltungsplanungsprozess zu schaffen und aufzuzeigen, wie dieser weiter verbessert werden kann – im Sinne der gesetzlichen Vorgaben. Dabei sollen insbesondere die Arbeitsschritte identifiziert werden, die durch digitale Hilfsmittel in der integrierten Planung von Unterhaltsmassnahmen für Strassenabschnitte mit unterschiedlichen Anlagen unterstützt werden können. Nur wenn klar ist, wie der Prozess aktuell abläuft, welche Hilfsmittel bereits verwendet werden und wo Schwachstellen bestehen, lassen sich gezielt neue oder verbesserte Hilfsmittel und Algorithmen entwickeln. Entscheidend ist zudem, frühzeitig zu berücksichtigen, an welchen Stellen diese Hilfsmittel in den bestehenden Prozess eingebettet werden können, um ein späteres Scheitern der praktischen Anwendung zu vermeiden.

Die in Kapitel 3 beschriebene Teststrecke N9 zwischen Villars-Sainte-Croix und Rennaz dient jeweils zur Veranschaulichung der jeweiligen Methode. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Hilfsmittel und Algorithmen werden zunächst in Kapitel 4 in einer übersichtlichen Zusammenfassung und in den Kapiteln 5 bis 7 detailliert vorgestellt. Zur Kontextualisierung der jeweiligen Methoden werden an verschiedenen Stellen zusätzliche Hintergründe erläutert, um Unterschiede zur bisherigen Praxis des ASTRA klar hervorzuheben und die Relevanz der Methoden nachvollziehbar zu machen.

Im Schlussteil des Berichts werden die Methoden in Kapitel 8 demonstriert und in Kapitel 9 umfassend diskutiert. Kapitel 10 enthält eine Darstellung der Umsetzung und des Forschungsbedarfs, während Kapitel 11 die Schlussfolgerungen umfasst.

In den Fachbereichen des ASTRA, in Normen sowie im allgemeinen und unterhaltsspezifischen Sprachgebrauch werden dieselben Begriffe häufig unterschiedlich verwendet, was zu Missverständnissen führen kann. Um eine konsistente Terminologie sicherzustellen, enthält Kapitel 1.4 eine umfassende Übersicht der verwendeten Begriffe. Dabei wird jeweils erläutert, ob es sich um eine standardisierte Definition oder eine von den Autoren festgelegte Definition handelt. Die Begriffe werden ausführlich erklärt, um ein einheitliches Verständnis zu fördern und die Lesbarkeit der nachfolgenden Kapitel zu unterstützen.

1.4 Terminologie

Eine einheitliche Definition zentraler Begriffe ist Voraussetzung für das Verständnis und die Einordnung in den fachlichen Kontext. Da sich diese Arbeit mit den Prozessen und Methoden des ASTRA beschäftigt, wird der dort bestehenden Terminologie gefolgt, basierend auf den Richtlinien, Fachhandbüchern, IT-Dokumentationen und weiteren Dokumenten. Darüber hinaus werden zusätzliche Begriffe eingeführt, die im ASTRA-Kontext so nicht existieren. Damit wird eine gemeinsame begriffliche Grundlage geschaffen für diesen Bericht.

1.4.1 Begriffe der Infrastrukturabstraktion

Achse

Im ASTRA ist die Achse des räumlichen Basis-Bezugssystems (RBBS) die Längsachse des linearen Verlaufs einer Strasse. Jede Achse hat einen Identifikationsschlüssel mit folgenden drei Elemente:

- Schlüsseleigentümer z.B. «CH»
- Achsnummer z.B. «N9»
- Lagecode d.h. «+», «-» oder «=»

Ein Beispiel für eine Achsenbezeichnung ist «CH:N9+», die nach dem Schema [Schlüsseleigentümer]:[Achsnummer][Lagecode] geschrieben ist. Da jede Achse eine Richtung hat und bei richtungsgetrennten Fahrbahnen je eine Achse definiert ist, bedeutet der Lagecode «+», dass die Fahrtrichtung mit der Achsenrichtung übereinstimmt. «=» ist entsprechend der Lagecode für nicht richtungsgetrennte Fahrbahnen (ASTRA, 2017b).

Achssegment

Jede Achse kann unterbrochen werden und im Raum an einem anderen Ort weitergeführt werden. Aus diesem Grund besteht eine Achse aus Achssegmenten, die kontinuierlich sind und ein Segmentanfang- und ende haben (ASTRA, 2017b).

Bezugspunkt, U-Distanz, Querabstand

Die Lage eines Objekts (punktförmig, linienförmig oder flächig) auf einer RBBS-Achse wird mit Bezugspunkten, U-Distanzen und Querabständen beschrieben. Ein Punkt auf der Achse ist eindeutig bestimmt durch den zuletzt definierten

Bezugspunkt in Achsrichtung, die gemessene U-Distanz zu diesem Punkt sowie den orthogonalen Querabstand von der Achse (ASTRA, 2024b).

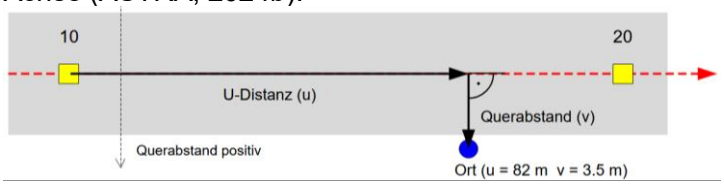


Abbildung 13: Bezug eines Objekts zum RBBS (ASTRA, 2024b).

Trassee

Der Begriff «Trassee» ist im ASTRA sehr umfassend und beinhaltet neben der Fahrbahn beispielsweise auch Rückhaltesysteme, Kleinbauwerke und Entwässerung. Obwohl die Prognose von Unterhaltsmassnahmen nur von dem Fahrbahnzustand abgeleitet wird, sind oft mehr Anlagearten aus dem Trassee betroffen. Deshalb wurde der Begriff auch im Zusammenhang mit der Zustandsabschätzung und der Prognose von Unterhaltsmassnahmen angewendet und folgt nicht strikt der Nutzung im ASTRA.

Anlage

Die Anlage bezeichnet in diesem Forschungsbericht ein Infrastrukturobjekt oder das Trassee beziehungsweise ein Teilstück davon. Da die im ASTRA verwendete Terminologie zwischen Kunstbauten und Trassee stark variiert, wird dieser umfassende Begriff eingeführt.

Infrastrukturobjekt

Ist eine allgemeine Bezeichnung für alle geometrisch abgrenzbaren Objekte bei Kunstbauten. Infrastrukturobjekte können sich in der hierarchischen Bauwerksstruktur auf einer anderen Ebene befinden und unterscheiden sich durch die möglichen Infrastrukturobjekttypen (ASTRA, 2012).

Bauanlage	Auf der obersten Hierarchiestufe. Eine Bauanlage fasst mehrere Bauwerke zu einer Einheit zusammen.
Bauwerk	Ein komplettes, klar abgrenzbares Infrastrukturbauwerk.
Baueinheit	Fassen mehrere Bauwerksteile zu einer Einheit zusammen.
Bauwerksteil	Einzelne, nicht weiter unterteilbare Elemente des Bauwerks.
Oberflächenschutz	Bilden den Oberflächenschutz eines Bauwerkteils ab.

Hinweis: Wenn nicht notwendig, wird darauf verzichtet, die Brücke oder den Tunnel hinsichtlich des Typs zu spezifizieren, also die Unterscheidung zwischen einer Anlage und einem Bauwerk zu treffen.

Bauwerksstruktur	Unterteilt ein Bauwerk in abgrenzbare Bestandteile. Beispielsweise könnte eine Bauwerkstruktur für Brücken in der minimalen Form zwischen Bauwerk, Bauwerksteilen und Oberflächenschutz unterscheiden (ASTRA, 2012).
Infrastruktur-objekttyp	Ist das Unterscheidungsmerkmal der Infrastrukturobjekte. Der Infrastrukturobjekttyp gibt zudem vor, welche Daten erfasst werden können. Beispiele für Infrastrukturobjekttypen auf der Ebene der Bauwerksteile sind: Widerlager mit Kontrollgang, Einzelstütze, Kastenträger, Fachwerkträger, Topflager und Fahrbahnübergang mit Fingerverschluss (ASTRA, 2012).
Kostenbestimmende Infrastrukturobjekte	Definition in (ASTRA, 2012): «Kostenbestimmend sind jene Infrastrukturobjekte, die einen eigenständigen und wesentlichen Beitrag zu den Kosten der Bauwerkserhaltung liefern und für den Betrieb eines Managementwerkzeugs unabdingbar sind. Damit ein Infrastrukturobjekt kostenbestimmend ist, muss dies neben einem bestimmten Infrastrukturobjekttyp ebenfalls eine bestimmte Bauart aufweisen.»
Bauwerksteiltyp	Wiedergibt das Unterscheidungsmerkmal des Bauwerksteils. Es ist der Infrastrukturobjekttyp für Bauwerksteile. Beispiel sind: Widerlager mit Kontrollgang, Einzelstütze, Kastenträger, Fachwerkträger, Topflager und Fahrbahnübergang mit Fingerverschluss (ASTRA, 2012).
Bauart	Gibt Auskunft über das Konstruktionsmerkmal oder Konstruktionsart. Beispiele sind: Betonkonstruktion, Stahlbetonkonstruktion, Spannbetonkonstruktion, Stahlkonstruktion, Verbundkonstruktion aber auch Stahllager, Mauerwerk, Asphaltmischgut etc. (ASTRA, 2012).
Generalisierter Bauwerksteiltyp	Ähnliche kostenbestimmende Bauwerksteiltypen, die zu generalisierten Bauwerksteiltypen gebündelt werden. In KUBA-MS gibt es 18 solcher generalisierter Bauwerksteiltypen. Sie wurden in der Erhaltungsplanung als kostenbestimmend identifiziert, da sie 80% der Unterhaltskosten verursachen. Alle sind nachfolgend aufgelistet mit der entsprechenden Nummer, die ASTRA Intern dafür verwendet (ASTRA, 2021a).

5 Widerlager
7 Stützmauer, Flügelmauer
9 Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben
10 Wand, Scheibe
11 Vollwandträger

12	Kastenträger
13	Fachwerkträger
14	Fahrbahnplatte
15	Decke
16	Randborde, Brüstung
18	Lager, Gelenke
19	Fahrbahnübergang
20	Rahmen
22	Bogen, Gewölbe
23	Abdichtung
24	Belag
25	Leitschranke, Geländer
28	Rohr, Bachdurchlass

1.4.2 Begriffe der Inspektion, Abschätzung und Prognose

Planungsperiode

Der Begriff Planungsperiode wird eingeführt, um die fest definierte und sich wiederholende Zeitspanne zu bezeichnen, für welche Unterhaltsmassnahmen prognostiziert und geplant werden. Sie entspricht der im Anwendungshandbuch KUBA-MS (ASTRA, 2021a) verwendeten Periode. Das ASTRA strukturiert seine Planung ebenfalls anhand zukünftiger Zeiträume, nämlich in eine langfristige (30 Jahre) und mittelfristige (10–20 Jahre) Planung sowie in die Projektgenerierung (5–10 Jahre) (ASTRA, 2016). Für diese Arbeit wird eine Periodendauer p von 5 Jahren verwendet, orientiert an den Inspektionszyklen für Brücken.

Zustandsmerkmale

Der Zustand einer Fahrbahn mit einem dichten Belag wird in der Schweiz und auch im ASTRA über verschiedene Zustandsmerkmale beschrieben. Die resultierenden Noten aus den Messungen, werden auf einer Bewertungsskala von 0 bis 5 beschrieben. Diese Skala hat auch einen Farbcode. Die angegebenen Notenbereiche werden im ASTRA in Relation zu den fünf Zustandsklassen von Kunstbauten gesetzt. Dies dient ausschliesslich dem Zweck, einen Vergleich zwischen den verschiedenen Anlagenarten zu ermöglichen (ASTRA, 2024f):

Note	Kurzbeschrieb	Zustandsklasse
[0,1)	**Guter** Zustand	1
[1,2)	**Mittlerer** Zustand	2
[2,3)	**Ausreichender** Zustand	3
[3,4)	**Kritischer** Zustand	4
[4,5]	**Schlechter** Zustand	5

Die in diesem Bericht verwendeten Zustandsmerkmale und die entsprechenden Zustandsindizes sind die folgenden:

Oberflächenschäden	**I0**
Ebenheit in Längsrichtung	**I2**
Ebenheit in Querrichtung	**I3**
Griffigkeit	**I4**

Die Zustandsmerkmale I2, I3 und I4 beschreiben jeweils einzelne Eigenschaften der Fahrbahn. Der Index I0 umfasst demgegenüber eine Vielzahl unterschiedlicher Oberflächenschäden. Detaillierte Erläuterungen zu den einzelnen Zustandsmerkmalen sowie dem nicht erwähnte I5 können der SN 640 925b «Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF): Zustandserhebung und Indexbewertung» entnommen werden (VSS, 2019a). Für semidichte (SDA) und offenporige Beläge (PA), die nicht betrachtet werden, sind zudem oft andere Indikatoren für die Erhaltungsplanung relevant, wie beispielsweise Nahfeldmessmethoden von Geräuschen (ISO, 2019).

Bewertungsflächen

Für die Bewertung des Zustands wird das Trassee in Bewertungsflächen (eigene Begriffswahl) eingeteilt, was den Flächigen Objekten entspricht, die das ASTRA zur Angabe der Zustandsmerkmale verwendet. Zur einfachen Definition jeder einzelnen Fläche wird das RBBS herangezogen. Der Anfang und das Ende einer Bewertungsfläche sind in Längsrichtung über eine Achse, einen Bezugspunkt und eine U-Distanz definiert. In Querrichtung werden die Bewertungsflächen für eine Fahrspur mittels des Randabstands zur Achse definiert. Zur Unterscheidung der Fahrspuren wird jeweils der Abstand des linken Rands zur Achse in Achsenrichtung angegeben. Die Randabstände in negativer Achsrichtung haben ein negatives Vorzeichen (ASTRA, 2024b). Abbildung 14 veranschaulicht die Bewertungsflächen. In der Abbildung ist die grau hinterlegte Bewertungsfläche mit der Achse CH:N9+, dem Bezugspunkt 1070 sowie den U-Distanzen 300 m und 400 m für Anfang und Ende in Längsrichtung definiert. In Querrichtung beträgt der linke Randabstand 0 m.

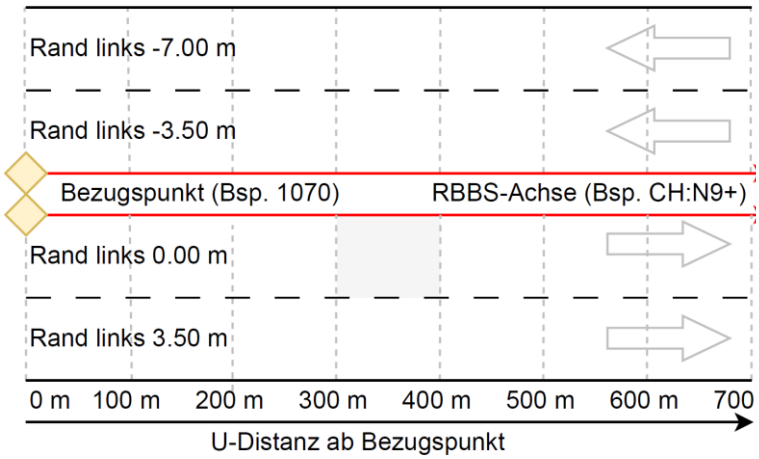


Abbildung 14: Illustrative Darstellung zu Aufbau und Verwendung der Zustandsdaten in der Methodik.

Nutzungsdauer

Die erwartete Nutzungsdauer bezieht sich auf die Dauer, auf welche das Bauwerksteil ausgelegt ist bei ordnungsgemässer Nutzung und Instandhaltung eine gewisse Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten. Nach dieser Dauer seit dem Bau wird ein Ersatz oder zumindest eine Instandsetzung erwartet, was aber nur ein Anhaltspunkt ist und in jedem Fall vom tatsächlichen Zustand abhängig ist. Entsprechend kann diese erwartete Nutzungsdauer von der tatsächlichen abweichen. Die Verwendung geschieht im Bewusstsein, dass auch dieser Begriff eine ambivalente Bedeutung haben kann, bspw. wenn die Nutzungsart ändert.

Zustandsklassen

Der Zustand von Kunstbauten wird anhand einer diskreten Skala angeben. Diese hat einen Farbcode. Diese geht von 1 bis 5 (mit Spezialfällen 9, 91 und 92) und gibt Auskunft über den Zustand eines Infrastrukturobjekts. Dabei ist die Bedeutung wie folgt:

1	in **gutem** Zustand	keine/geringfügige Schäden
2	in **annehmbarem** Zustand	unbedeutende Schäden
3	in **schadhaftem** Zustand	bedeutende Schäden
4	in **schlechtem** Zustand	grosse Schäden
5	in **alarmierendem** Zustand	Die Sicherheit ist gefährdet; Massnahmen sind vor der nächsten Hauptinspektion erforderlich; dringliche Massnahme

Die Zustandsklassen 9, 91 und 92 bedeuten: Zustand nicht überprüfbar, Gefährdung unwahrscheinlich und Gefährdung wahrscheinlich (ASTRA, 2012).

Die Zustandsklasse wird für alle zugänglichen Bauwerksteile einer Brücke alle 5 Jahre in einer Begehung bestimmt. Zustandsklassen werden definiert für einen Schadensprozess, falls mehrere präsent sind oder das Bauwerksteil inhomogen verfällt, kann eine Segmentierung vorgenommen werden. Der «Leitfaden für Inspektoren von Kunstbauten» definiert ausführlich für jeden Schadensprozess, ab welchem Schadensbild ein Bauwerksteil einer bestimmten Zustandsklasse zugeordnet wird (ASTRA, 2021b).

Hinweis: Die Segmentierung ist ein sinnvolles Mittel, um unterschiedliche Schadensprozesse an einem Bauwerksteil erfassen zu können. Für die Demonstration der Methodik in diesem Bericht wird jedoch auf die Berücksichtigung der Segmentierung verzichtet, da dies eine unnötige Komplexität in das Forschungsprojekt bringen würde. Die Funktionsfähigkeit der Methodik ist jedoch auch mit der Segmentierung gewährleistet.

Schadensprozess

Der Schadensprozesse wird bei KUBA-MS genutzt, um den Verfall zu modellieren, wobei neun Schadensprozesse definiert sind:

10 Korrosion im Stahlbeton (und Spannbeton)
20 Frostschäden am Beton
30 Schäden am Beton infolge Ausspülung
40 Korrosion am Baustahl
50 Schäden am Mauerwerk
60 Schäden an Fahrbahnübergängen
70 Schäden an Brückenlagern
80 Schäden am Belag
90 Schäden an der Abdichtung

Die Schadensprozesse sind abhängig von der Bauart bzw. bei Sonderteilen vom Bauwerksteiltyp. Ein Bauwerksteil hat immer einen Default oder primären Schadensprozess, kann aber auch einem anderen validen zugeordnet werden (ASTRA, 2021a). Im Anhang «Unterhaltsmassnahmen: Einheitskosten und Erfolgsvektor» sind die Einheitskosten und Erfolgsvektoren für die Unterhalsmassnahmen eines zugehörigen Schadensprozesses aufgelistet.

Verfallsmatrix

Die Verfallsmatrix beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauwerksteil in einem bestimmten Zustand verweilt, sowie die Wahrscheinlichkeit, dass es in den

nächstschlechteren Zustand übergeht. Somit wird der tatsächlich vorgehende Schadensprozess abstrahiert (ASTRA, 2021a).

Hinweis: In KUBA-MS kann durch einen sogenannten Einfluss, auch eine noch schnellere oder eine langsamere Zustandsentwicklungen simuliert werden. In diesem Bericht wird aber ausschliesslich mit dem Einfluss “neutral” gerechnet.

Erfolgsvektor

Erfolgsvektoren erfassen die Wirksamkeit einer Unterhaltsmassnahme bei der Schadensbeseitigung. Er enthält die Wahrscheinlichkeit, dass das Bauwerksteil nach Durchführung einer Unterhaltsmassnahme wieder in den Zustand 1 oder 2 (ASTRA, 2021a) überführt wird. Die in diesem Bericht betrachteten Unterhaltsmassnahmen und ihre Erfolgsvektoren sind in Anhang «Unterhaltsmassnahmen: Einheitskosten und Erfolgsvektor» aufgelistet.

Unterhaltspolitiksatz/ Massnahmenstrategie

Die Massnahmenstrategie gibt vor, ab welchem Zustand ein Bauwerksteil eine Massnahme erfahren soll. Die Massnahmenstrategie kann durch Experten, Kostenoptimierung oder durch den Benutzer vorgeben werden.

1.5 Daten und Disclaimer

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Daten, die aus den Methodiken hervorgehenden Resultate bzw. Ergebnisse sind im «MINERVA-Datensatz» zusammengeführt und beschrieben. Dieser kann innerhalb des vorgeschriebenen Aufbewahrungszeitraums mit Einverständnis des Bundesamtes für Strassen bei der Forschungsstelle bezogen werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Art der Datengrundlagen und den Zeitpunkt ihres Bezugs.

Übersicht Datenerhebung

Art der Daten	Bezugsdatum
Brückenanlagen und -bauwerke	23.04.2024
Brückenbauwerksteile	28.05.2024
Tunnelanlagen und -bauwerke	29.09.2025
Tunnelbauwerksteile	21.10.2025
Trassee	12.05.2025

Tabelle 1: Übersicht der Datenerhebung mit Bezugsdatum und Referenz.

Zu beachten ist, dass die Genauigkeit der Ergebnisse von der Berechnungsmethode sowie den Inputdaten abhängt. Der Algorithmus, die zugrunde liegenden Daten des ASTRA und die jeweiligen Methoden zur Vervollständigung der Datenlücken können

ausdrücklich nur Ergebnisse liefern, die als Entscheidungshilfe für die Einleitung weiterer Schritte dienen. Es gibt auch diverse Brücken, die erst nach der Datenerhebung und -auswertung die neueste Inspektion hatten, sodass für gewisse Bauwerke Zustandsdaten aus dem Jahr 2019 verwendet wurden. Ein spezifischer Fall, in dem dies eine Rolle spielt, ist das *«Viaduc de Chillon»*. Dieses wurde im Juli 2024 im Zustand besser bewertet als im Jahr 2019, weshalb bei dieser Brücke speziell darauf zu achten ist, dass die Ergebnisse nicht mit der aktuellen Zustandseinschätzung übereinstimmen.

2 Der aktuelle Erhaltungs-planungsprozess

2.1 Ausgangslage

In diesem Kapitel wird der aktuelle Erhaltungsplanungsprozess beim ASTRA beschrieben, mit dem Ziel, die Umsetzung der Prozessschritte und der damit verbundenen Entscheidungen nachvollziehbar darzustellen. Die Analyse bildet die Grundlage der Forschungsarbeit, um die Herausforderungen in der Erhaltungsplanung zu verstehen und darauf basierend die Ziele des Forschungsprojekts MINERVA abzuleiten.

Das ASTRA ist in fünf Filialen sowie eine Zentrale unterteilt (Abbildung 15). Im Bereich des Erhaltungsmanagements sind die Aufgaben unterschiedlich aufgeteilt. In der Zentrale des ASTRA werden strategische Entscheidungen gefällt und Standards, sowie Richtlinien erarbeitet. Für Trassee und Kunstbauten unterliegt dies der Abteilung N Strassennetze, genauer dem Bereich Standards und Sicherheit der Infrastruktur SSI. Die fünf Filialen, mit ihren Bereichen Erhaltungsplanung, sind für die Durchführung dieser verantwortlich. Eine Koordination der Filialen in der Erhaltungsplanung erfolgt im Bereich Erhaltungsplanung Zentrale in regelmässigen Führungsrapporten (ASTRA, 2016). Weil die verschiedenen Filialen die Erhaltungsplanung eigenständig in ihrem Netzbereich verantworten, können die Prozesse für die Erhaltungsplanung und deren Umsetzung entsprechend unterschiedlich sein. Da sich die Teststrecke des Projekts MINERVA im Zuständigkeitsbereich der Filiale Estavayer-le-lac (kurz: Filiale 1) befindet, wurde die Prozessbeschreibung dieses Kapitels in Zweifelsfällen in Abstimmung mit dem Team in Estavayer-le-Lac erarbeitet.

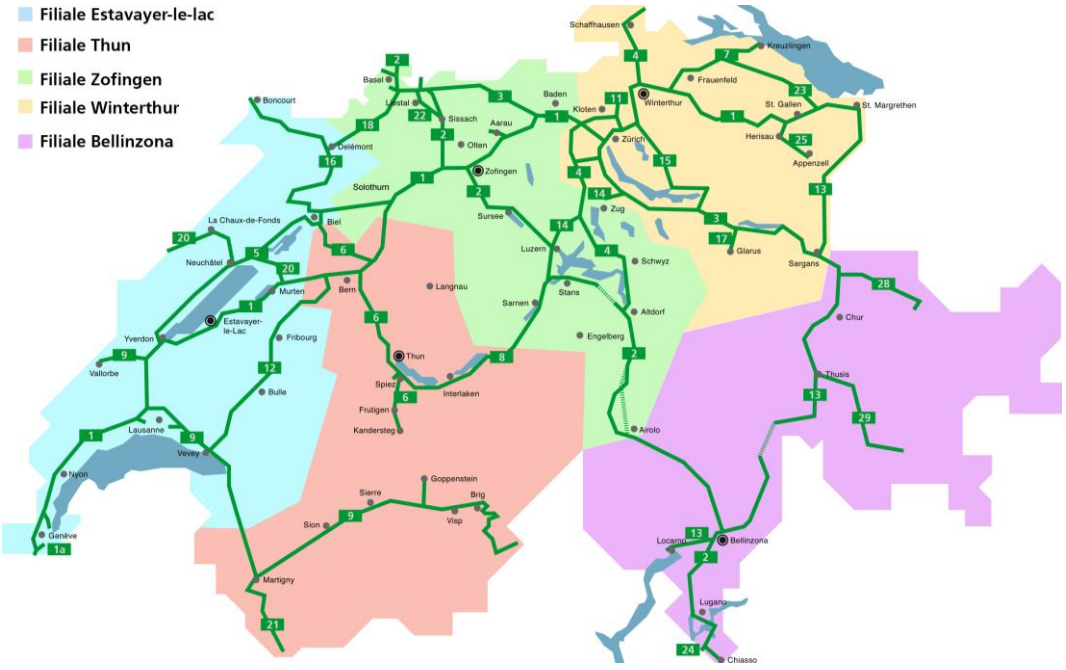


Abbildung 15: Das Schweizer Nationalstrassennetz mit den Filialen des ASTRA (ASTRA, o. J. [a]).

2.2 Methodik

Dieses Kapitel wurde anhand öffentlicher sowie interner Dokumente zur Erhaltungsplanung erarbeitet. Die in diesem Kapitel dokumentierten Informationen wurden hauptsächlich aus dem ASTRA-Handbuch «Erhaltungsplanung – Arbeitsprozesse und Produkte» (ASTRA, 2016) und den Prozessen aus dem Prozessportal oder von Filiale 4 (ASTRA, 2021j, 2021k, 2021i, 2021d, 2021c, 2021e, 2021g, 2021f, 2021h) entnommen. Wichtigen und entscheidenden Einfluss hatten Gespräche mit Personen, welche die Erhaltungsplanungsprozesse bei ASTRA gut kennen. Anhand der ersten Entwürfe des Prozessdiagramms wurden deshalb Gespräche mit involvierten Personen aus der Filiale 1 in Estavayer-le-Lac geführt. Diese Gespräche konnten wichtige Einblicke in die aktuelle Umsetzung der Erhaltungsplanung geben.
Das Prozessdiagramm wurde mit der Modellierungssprache BPMN 2.0 (OMG, 2014) im Onlineeditor von Signavio (SAP, 2021) erstellt. BPMN 2.0 ermöglicht es mit Hilfe von sogenannten «Swimlanes» die Zuständigkeiten zu definieren, respektive verantwortliche Positionen zuzuweisen. In diesem Prozessdiagramm wurde eine «Swimlane» verwendet, welche «Übergeordnete Entscheidungssitzungen» heisst und für jeden unterschiedlichen Prozessschritt anders zusammengesetzt sein kann. Die Verantwortlichen für diese Sitzung, respektive die Zusammensetzung ist in der Beschreibung der Prozessschritte angegeben.
Die einzelnen Prozessschritte, welche sich durch die Unterlagen und Gespräche hervorgehoben haben, werden in diesem Kapitel anhand der folgenden Beschreibungskategorien (Tabelle 2) ausführlicher erklärt. Bei der Beschreibung des Prozesses wurde ein besonderer Fokus auf die verwendeten Hilfsmittel gelegt, um herauszufinden, wie und wo der Prozess bereits unterstützt wird. Für die Verwaltung der Daten der unterschiedlichen Fachbereiche gibt es bereits Fachapplikationen (z.B. KUBA für Kunstbauten oder TRA für Trassee).

Beschreibungskategorien der Prozessschritte

Kategorie	Erklärung
Beschreibung	Ist die Beschreibung der Prozessschritte und was diese jeweils bein-halten, respektive wie diese ausgeführt werden.
Verantwortlich	Gibt die Person, respektive Position an, welche für die Erledigung des Prozessschrittes verantwortlich ist. Es kann in gewissen Fällen auch die beteiligten Personen bezeichnen.
Input	Inputs, welche für die Erledigung beigezogen, respektive berücksichtigt werden.
Hilfsmittel	Software oder Vorlage die genutzt wird für die Erledigung der Aufgabe.
Output	Dokumente welche aus dem Prozessschritt resultieren. Wenn der Name des Prozessschrittes das Resultat schon klar macht, wurde zum Teil darauf verzichtet.
Betrachtungszeitraum	Beschreibt die zeitliche Eingliederung in den Prozess.

Tabelle 2: Beschreibungskategorien für die Prozessschritte.

2.3 Prozessbeschreibung

Die folgende Beschreibung des aktuellen Prozesses für die Erhaltungsplanung ist für die Lesbarkeit in Ausschnitte des Prozessdiagrammes gegliedert worden. Diese Gliederung ist vereinfacht in Abbildung 16 dargestellt. Das detaillierte Prozessdiagramm ist im Anhang zu finden. In den Überschriften sind die Ausschnitte inhaltlich zusammengefasst. Diese Gliederung ist keine offizielle Unterteilung des Prozesses.

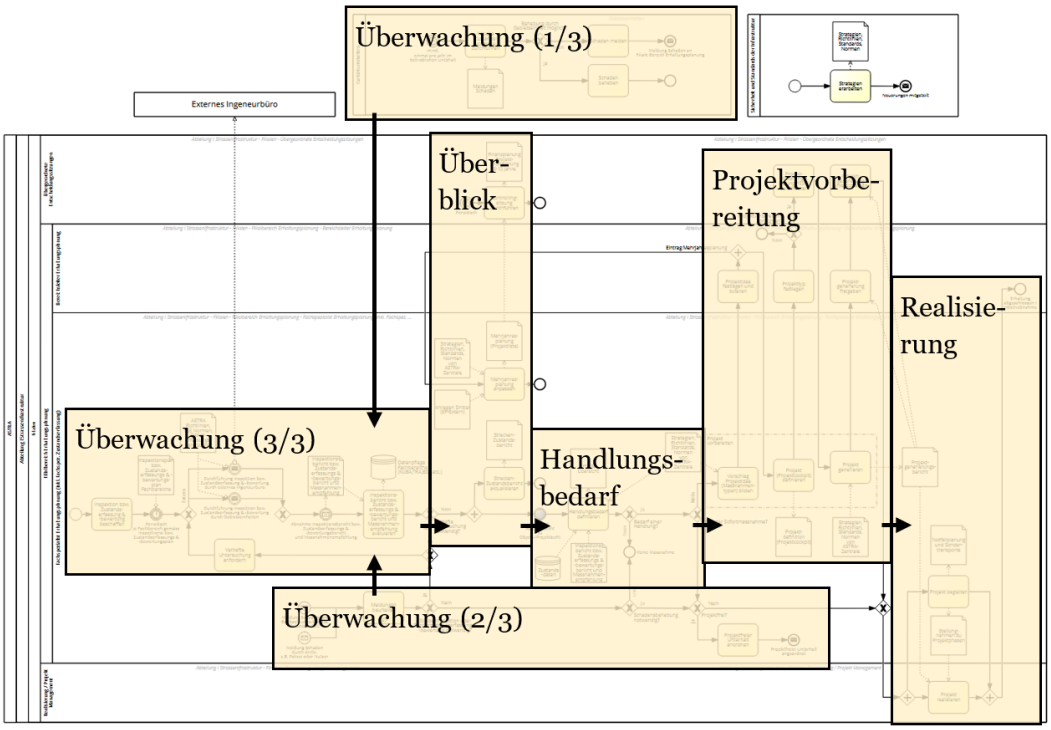


Abbildung 16: Überblick des gesamten Prozessdiagrammes mit der verwendeten Gliederung (Grossformat im Anhang, Abbildung 123).

2.3.1 Überwachung

In diesem Unterkapitel sind die Prozessschritte beschrieben, welche in der Gliederung von Abbildung 16 dem Ausschnitt Überwachung zugeordnet werden (Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19).

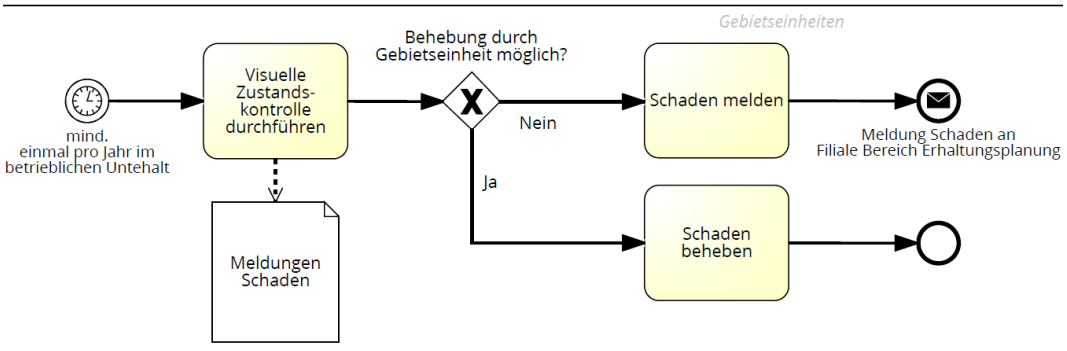


Abbildung 17: Prozessausschnitt der Beobachtung durch die Gebietseinheiten im Betrieb.

Visuelle Zustandskontrolle (Beobachtung) durchführen

Beschreibung	Ziel ist es, jedes Objekt des Inventars einmal pro Jahr im Zuge des betrieblichen Unterhalts zu kontrollieren. Bei dieser Kontrolle wird rein visuell und auf qualitativer Ebene der Zustand einzelner Objekte der Infrastrukturen der verschiedenen Fachbereiche beurteilt. Alle Unregelmässigkeiten oder Vorkommnisse werden durch das Unterhaltspersonal in ein Meldeformular eingetragen. Zum Beispiel Schäden, Funktionsstörungen, Risse, etc.
Verantwortlich	Gebietseinheiten
Input	-
Hilfsmittel	Meldeformular
Output	Meldung Schaden
Betrachtungszeitraum	Zyklisch, mindestens einmal pro Jahr.

Schaden beheben & Schaden melden

Beschreibung	Kann der Schaden im Rahmen der erbrachten Leistungen der Gebietseinheiten behoben werden, wird dies während der betrieblichen Tätigkeit erledigt. Wenn Meldungen von Schäden nicht von den Gebietseinheiten selbst behoben werden können, werden diese an den Filialbereich Erhaltungsplanung weitergeleitet.
Verantwortlich	Gebietseinheiten
Input	-
Hilfsmittel	-
Output	Meldung Schaden an Filiale, Bereich Erhaltungsplanung (EP)
Betrachtungszeitraum	Anschliessend an Beobachtung

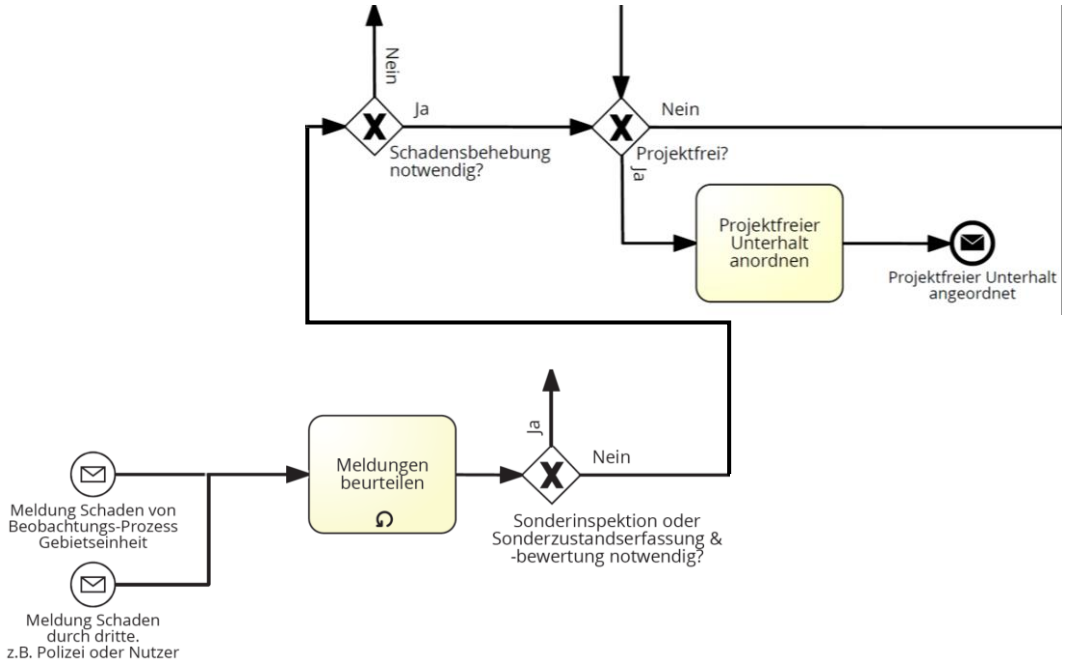


Abbildung 18: Prozessausschnitt zur Beurteilung von Meldungen und projektfreiem Unterhalt.

Meldungen beurteilen

Beschreibung	Die Meldungen werden periodisch ausgewertet, um entsprechende Schadensbehebungen einzuleiten. Aufgrund von Beobachtungen und Meldungen können Sonderinspektion oder Sonderzustand-serfassungen & -bewertungen ausgelöst werden. Diese finden meistens nach ausserordentlichen Ereignissen statt. Über diese fliessen Befunde aus Meldungen in den regulären Ablauf für Erhaltungsprojekte. Es können aber auch direkt Schadensbehebungen durchgeführt werden.
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung
Input	Meldung Schaden von Gebietseinheiten oder Dritten wie zum Beispiel die Polizei oder Nutzer.
Hilfsmittel	-
Output	-
Betrachtungs-zeitraum	Zyklisch, mindestens einmal im Jahr, abhängig von Meldungen

Projektfreier Unterhalt anordnen

Beschreibung	Wird eine unmittelbare Handlung benötigt, kann ein projektfreier Unterhalt (kleiner baulicher Unterhalt KBU) angeordnet werden. Dieser wird oft unter dem operativen Budget gemacht und kann daher den langwierigen, administrativ intensiven Prozess der Projektierung weglassen (Arbeiten im laufenden Betrieb).
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung

Input	-
Hilfsmittel	-
Output	-
Betrachtungs-zeitraum	Sofort, nach Bedarf

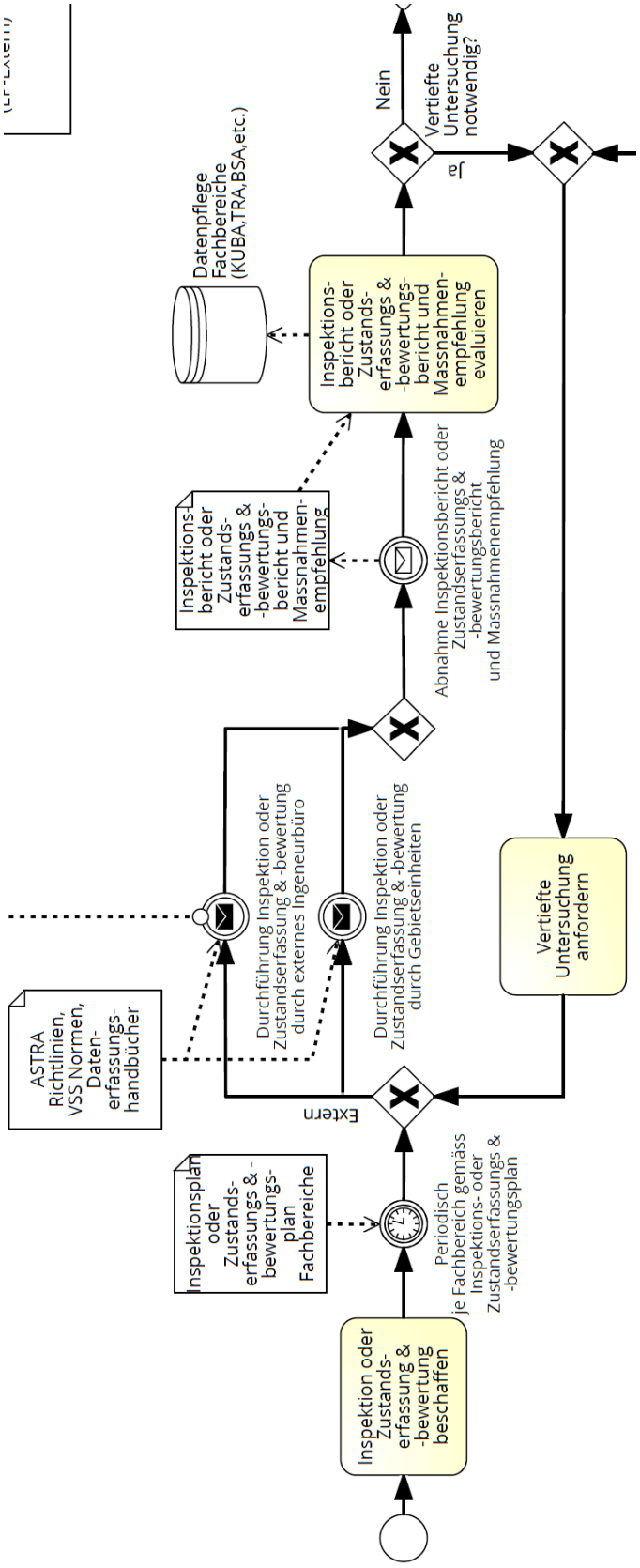


Abbildung 19: Prozessausschnitt zur Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung der Infrastrukturobjekte.

Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung beschaffen

Beschreibung	Die Filialen beschaffen die Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung (Trassee) zur Erhebung der Zustandsdaten für jeden Fachbereich. Diese können von externen Ingenieurbüros oder von speziell geschultem Personal der Gebietseinheiten ausgeführt werden. Die Beschaffung kann auch mehrjährige Verträge zur Folge haben. Innerhalb dieser Verträge führt der Auftragnehmer die Inspektionen bzw. Zustandserfassungen & -bewertungen gemäss dem jeweiligen Inspektions- bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsplan durch ohne, dass diese für die einzelnen Zyklen der Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung neu beschafft werden müssen. Diese Zyklen für die einzelnen Streckenabschnitte können nach Fachbereich und Filiale variieren. Zum Beispiel ist es bei Kunstbauten alle 5 Jahre und beim Trassee mind. alle 5 Jahre, je gemäss Plan und jeweils für einen ganzen Nationalstrassenabschnitt.
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung
Input	-
Hilfsmittel	-
Output	-
Betrachtungszeitraum	Zum Ablauf des vorangehenden Vertrages

Inspektion bzw. Zustandserhebung & -bewertung durchführen

Beschreibung	Zustandserhebungen und -bewertungen werden je Fachbereich durchgeführt mit dem Detaillierungsgrad von einer Hauptinspektion. ASTRA Richtlinien, VSS-Normen sowie Datenerfassungshandbücher für die jeweiligen Fachapplikationen gewährleisten einheitliche Ergebnisse. Der erfasste Zustand wird von den beauftragten Inspektoren bzw. Zustandserfasser & -bewerter direkt während der Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung in den entsprechenden Fachapplikationen zur Kontrolle angelegt. Dies kann mit einem Tablet vor Ort bereits geschehen, oder zuerst mit Exceltabellen. Alle Massnahmen zur Feststellung eines Zustands sind sogenannt passive Massnahmen. Gewisse Filialen haben langjährige Verträge zur Ausführung der Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung.
Verantwortlich	Auftragnehmer: Externes Ingenieurbüro oder Gebietseinheiten
Input	ASTRA Richtlinien, VSS-Normen, Datenerfassungshandbücher
Hilfsmittel	Fachapplikationen, zum Teil mit Tablet vor Ort, Excel Tabellen
Output	Inspektionsbericht bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsbericht und Massnahmenempfehlung
Betrachtungszeitraum	Periodisch entsprechend Fachbereich (alle 4 oder 5 Jahre), und laufend durchgeführt für verschiedene Nationalstrassenabschnitte

Inspektionsbericht bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsbericht und Massnahmenempfehlung evaluieren

Beschreibung	Die Inspektionsberichte bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsberichte und Massnahmenempfehlungen werden in der Filiale vom entsprechenden Erhaltungsplaner je Fachbereich evaluiert. Entsprechend der Zustandsdaten und Massnahmenempfehlung wird entweder eine vertiefte Untersuchung angefordert oder der Handlungsbedarf wird noch genauer angeschaut. Der Inspektionsbericht bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsbericht gibt in Form eines Textdokuments detaillierte Informationen zur Erhebung des Zustands (z.B. durch Fotos). Es wird eine diskrete Bewertungsskala von 1 bis 5 verwendet, respektive eine kontinuierliche Bewertungsskala von 0 bis 5 für den Fachbereich Trassee. Die Berichtgenerierung wird durch Schnittstellen der Fachapplikationen unterstützt. Durch die Freigabe des Inspektionsberichtes bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsberichtes werden die Daten in den Fachapplikationen übernommen. Die Daten aus den Inspektionen bzw. Zustandserfassungen & -bewertungen werden in jedem Fall, also auch wenn eine vertiefte Untersuchung notwendig ist, in den Management-Informationssystem Strasse und Strassenverkehr (MISTRA) Fachapplikationen erfasst und abgelegt.
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung
Input	Inspektionsbericht bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsbericht und Massnahmenempfehlung
Hilfsmittel	Fachapplikationen
Output	Freigabe Inspektionsbericht bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsbericht und Datenpflege Fachbereiche
Betrachtungszeitraum	Periodisch, laufend für verschiedene Nationalstrassenabschnitte

Vertiefte Untersuchung anfordern

Beschreibung	Nach der Evaluation des Inspektionsberichtes bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsberichtes und der Massnahmenempfehlung kann der Erhaltungsplaner eine vertiefte Untersuchung beschaffen. (Dieser Prozessschritt wird nach SIA 269 auch Überprüfung genannt, worauf in diesem Kapitel jedoch verzichtet wird, um den Begriff für Überprüfungen des Projektmanagements freizulassen, mit welchen sie die genaue Festlegung von Massnahmen einleiten.) Da diese vertiefte Untersuchung jedoch administrative und finanzielle Hürden mit sich bringt, wird diese nur selten angeordnet, wenn präzisere Abklärungen im Hinblick auf Zustandsbeschreibungen und den damit verbundenen Massnahmenempfehlungen benötigt werden. Nach Schätzungen wird das im Fachbereich Kunstbauten für ca. 2-5% der Objekte gemacht. Diese wird dann wie die

	Zustandserhebung entweder von einem externen Ingenieurbüro oder den Gebietseinheiten durchgeführt.
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung
Input	-
Hilfsmittel	-
Output	-
Betrachtungs-zeitraum	Auf Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung folgend

2.3.2 Überblick

In diesem Unterkapitel sind die Prozessschritte beschrieben, welche in der Gliederung von Abbildung 16 dem Ausschnitt Überblick zugeordnet werden.

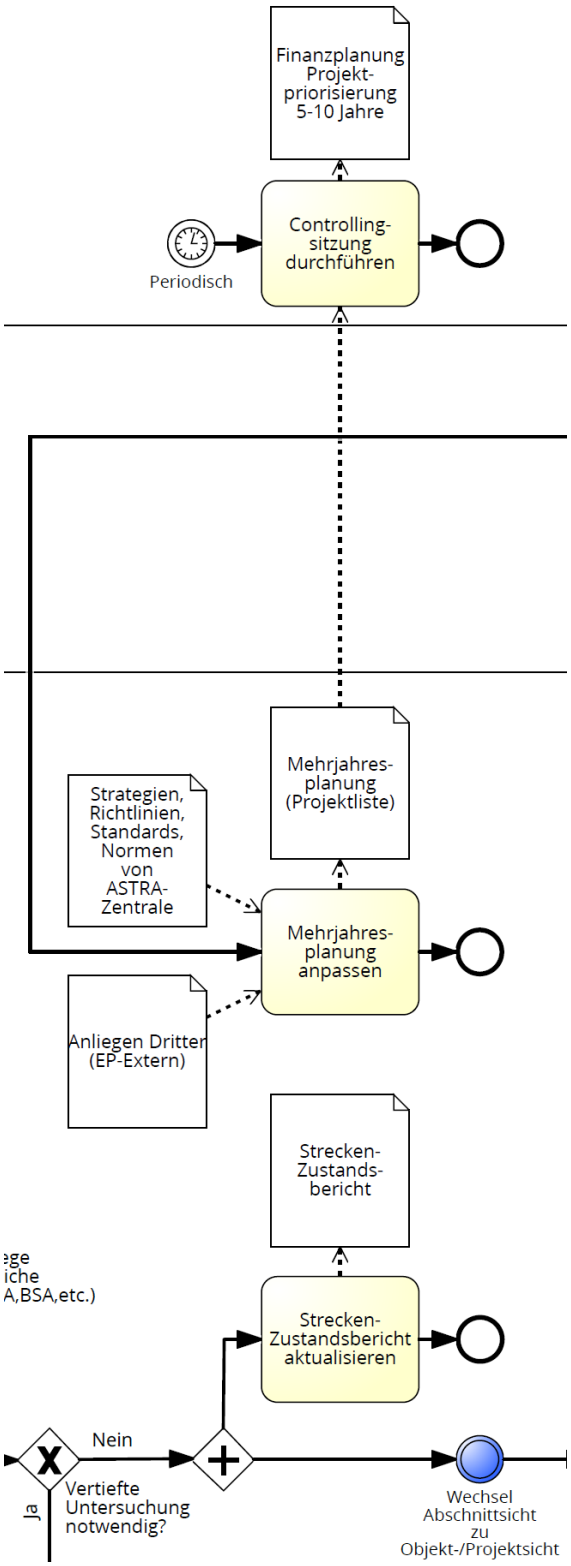


Abbildung 20: Prozessausschnitt der Erhaltungsplanung mit den Prozessschritten betreffend den Netz-, respektive Abschnitts-überblick bezüglich des Zustands und den Projekten.

Strecken-Zustandsbericht aktualisieren

Beschreibung	Der Strecken-Zustandsbericht ist ein Übersichtsdokument zum momentanen Zustand der Strecke über alle Fachbereiche und erfassten Inventarobjekte mit verschiedenen Darstellungen wie Tabellen, Pläne oder Graphiken zuhanden des Bereichsleiters Erhaltungsplanung. Die Erhaltungsplaner der verschiedenen Filialen haben keine einheitlichen Instrumente zur Erstellung des Berichts. Daraus versucht man abzuschätzen, ob Erhaltungsprojekte oder Einzelmassnahmen zu generieren sind. Die Tätigkeit ist an sich nicht komplex, die Schwierigkeit ist eher, wie man die vielen Daten der verschiedenen Fachbereiche übersichtlich visualisieren kann. Anmerkung: Gewisse Filialen haben diesen Bericht nicht.
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung
Input	Zustandsdaten, Inspektionsbericht bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsbericht
Hilfsmittel	Visio (Visualisierungsprogramm)
Output	Strecken-Zustandsbericht (Synthese Dokument)
Betrachtungszeitraum	Dynamisch, auf Inspektionen bzw. Zustandserfassungen & -bewertungen folgend.

Mehrjahresplanung anpassen

Beschreibung	In der Mehrjahresplanung werden aufbauend auf den Projektideen, respektive Massnahmentypen, sowie der zeitlichen Priorisierung, bis maximal 30 Jahre in die Zukunft schauend, die Investitionen geplant. Der Fachspezialist EP optimiert die Planung der Massnahmen nach den 5 Erfolgszielen (Bauzeit, Verkehrs- und Arbeitssicherheit, Verkehrsbehinderungen, Baukosten und Projektinhalte). Die Mehrjahresplanung wird in einer Projektliste gemäss SAP oder mit Tilos dargestellt und bezeichnet die Strecke, den Ausführungszeitpunkt sowie eine Kostenschätzung für die "ideale" Variante. In der Mehrjahresplanung werden Termine, Inhalte und finanzielle sowie personelle Ressourcen für jedes Projekt, unabhängig ob neu, geplant oder laufend, festgelegt beziehungsweise aktualisiert. Die Mehrjahresplanung als Projektliste wird ebenfalls der ASTRA-Zentrale geliefert und dort von der Erhaltungsplanung der Zentrale in einer filialübergreifenden Liste eingetragen, konsolidiert und jährlich angepasst. Ein Beispiel wie eine Mehrjahresplanung aussehen kann ist in Abbildung 21 abgebildet.
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung
Input	Strategien, Richtlinien, Standards, Normen (von ASTRA-Zentrale) Anliegen Dritter (EP-Extern)
Hilfsmittel	Tilos (Software für Projektplanung), SAP
Output	Mehrjahresplanung (Jährlich angepasste, objektbezogene Projektliste für die Zentrale)

Betrachtungs-zeitraum	5-30 Jahre in die Zukunft

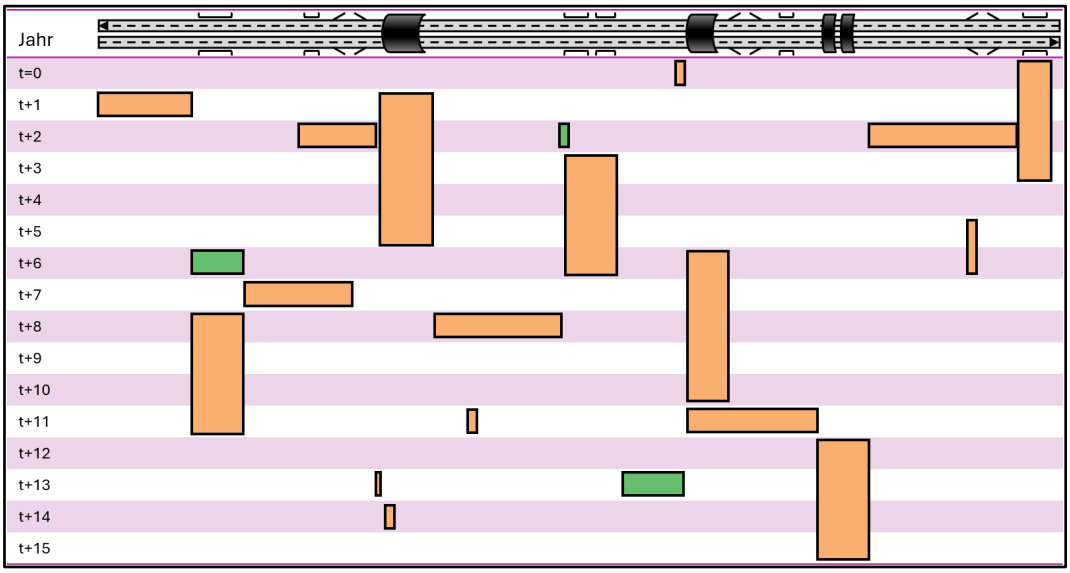


Abbildung 21: Illustratives Beispiel einer Mehrjahresplanung mit der betrachteten Strecke oben in der Horizontalen sowie den verschieden Erhaltungsprojekten über die Zeit dargestellt.

Controllingsitzung durchführen

Beschreibung	In der Controllingsitzung werden auf oberster Filialstufe mit Gästen aus der Zentrale die laufenden Projekte sowie der Voranschlags-kredit fürs Folgejahr und deren Auswirkung auf die kommenden Jahre besprochen. Dies erfordert eine Abstimmung der laufenden Projekte mit den geplanten Projekten. Mit dem Ergebnis der Controllingsitzung werden die vorhandenen Projektideen, zusammen mit dem Filialleiter, geprüft und für die kommenden 5-10 Jahre priorisiert. Die Controllingsitzung ist ein Gefäss zur Finanzplanung in den Filialen und nicht direkt für Entscheidungen in der Erhaltungsplanung.
Verantwortlich	Filialleiter, Bereichsleiter Erhaltungsplanung, Projektmanagement, Investitionscontrolling (Filiale/Zentrale), Leiter Abteilung I der Zentrale
Input	Mehrjahresplanung, Finanzbedarf der Projektideen
Hilfsmittel	-
Output	Finanzplanung Projektpriorisierung 5-10 Jahre
Betrachtungs-zeitraum	5-10 Jahre in der Zukunft

2.3.3 Handlungsbedarf

In diesem Unterkapitel sind die Prozessschritte beschrieben, welche in der Gliederung von Abbildung 16 dem Ausschnitt Handlungsbedarf zugeordnet werden.

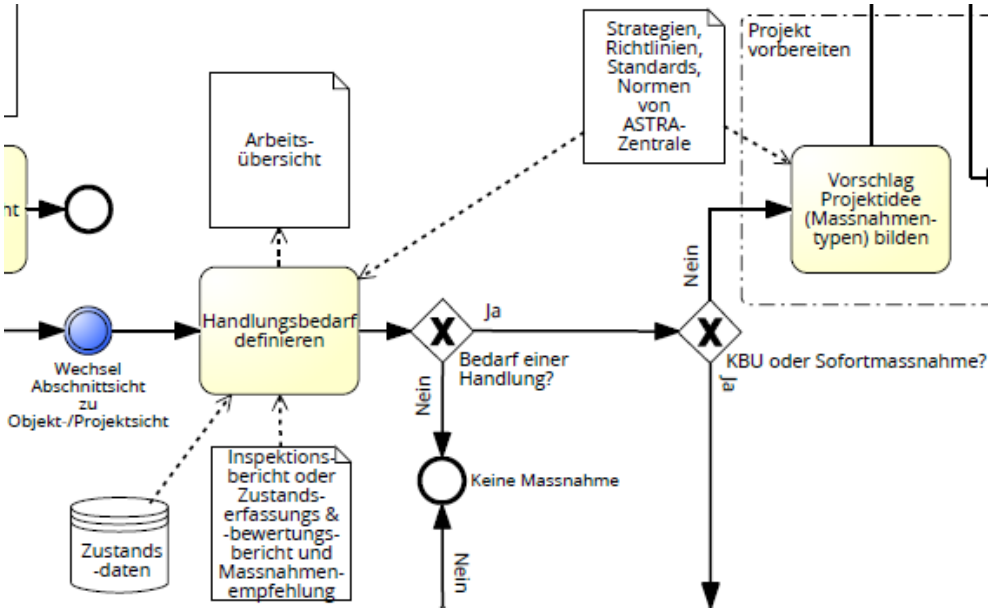


Abbildung 22: Prozessausschnitt der Erhaltungsplanung betreffend den Bedarf und den daraus folgenden Handlungen.

Handlungsbedarf definieren

Beschreibung

Nach jeder Kampagne der Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung wird die Filialnetzsicht zum Handlungsbedarf aktualisiert. Der Handlungsbedarf dient gewissermassen als Sammeltopf für die Bedürfnisse aus technischer Sicht. Daraus wird auch diskutiert, um die zukünftigen Erhaltungsprojekte innerhalb der nächsten 30 Jahren festzulegen. Der Betrachtungszeitraum kann auch einiges kürzer als 30 Jahre sein. Bei diesem Schritt wird auch Handlung vorentschieden, ob es eine Projekterarbeitung gibt, oder ob der Bedarf durch einen kleinen baulichen Unterhalt (KBU) oder eine Sofortmassnahme gelöst wird.

Zustandsdaten auswerten:
Pro Objekt und pro Fachbereich werden in den Abschnitten der Nationalstrassen die Zustandsdaten ausgewertet. Dabei wird erarbeitet, was notwendig ist, damit die operative Sicherheit gewährleistet bleibt sowie aktuellen Standards entspricht.

Zeitraum für die Realisierung festlegen:
Pro Objekt und pro Fachbereich wird anschliessend ein Zeitraum festgelegt, in welchem eine Erhaltungsmassnahme stattfinden sollte. Ebenfalls wird eine zeitliche Zuteilung aus technischer Sicht zugewiesen. Wird meist auf Grund des Alters, respektive der erwarteten Nutzungsdauer bestimmt.

	Kosten ideale Variante abschätzen: Pro Objekt und pro Fachbereich werden die Kosten für die ideale Variante (Variante inklusive Anpassung an aktuelle Standards) des Handlungsbedarfs abgeschätzt. Diese Abschätzung dient lediglich als Basis für den nachfolgenden Schritt, wenn Projektideen gebildet werden, und stellt keine endgültige Entscheidung dar.
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung (Fachbereichsspezifisch)
Input	Strategien, Richtlinien, Standards, Normen (von ASTRA-Zentrale) Zustandsdaten Inspektionsbericht bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsbericht und Massnahmenempfehlung
Hilfsmittel	-
Output	Arbeitsübersicht
Betrachtungs-zeitraum	Zeithorizont: Bis maximal 30 Jahre in die Zukunft Zyklus: mit Kampagnen der Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung

2.3.4 Projektvorbereitung

In diesem Unterkapitel sind die Prozessschritte beschrieben, welche in der Gliederung von Abbildung 16 dem Ausschnitt Projektvorbereitung zugeordnet werden.

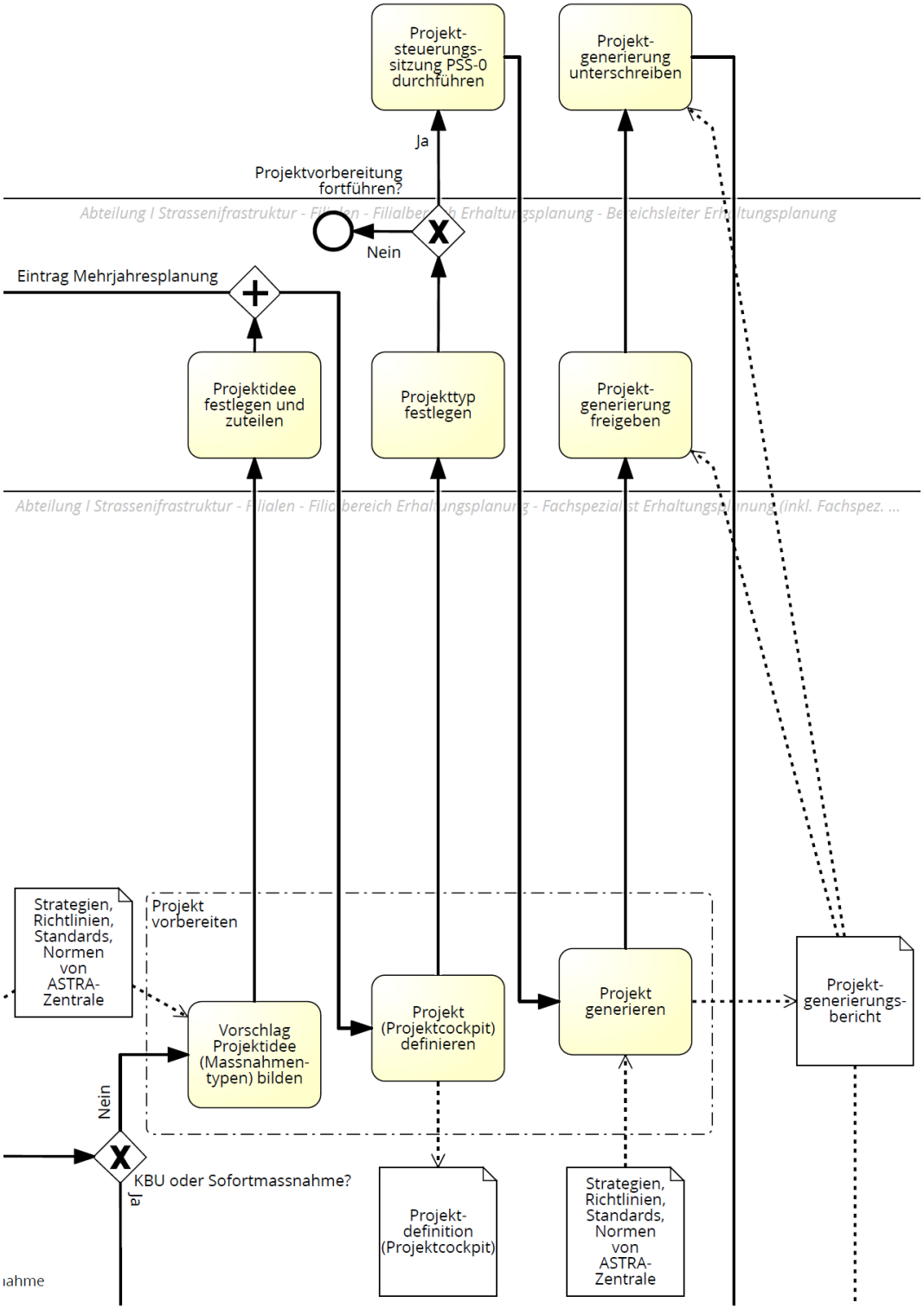


Abbildung 23: Prozessausschnitt der Erhaltungsplanung betreffend der Projekterarbeitung mit den verschiedenen Iterationen.

Vorschlag Projektidee (Massnahmentypen) bilden

Beschreibung	Im Anschluss an die Definition des Handlungsbedarfes werden für das Filialnetz Vorschläge für Projektideen (Massnahmentypen) gebildet. Entweder Einzelmassnahmen (EM), welche auf ein einzelnes Objekt fokussierte Projekte bezeichnet. Oder Erhaltungsprojekte (EP), die fachbereichsübergreifende Projekte mit mehreren Objekten an einem Abschnitt bezeichnen. Diese werden gemäss der UPlaNS Philosophie zusammengestellt. Hier finden sich erste Ideen für Bündelungen von Massnahmen, durch deren Vorziehen oder Rückversetzen. Dadurch können Kosten, Termine und Inhalte für die EP und EM festgelegt werden. Dieser Vorschlag einer Projektidee bedeutet vor allem, dass es ein Erhaltungsprojekt braucht. Diese Projektideen werden auf Konzeptstufe erarbeitet mit einer angestrebten Kostengenauigkeit von +/-30% für verschiedene Varianten (Bsp. "minimal" für operative Sicherheit, "ideal" für inklusive Anpassung an aktuelle Standards). Projektideen werden anhand eines Ziels (Objekte & Termin), der Mittel (Kosten der bestmöglichen Variante) sowie des Inhalts (Interventionstiefe) dokumentiert.
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung
Input	Strategien, Richtlinien, Standards, Normen von ASTRA-Zentrale
Hilfsmittel	EMNS
Output	-
Betrachtungszeitraum	5-30 Jahre in die Zukunft

Projektidee festlegen und zuteilen

Beschreibung	Die gebildeten Vorschläge für Projektideen, werden innerhalb der Erhaltungsplanung besprochen, triagiert und festgelegt. Dabei werden Vorschläge für Projektideen, welche weiter als 15 Jahre in die Zukunft gehen, noch nicht miteinbezogen. Die festgelegten Projektideen werden einem Fachspezialisten Erhaltungsplanung zur möglichen Ausarbeitung und Projektbegleitung zugeteilt. Diese Projektidee wird in der Arbeitsübersicht, respektive im SAP zur Investitionsplanung eingetragen. Die dort eingetragenen Projektideen bilden die Basis für die erste Priorisierung der Erhaltungsmassnahmen innerhalb der Filiale. Parallel dazu wird auch, sofern notwendig, die Mehrjahresplanung mit den neusten Projektideen angepasst und sie werden in die Projektliste aufgenommen.
Verantwortlich	Bereichsleiter Erhaltungsplanung
Input	-
Hilfsmittel	-
Output	-
Betrachtungszeitraum	Maximal bis 15 Jahre in die Zukunft

Projekt definieren (Projektcockpit)

Beschreibung	Die Projektideen werden von dem zur Projektbegleitung zugeteilten Fachspezialisten Erhaltungsplanung konkretisiert. Dies betrifft insbesondere die Inhalte, Ressourcen und Termine und ist eine Vorbereitung für die Übergabe des Projektes an das Projektmanagement. Es bedeutet aber auch Grundlagen zu beschaffen und Rahmenbedingungen zu klären. Das können sein: Überprüfungen, Augenscheine vor Ort, Rückfragen bei GE, PM oder Dritten, sowie Konsultieren von Informationen aus dem Archiv oder der MISTRA-Fachapplikationen. Daraus resultiert eine Projektdefinition, oder Projektcockpit, wie es auch das Faktenblatt UPlaNS-Planung darstellt. Der Bereichsleiter Erhaltungsplanung erstellt ebenfalls ein Korreferat dazu.
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung (Projektbegleitung)
Input	-
Hilfsmittel	-
Output	Projektdefinition (Projektcockpit)
Betrachtungszeitraum	Ca. 1 Jahr vor Projektübergabe an PM (Für Erhaltungsprojekte ca. 8 Jahre vor Baubeginn.)

Projekttyp festlegen

Beschreibung	In diesem Prozessschritt wird der Projekttyp festgelegt, welche sind: Schlüsselprojekte, Übergeordnete Projekte, Übrige Projekte, Projekte 1:1-Ersatz EP, und kleiner baulicher Unterhalt (KBU, genaugenommen kein Projekt) welcher ohne anschliessende Projektgenerierung der zur Übergabe, respektive der Projektsteuerungssitzung PSS-0 kann. Die anderen vier Projekttypen werden anschliessend zur Projektgenerierung übergeben. Die Zuteilung des Projekttyps erfolgt durch den Bereichsleiter Erhaltungsplanung mit Hilfe des Fachspezialisten Erhaltungsplanung. Diese hat direkten Einfluss auf die Sitzungsart, Entscheidungshoheit, Art der Durchführung und den Teilnehmerkreis gemäss Tabelle 3. Bei diesem Projektschritt kann die Vorbereitung eines spezifischen Projektes auch nochmals gestoppt, respektive über deren Fortführung entschieden werden.
Verantwortlich	Bereichsleiter Erhaltungsplanung
Input	-
Hilfsmittel	-
Output	-
Betrachtungszeitraum	5-10 Jahre in der Zukunft

Projektsteuerungssitzung PSS-0 durchführen

Beschreibung	Die Projektsteuerungssitzung PSS-0 bildet die offizielle Übergabe der Hauptverantwortung von der Erhaltungsplanung zum Projekt Management. Sie findet statt, nachdem der Projekttyp festgelegt wurde und bildet den Grundstein für die Projektgenerierung. Der Teilnehmerkreis der PSS-0 wird je nach Projekttyp gemäss Tabelle 3 zusammengestellt.
Verantwortlich	Teilnehmerkreis nach Projekttyp gemäss Tabelle 3
Input	-
Hilfsmittel	-
Output	-
Betrachtungs-zeitraum	Ca. 5-7 Jahre vor Inbetriebnahme

Projektsteuerungssitzung PSS-0 für verschiedene Projekttypen

Projekttyp	Sitzungsart	Entscheidungs-hoheit	Art der Durch-führung	Teilnehmerkreis
Schlüsselprojekte	PSS-0	AC I	Vortrag	AC I FC F4 BL PM BL / FBL EP BL IC PL PM MA EP Projekt-begleitung
Übergeordnete Projekte	PSS-0	FC F4	Diskussion Auf-tragsverständnis	FC F4 BL PM BL / FBL EP BL IC PL PM MA EP Projekt-begleitung
Übrige Projekte	PSS-0 = Interne Sitzung EP Eintrag in AÜ	BL / FBL EP	Diskussion Auf-tragsverständnis	BL PM BL / FBL EP BL IC PL PM MA EP Projekt-begleitung
Projekte 1:1-Er-satz EP	PSS-00 = Interne Sitzung EP Eintrag in AÜ	BL / FBL EP	Diskussion Auf-tragsverständnis	BL / FBL EP MA EP Projekt-begleitung FaS EP baul. UH
Kleiner baulicher Unterhalt (KBU)	PSS-00 = Geneh-migung Massnahmenliste KBU Eintrag in AÜ	BL / FBL EP	Diskussion Auf-tragsverständnis	BL / FBL EP MA EP Projekt-begleitung FaSKoB operativ

Tabelle 3: Die 5 Projekttypen mit den dazugehörigen Bestimmungen für die Durchführung der Projektsteuerungssitzung PSS-0. (ASTRA, 2021c)

Projekt generieren

Beschreibung	Auf Grund der Vorentscheide und entsprechend dem Projekttyp wird das Projekt generiert und in einem Bericht zusammengestellt. Das bedeutet, dass alle nötigen Unterlagen für die ausführenden Projektmanager zusammengetragen werden. Dazu werden gemeinsam mit den Gebietseinheiten die Standards- und Leistungsvorgaben der Eigentümer und Betreiber definiert. Die Projektgenerierung beinhaltet die Zustandsdaten aller im Projekt enthaltenen Objekte, sowie deren Bewertung. Der Bericht besteht aus der Projektabgrenzung, der Projektintegration mit allen Rahmenbedingungen und Vorgaben zur Umsetzung, der Herleitung des Handlungsbedarfs sowie der Projektdefinition. Detaillierte Informationen zu Form und Inhalt ist in verschiedenen Fachhandbüchern vorhanden. Der Projektgenerierungsbericht dient der Übergabe des Projekts an das Projektmanagement und enthält einen formellen Projektantrag. Er bezieht sich auf einen Erhaltungsabschnitt. Der Bereichsleiter Erhaltungsplanung erstellt ebenfalls ein Korreferat dazu. Vor der Fertigstellung der Projektgenerierung wird diese noch von den Betroffenen, zum Beispiel vom Bereichsleiter Projektmanagement, den Gebietseinheiten, oder Weiteren, vernehmlasst.
Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung (welcher für die Projektbegleitung bestimmt wurde)
Input	Strategien, Richtlinien, Standards, Normen (von ASTRA-Zentrale)
Hilfsmittel	Wordvorlage (in F4), Merkblatt Projektgenerierung
Output	Projektgenerierungsbericht
Betrachtungszeitraum	Spezifisches Projekt, weniger als 1 Jahr vor Projektübergabe

Projektgenerierung freigeben

Beschreibung	Der Bereichsleiter Erhaltungsplanung leitet die Projektgenerierung und gibt diese frei zum Unterschriftenlauf des Entscheidungsgremiums, welches je nach Projekttyp gemäss Abbildung 24 zusammengestellt ist. Der Bereichsleiter Erhaltungsplaner sowie der Bereichsleiter Projektmanagement machen bei diesem Schritt viele Abklärungen vor der Übergabesitzung mit dem Unterschriftenlauf. Zum Beispiel, welchem Projektleiter das Projekt zugeteilt wird, oder mit den Fachunterstützungen oder Juristen Details zur Umsetzung abzuklären.
Verantwortlich	Bereichsleiter Erhaltungsplanung
Input	Projektgenerierungsbericht
Hilfsmittel	-
Output	-
Betrachtungszeitraum	Spezifisches Projekt, weniger als 1 Jahr vor Projektübergabe

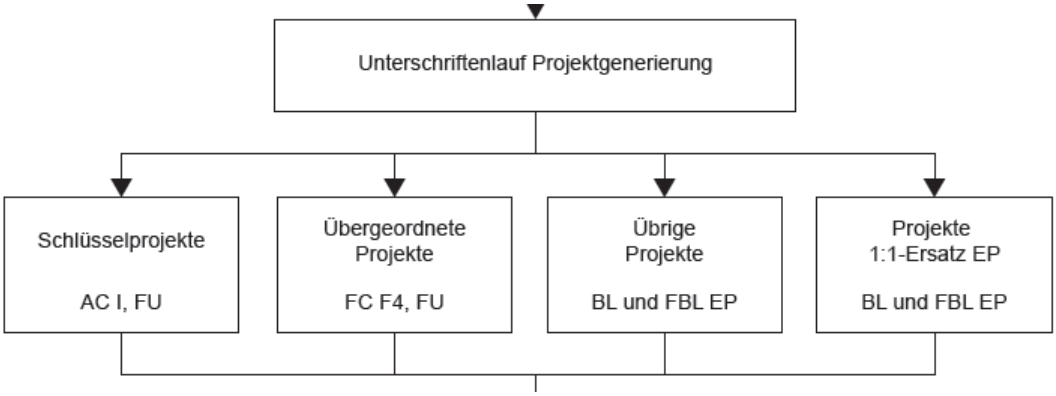


Abbildung 24: Zusammenstellung des Entscheidungsgremiums nach Projekttyp für den Unterschriftenlauf zur Freigabe der Projektgenerierung. (ASTRA, 2021c)

Projektgenerierung unterschreiben

Beschreibung	Nach der Unterschrift des Entscheidungsgremiums zur Freigabe wird die Projektgenerierung vom Projektbegleitenden Fachspezialisten Erhaltungsplanung im Auftrag vom Bereichsleiter Erhaltungsplanung formell an den Bereichsleiter Projektmanagement der Filiale übertragen. Dies kann in Form eines Excelformulars sein.
Verantwortlich	Entscheidungsgremium nach Projekttyp gemäss Abbildung 24
Input	Projektgenerierungsbericht
Hilfsmittel	-
Output	-
Betrachtungszeitraum	Unmittelbar vor der Projektübergabe

2.3.5 Realisierung und Projektbegleitung

In diesem Unterkapitel sind die Prozessschritte beschrieben, welche in der Gliederung von Abbildung 16 dem Ausschnitt Realisierung und Projektbegleitung zugeordnet werden.

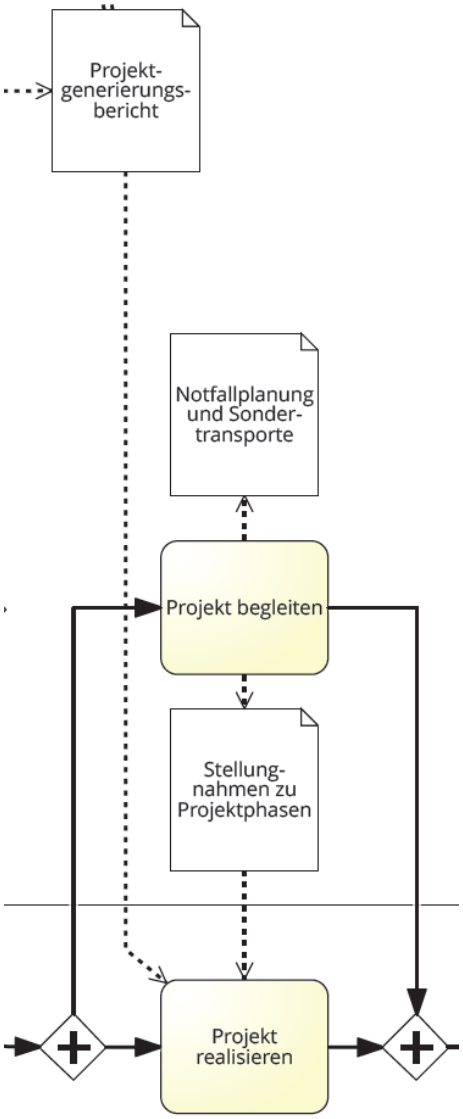


Abbildung 25: Prozessausschnitt zur Realisierung und Projektbegleitung.

Projekt begleiten

Beschreibung	Der projektbegleitende Fachspezialist Erhaltungsplanung begleitet das Erhaltungsprojekt während der ganzen Zeit der Realisierung und repräsentiert den Eigentümer des Infrastrukturobjekts bis zur Inbetriebnahme. Zu den verschiedenen Phasen der Projektierung gibt er Stellungnahmen ab und wirkt mit an den Bau- und Verkehrsphasen. Ebenfalls ist der Erhaltungsplaner verantwortlich für das Notfallmanagement sowie Sondertransporte. Grundsätzlich gehört im ASTRA die Aufrechterhaltung des Betriebs zum Erhaltungsmanagement.

Verantwortlich	Fachspezialist Erhaltungsplanung (Projektbegleitung)
Input	-
Hilfsmittel	-
Output	Stellungnahmen zu Projektphasen
Betrachtungs-zeitraum	Bis Inbetriebnahme

Projekt realisieren

Beschreibung	Der Projektleiter übernimmt die Realisierung und eröffnet das Projekt unter Einbezug des Investitionscontrollings. Dieses durchläuft hier die verschiedenen Phasen der Projektierung, welche sind das Erhaltungskonzept (EK), das Massnahmenkonzept (MK) und das Massnahmenprojekt (MP). Gewisse Phasen können auch übersprungen werden. Für gewisse Massnahmen können auch weitere Phasen dazukommen, wenn zum Beispiel eine öffentliche Auflage notwendig ist. Der Projektleiter hat auch die Möglichkeit weitere und genauere Überprüfungen des Infrastrukturobjekte durchzuführen. Das realisierte Erhaltungsprojekt oder Einzelmassnahme wird beim Abschluss wieder dem Bereich Erhaltungsplanung übergeben.
Verantwortlich	Projektleiter
Input	Projektgenerierungsbericht Stellungnahmen zu Projektphasen
Hilfsmittel	-
Output	Projektdossier: EK, MK, MP, Dossier der realisierten Bauvorhaben.
Betrachtungs-zeitraum	Bis Inbetriebnahme

2.4 Zusätzliche Ausführungen zum Verständnis des aktuellen Prozesses

2.4.1 Unterschiede von und zu den ASTRA internen Grundlagen

Wie bereits im Kapitel Methodik erklärt wurden verschiedene Grundlagedokumente verwendet, um die vorgestellte Prozessbeschreibung zu erarbeiten. Die schriftlichen Dokumente, die zum Detail- oder Gesamtverständnis beitragen, waren das Handbuch (ASTRA, 2016) und die Unterlagen zum Prozess in der Filiale 4 in Winterthur (ASTRA, 2021j, 2021k, 2021i, 2021d, 2021c, 2021e, 2021g, 2021f, 2021h). Die folgende Tabelle 4 enthält eine Nebeneinanderstellung des Prozessschrittes mit dem Äquivalent, falls vorhanden, aus den verschiedenen Grundlagen. Wichtig anzumerken ist, dass Namen in der Umsetzung dieser Prozessdarstellung der Benennungsmethodik für Tätigkeiten von BPMN 2.0 in der Form «Nomen + Verb» folgen. Die weiteren und grösseren Unterschiede für eine unterschiedliche Benennung sind nachfolgend in Tabelle 5 erklärt.

Nebeneinanderstellung der schriftlichen Grundlagen

Umsetzung MINERVA Prozess	Handbuch	Prozess EP F4
Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung beschaffen	Inspektion	Hauptinspektion
visuelle Zustandskontrolle (Beobachtung) durchführen	visuelle Zustandskontrolle (Beobachtung)	Feststellungen, Meldungen
Zustandserfassung & -bewertung durchführen	Zustandserhebung und Zustandsbewertung	Hauptinspektion
Inspektionsbericht bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsbericht und Massnahmenempfehlung evaluieren	Beurteilung Inspektionsbericht und Empfehlungsliste	Auswertung Hauptinspektion, Meldungen, etc.
Vertiefte Untersuchung	Überprüfung	Überprüfung
Strecken-Zustandsbericht aktualisieren	Strecken-Zustandsbericht	[nicht explizit erwähnt]
Handlungsbedarf definieren	Definition Handlungsbedarf	Diskussionsforum
Vorschlag Projektidee (Massnahmentypen) bilden	Bildung Massnahmentypen EM/EP	Vorschlag Projektidee
Projektidee festlegen und zuteilen	[wie oben]	Festlegung Projektidee und Zuteilung (Eintrag Arbeitsübersicht)
Mehrjahresplanung anpassen	Mehrjahresplanung (lang- und mittelfristig)	Eintrag Projektliste
Controllingsitzung durchführen	Controlling-Sitzung	[nicht explizit erwähnt]
Projekt (Projektcockpit) definieren	Definition Projektidee	Projektcockpit
Projekttyp festlegen	[wie oben]	Entscheid Projekttyp
Projektsteuerungssitzung PSS-0 durchführen	Freigabe und Übergabe Projekt	Projektsteuerungssitzung PSS-0 (ABER später)
Projekt generieren + Projektgenerierung freigeben + Projektgenerierung unterschreiben	Projektgenerierung	Projektgenerierung
Projekt realisieren	Projektierung (EK, MK, MP / GP, AP, DP) und Realisierung	Projektierung und Realisierung
Projekt begleiten	Stellungnahme zur Genehmigung der Projektphasen	Projektbegleitung (Stellungnahmen)

Tabelle 4: Nebeneinanderstellung der Prozessschritte und deren Äquivalent aus den verschiedenen schriftlichen Hauptgrundlagen.

Begründungen der Wahl der Prozessschritte

Prozessschritt	Begründung
Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung beschaffen	Der Begriff «Inspektion» wird vor allem bei Kunstbauten angewandt. Für Trasse wird der Begriff «Zustandserfassung & -bewertung» benutzt. Auf den Begriff «Überwachung» wurde verzichtet, weil dieser wiederum zu viele andere Tätigkeiten, wie zum Beispiel Beobachtungen, miteinschliesst.

visuelle Zustandskontrolle (Beobachtung) durchführen	[keine grossen Abweichungen]
Zustandserfassung & -bewertung durchführen	[keine grossen Abweichungen]
Inspektionsbericht bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsbericht und Massnahmenempfehlung evaluieren	[keine grossen Abweichungen]
Vertiefte Untersuchung	Der Begriff «Überprüfung» wird hauptsächlich in der Projektierungs- oder Realisierungsphase vom Projekt Management verwendet, um die Massnahmen vorzubereiten. Da dies ein anderer Prozessschritt ist wurde der Begriff «vertiefte Untersuchung» verwendet.
Strecken-Zustandsbericht aktualisieren	[keine grossen Abweichungen]
Handlungsbedarf definieren	[keine grossen Abweichungen] (In Filiale 4 wird ein sogenanntes Diskussionsforum durchgeführt, welches in etwa diesem Prozessschritt entspricht.)
Vorschlag Projektidee (Massnahmentypen) bilden	Hier wird ebenfalls «Bildung Massnahmentypen EM/EP» verwendet, aber da es sich nach unserem Verständnis um einen ersten Vorschlag handelt für eine Projektidee, wurde dieser Begriff verwendet.
Projektidee festlegen und zuteilen	Ist die Folge des Entscheids für die Verwendung des Begriffes für den vorangehenden Prozessschritt.
Mehrjahresplanung anpassen	Im Handbuch gibt es noch eine Unterscheidung für mittel und langfristig. Gemäss den Gesprächen gibt es aber eher nur eine Mehrjahresplanung. In Filiale 4 der äquivalente Prozessschritt «Eintrag Projektliste» genannt, was eine leicht andere Form suggeriert. In dieser Prozessbeschreibung wird der Begriff «Mehrjahresplanung» verwendet, da er etwas mehr aussagt.
Controllingsitzung durchführen	Der Begriff «Controllingsitzung» wurde gegenüber «Finanzplanung» bevorzugt, da er weniger eine Kontinuierlichkeit suggeriert, was dem Prozessschritt gemäss Verständnis eher entspricht.
Projekt (Projektcockpit) definieren	Der sonst verwendete Begriff «Projektdefinition» in eine Tätigkeitsbeschreibung umgewandelt und weil zum Teil das Hilfsmittel Projektcockpit verwendet wird, kann dieser Prozessschritt in gewissen Filialen «Projektcockpit» heissen (Projektcockpit kann jedoch auch später im Projektmanagement zur Projektsteuerung vorkommen).
Projekttyp festlegen	Findet je nach Grundlagendokument im vorangehenden Prozessschritt statt.
Projektsteuerungssitzung PSS-0 durchführen	Der Begriff «Projektsteuerungssitzung PSS-0» ist an sich unbestritten, jedoch hat sich in den Gesprächen ergeben, dass zumindest Filiale 1 diese bereits vor der Projektgenerierung durchführt, weshalb die Klammer mit «(ABER später)» für die anderen Grundlagen hinzugefügt wurde. In dieser Prozessdarstellung wurde der Zeitpunkt gemäss Filiale 1 verwendet, da im Projekt MINERVA mit der Testrecke im Gebiet der Filiale 1 am engsten mit dieser zusammengearbeitet wird.
Projekt generieren + Projektgenerierung freigeben + Projektgenerierung unterschreiben	Der Begriff «Projektgenerierung» ist ebenfalls unbestritten und wurde in dieser Prozessdarstellung lediglich in mehrere Prozessschritte aufgeteilt, um die Verantwortlichkeiten besser abzubilden.
Projekt realisieren	Für diesen Prozessschritt wird in den Grundlagen «Projektierung und Realisierung» verwendet wurde jedoch für die Tätigkeitsschreibweise

	von BPMN 2.0 vereinfacht, da dieser Prozessschritt alle Tätigkeiten beim Projekt Management beinhaltet.
Projekt begleiten	Der gewählte Begriff, respektive was darunter verstanden wird, beinhaltet «Stellungnahmen zur Genehmigung».

Tabelle 5: Begründung und Erklärung zur Wahl der Benennung und des Zeitpunktes der verschiedenen Prozessschritte im Anbetracht der schriftlichen Hauptgrundlagen.

2.4.2 Rolle und Anwendung von Hilfsmittel

Bei der aktuellen Umsetzung des Prozesses für die Erhaltungsplanung werden gewisse digitale Hilfsmittel benutzt. Dies kann eine Software für die Darstellung von Informationen (Visio, Tilos, etc.) sein oder die Fachapplikationen (KUBA, TRA, etc.), welche nach dem Verständnis der Autoren hauptsächlich als Datenbanken verwendet werden. Die Nutzung der verschiedenen Fachapplikationen ist auf Grundlage der bestehenden Dokumentationen und Gespräche derzeit nicht eindeutig nachvollziehbar, insbesondere im Hinblick darauf, wie häufig und zu welchen Zwecken sie eingesetzt werden. Für KUBA zum Beispiel ist bekannt, dass KUBA-Mobile für die Datenerhebung bei Inspektionen via Tablet bereits hilfreich ist und genutzt wird. Andererseits entsteht der Eindruck, dass gewisse Fähigkeiten, wie einfache Prognosen von KUBA-MS, kaum genutzt werden. Ganz allgemein ist in den Gesprächen eher zum Ausdruck gekommen, dass kaum Prognosen, respektive Modelle für die Planung und Priorisierung von Massnahmen verwendet werden. Es wäre daher hilfreich herauszufinden, warum diese existierenden, weiteren Fähigkeiten der Fachapplikationen kaum zur Anwendung kommen.

2.5 Ideen für Verbesserungen

2.5.1 Überwachung

Im aktuellen Prozess ist noch nicht vollständig klar, wie aufgenommene Schäden berücksichtigt werden, insbesondere wenn keine sofortige Reaktion erforderlich ist. Das heisst, wie diese abgelegt werden, damit diese zu einem späteren Zeitpunkt, eventuell in einem anderen Kontext, mitberücksichtigt werden können. Dasselbe gilt auch für projektfreie Unterhaltsarbeiten, respektive welchen Einfluss diese auf die zukünftige Planung von Erhaltungsmassnahmen haben. In diesem Bereich werden Verbesserungsmöglichkeiten gesehen, diese Informationen durch Prognosemodelle für die Planung zu berücksichtigen. Wenn sich zum Beispiel der Zustand einer Fahrbahnabdichtung verschlechtert hat aber noch nicht direkt eine Massnahme benötigt, könnte man mit Prognosemodellen den Einfluss auf den zukünftigen Zustand von darunterliegenden Bauwerksteilen frühzeitig beobachten.

Vertiefte Untersuchungen werden nach aktuellem Verständnis direkt nach der Evaluation des Inspektionsberichtes bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsberichtes und der Massnahmenempfehlung angeordnet, wenn diese Unklarheiten übriglassen. Hier gibt es die Möglichkeit, dass Ergebnisse von Prognosemodellen für die Anordnung einer vertieften Untersuchung verwendet werden können. Dadurch könnte man auch den Einfluss der Ergebnisse dieser vertieften Untersuchung beobachten und die vor der vertieften Untersuchung gemachten Prognosen ersetzen oder ergänzen.

Im Zusammenhang mit der Überwachung sind weiterführende Ideen vorhanden: Zum Beispiel die Verknüpfung von Daten der Infrastrukturobjekte mit BIM oder GIS, um Feststellungen gerade im Modell einzutragen. Zum Beispiel mit einem Foto des Schadens das an der entsprechenden Stelle des 3D Modells des Infrastrukturobjektes verknüpft ist. Dies könnte einerseits bei der Definition des Handlungsbedarfes helfen als auch bei zukünftigen Inspektionen bzw. Zustandserfassungen & -bewertungen die genaue Stelle angeben und dadurch eine einfachere Lokalisierung ermöglichen. Weitertreiben könnte man diesen Gedanken, wenn man diese Informationen durch Extended Reality der untersuchenden Person sichtbar zur Verfügung stellt.

2.5.2 Überblick Zustand und Projekte

Bei den Prozessschritten, bei welchen es mehr um einen Überblick geht, ist erkennbar, dass es oft nicht einheitlich ist und auch nicht direkt von einem digitalen Hilfsmittel oder Managementsystem unterstützt wird. Die Erstellung des Strecken-Zustandsberichtes zum Beispiel könnte mit einem digitalen Hilfsmittel, welches die Informationen aus den verschiedenen Fachapplikationen abruft, unterstützt werden.

Bei der Mehrjahresplanung optimiert der Erhaltungsplaner die Planung der Massnahmen aktuell nach 5 Erfolgszielen (Bauzeit, Verkehrs- und Arbeitssicherheit, Verkehrsbehinderungen, Baukosten und Projektinhalte). Dabei wird das gewünschte Leistungsniveau nur nebensächlich miteinbezogen. Dabei wäre es aber sinnvoll die Beeinträchtigung des Leistungsniveaus neben Ausführungszeitpunkt und Kostenschätzung in der Übersichtsdarstellung aufzunehmen. Es wäre hilfreich zu untersuchen, ob die Erfolgsziele nicht viel eher gerade mit dem gewünschten Leistungsniveau oder der Übereinstimmung mit den übergeordneten Organisationszielen zu verbinden wären und Massnahmen nach diesen zu planen.

Bei diesen beiden Überblicksdokumenten würde es zu einer Erhöhung der Effizienz führen, wenn diese für eine konsistente Darstellung einen hohen Automatisierungsgrad mit Hilfe der Datenbanken, Prognosemodellen und Projektbündelungsalgorithmen haben. Ein konkretes Beispiel wäre die filialübergreifende Liste in der Zentrale mit den Projekten die jährlich von den Filialen gesendet werden. Dort könnte man mit einem automatisierten Abgleich mit den Projektlisten der Filialen die Effizienz steigern.

2.5.3 Handlungsbedarf und Projektvorbereitung

So wie die aktuelle Umsetzung der Definition des Handlungsbedarfes verstanden wird, wird dieser vor allem auf Grund der operativen Sicherheit festgelegt, welche in der Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung erörtert wird. Dies ist sicher ein zentraler Aspekt, jedoch gibt es die Möglichkeit Verbesserungen zu erzielen. In diesem Schritt könnte bereits das erwünschte Leistungsniveau für die kommenden Jahren berücksichtigt werden, und dazu ebenfalls die Massnahmenstrategien für die jeweiligen Objekte. Konkret heisst das, dass zum Beispiel nicht direkt die Massnahmenempfehlung aus der Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung umgesetzt wird, sondern dass gemäss der Massnahmenstrategie für den erfassten Zustand entschieden wird. Dies mit der Absicht, dass die Entscheidungen besser auf die Vorhaben im näheren Kontext abgestimmt sind.

Zur Definition des Handlungsbedarfes helfen Prognosemodelle eine Verbesserung des Prozesses zu erreichen, insbesondere mit dem nachfolgenden Schritt, wenn Vorschläge für Projektideen gebildet werden. Nach aktuellem Verständnis und gemäss den Gesprächen mit Verantwortlichen in der Filiale 1 werden kaum Zustandsprognosen gemacht, noch wird in konsistenter Weise der Bedarf für Erhaltungsmassnahmen erarbeitet. Es wird Potenzial gesehen, dass mit digitalen Hilfsmitteln, welche verknüpft sind mit der Datenbank, ein besserer Überblick zum aktuellen und zukünftigen Zustand der Objekte erstellt werden kann. Solche digitalen Hilfsmittel steigern somit die Effektivität des Erhaltungsplanungsprozesses, indem man aktuelle Zustände vervollständigt und vergleichbar darstellt, um Massnahmen zu bündeln. Gleichzeitig wird der Bedarf eines Objektes auf längere Sicht hinaus berücksichtigt. Dies entspricht der Notwendigkeit weit im Voraus und insbesondere zum aktuellen Zeitpunkt t=0 eine erhöhte Genauigkeit der Bedürfnisse zur Verfügung zu haben, damit so die richtigen Objekte für Erhaltungsprojekte ausgewählt werden können.

Durch das Fehlen eines systematischen und konsistenten Überblicks über Massnahmenbedürfnisse in der Zukunft, ist ebenfalls unklar, wie die Argumentation aussieht, dass eine Massnahme genau jetzt gemacht werden muss. Dies führt auch zur Frage, wie Verschiebungen von Massnahmen begründet werden und ob dies auf systematische und konsistente weise gemacht wird (z.B. eine Massnahme fünf Jahre nach vorne zu verschieben).

Dies alles führt dazu, dass Verbesserungen insbesondere dadurch zu erreichen sind, wenn Informationen über Zustände oder Argumente zur zeitlichen Bestimmung von Massnahmen auf eine bessere Art und Weise für Entscheidungsträger zusammengestellt werden, um bei der Entscheidungsfindung zu helfen. Das ASTRA hat Hilfsmittel (z.B. KUBA-MS) zur Verfügung, die jedoch nicht in vollem Umfang entsprechend ihrer Funktionalitäten genutzt werden. Hier sind Verbesserungen möglich, wenn untersucht wird, wieso solche Hilfsmittel nicht optimal verwendet werden und wie man dem vorbeugen kann. Zum Beispiel können Schulungen und Ansprechpersonen Abhilfe verschaffen, wenn die verantwortlichen Personen Vertrauen in die Modelle und Prognosen aufbauen können. Dies ist jedoch nur ein Teil. Für eine erfolgreiche Anwendung von Hilfsmitteln ist es ebenfalls wichtig, dass diese transparent und benutzerfreundlich entwickelt werden.

Im Prozessschritt «Vorschlag Projektidee (Massnahmentypen) bilden» kann auch die Effizienz des Erhaltungsplanungsprozesses erhöht werden. Mit der Datenbank verknüpfte Algorithmen können mithilfe der Prognosemodelle automatisch erste Vorschläge für die Bündelung von Erhaltungsmassnahmen erstellen. Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen werden mathematisch optimierte Ergebnisse vorgeschlagen, was die Arbeit der Erhaltungsplaner vereinfacht und beschleunigt. Mit diesem digitalen Hilfsmittel kann der Erhaltungsplaner einfach verschiedene Optionen kreieren, indem er die Rahmenbedingungen ändert, wie zum Beispiel das Budget oder das minimal erwünschte Leistungsniveau. Vom digitalen Hilfsmittel empfängt er für jede Option optimierte Bündelungen von Erhaltungsmassnahmen.
Ein solcher Algorithmus, welcher durch die vorhandenen Daten optimierte Ergebnisse liefern kann, kann über verschiedene Zeithorizonte verwendet werden und kann mit steigendem Detaillierungsgrad auch in den folgenden Prozessschritten zu einer

Verbesserung beitragen. Zum Beispiel: Bei detaillierter Projekterarbeitung können schnell verschiedene Varianten mit veränderten Rahmenbedingungen durchgespielt werden. Eine weitere Möglichkeit wären optimierte Vorschläge für Baustellenkonfigurationen unter Berücksichtigung des erwünschten Leistungsniveaus.

2.6 Schlussfolgerung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es bei der Umsetzung des aktuellen Prozesses oft keine einheitliche Praxis gibt, welche zu konsistenten Ergebnissen führt. Einen verbesserten und einheitlicheren Prozess für die Erhaltungsplanung würde helfen, alles konsistent und dafür auch nachvollziehbarer zu machen, was schlussendlich zu besseren Entscheidungen führen würde. Die Wahrnehmung ist, dass Inspektionsberichte bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsberichte mit der Massnahmenempfehlung vom ausführenden externen Ingenieurbüro oft schon fast projektauslösenden Charakter haben. Dies wird so verstanden, dass man mit der Erhaltungsplanung auf diese Überwachungsberichte reagiert, anstelle eines eigenen Überblicks und einer langfristigen Planung anhand der Strategie für die einzelnen Objekte. Verbesserungen bezüglich der Effektivität von Massnahmen sind ebenfalls möglich, wenn man auf konsistente Art und Weise den Nutzen von Massnahmen bewertet und deren Einfluss auf das gewünschte Leistungsniveau berücksichtigt. Das heisst vor allem für die Auslösung von Massnahmen und besonders im Planungsbereich von mehr als 10 Jahren scheinen digitale Hilfsmittel zur Unterstützung zu einer Verbesserung des Prozesses beizutragen. Für fundierte Entscheidungen, welche nicht aufgrund der ursprünglich erwarteten Nutzungsdauer oder dem gefühlten Risiko getroffen werden, müssen diese digitalen Hilfsmittel, besonders die Prognosemodelle, wiederum transparent und verständlich sein. Dies gilt insbesondere auch bezüglich der Auslösung von Massnahmen, wenn zum Beispiel eine Massnahme erst 5 Jahre später umgesetzt wird, sollte das damit eingegangene Risiko so gut wie möglich darlegt sein. Über den gesamten Prozess der Erhaltungsplanung ist besonders im Bereich der Definition des Handlungsbedarfes und der anschliessenden Erstellung von ersten Vorschlägen für Projektideen Potenzial für Verbesserung durch digitale Hilfsmittel festgestellt worden. Insbesondere die Einbeziehung von guten Zustandsmodellen für den aktuellen sowie den zukünftigen Zustand der Infrastruktur, als auch von Algorithmen für die optimale Bündelung von Massnahmen, wurde Potenzial für Verbesserungen identifiziert.

3 Teststreckengrundlagen

Wie in Kapitel 2 beschrieben, fällt die Zuständigkeit für die gewählte Teststrecke in den Verwaltungsbereich der Filiale 1. Sie erstreckt sich vom Autobahnkreuz Villars-Sainte-Croix bis zur Ortschaft Rennaz. Die Teststrecke liegt somit auf dem Achssegment der N9, welches in Villars-Sainte-Croix den Bezugspunkt 0 hat und danach in der Kilometrierung aufsteigend ist bis zum gewählten Ende der Teststrecke in Rennaz mit Bezugspunkt 420, ausgedrückt im räumlichen Basisbezugssystem (RBBS) (ASTRA, 2017b). Somit erstreckt sich die richtungsgetrennte Teststrecke über eine Länge von ca. 42 km. Da sich die Strecke vorwiegend in einer Hanglage befindet und viele kleine Täler überquert sowie durch diverse Hügel führt, gibt es entlang der Teststrecke entsprechend viele Bauanlagen und -werke, die diese Hindernisse in Form von Brücken überqueren bzw. in Form von Tunneln durchqueren. Für die vorgestellten Methoden werden die vorhandenen Daten aus dem ASTRA dieser Anlagen genutzt, um die Validierung durchzuführen oder um zu demonstrieren, wie die Anwendung aller vorgestellten Methoden zusammenläuft. Eine im Raum angeordnete Übersicht der Teststrecke ist in der Abbildung 26 dargestellt. Die grüne Linie symbolisiert das Trassee, die orangen Punkte die Brücken und die cyanfarbenen Dreiecke die Tunnel – also diese Anlagenarten, die Vertieft betrachtet werden bzw. im Falle von Tunnel kommentiert werden. Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben diese Anlagen im weiter. Das Bezugsdatum der Daten ist in Kapitel 1.5 angegeben.

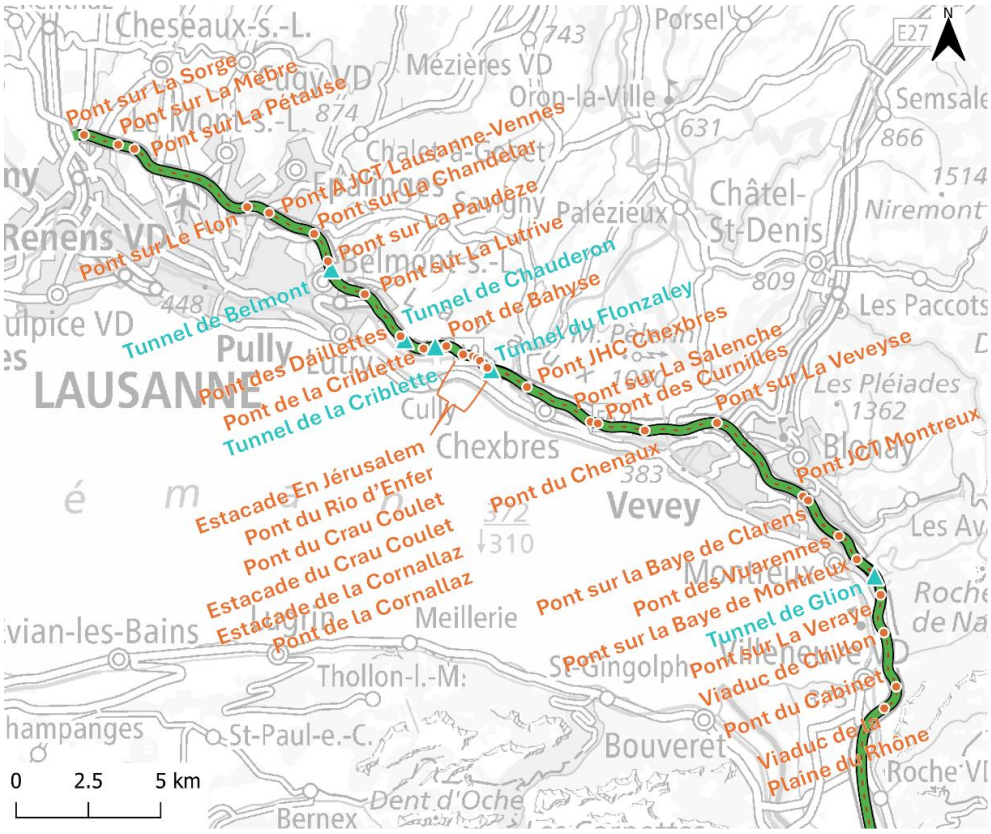


Abbildung 26: Übersichtsplan der Testrecke mit Beschriftung der Brücken und Tunnel. Kartenbasis © swisstopo, 01.10.25.

3.1 Brücken und Tunnel der Teststrecke

Die Teststrecke umfasst dreissig Brücken und fünf Tunnel und stellt somit einen Teil der Nationalstrasse mit einer hohen Dichte an Bauanlagen und -werken dar (Die Bauanlage umfasst mehrere Bauwerke – beispielsweise zwei Brückenbauwerke bei einer Zwillingsbrücke, vgl. Kapitel 1.4). Es gibt auch diverse weitere Bauanlagen und -werke wie Stützmauern, Unterführungen und Überführungen, die im Weiteren nicht berücksichtigt werden. In Tabelle 6 und Tabelle 7 sind für die Brücken- und Tunnelanlagen die folgenden Daten aufgeführt: Name, Baujahr, Länge, Zustandsklasse der letzten Inspektion sowie für Brücken die mittlere Höhe[2]. Aufgrund der Topografie entlang der Teststrecke ergibt sich eine vielfältige Ansammlung von Bauanlagen und -werke. Bis auf einen Neubau im Jahr 2023 wurden alle zwischen 1964 und 1976 errichtet und befinden sich heute in der Zustandsklasse 1 bis 3. In die kürzere Kategorie fallen sieben Brücken mit einer Länge zwischen 21 m und 76 m. Einundzwanzig Brücken weisen eine Länge zwischen 95 m und 434 m auf. Die beiden „Viaduktbrücken" sind mit 1162 m bzw. 2081 m die Längsten. Die mittleren Höhen der Brücken liegen mehrheitlich zwischen 2 m und 24 m. Es gibt jedoch drei Ausreisser mit 31 m, 62 m bzw. 63 m. Die fünf Tunnel sind zwischen 222 m und 1348 m lang.

Für das einfachere Verständnis gewisser Resultate in den Methoden sind hier diverse Brücken noch speziell erwähnt:

- Die *Pont sur La Sorge* ist nicht nur die erste Brücke auf dem Achssegment der Teststrecke, sondern aufgrund der geringen Anzahl von Bauwerksteilen auch bestens geeignet, um im Kapitel 7 die Prognose von Unterhaltsmassnahmen zu demonstrieren. Deshalb ist diese Ebene der Bauwerksstruktur für die *Pont sur La Sorge* im Unterkapitel 3.1.1 noch genauer beschrieben.
- Die *Pont du Cabinet* fällt auf, weil sie als einzige Brücke einen Initialen Zustand von 4 (schlecht) aufweist. Mit ihrer Länge von 72 m ist die Brücke eine der kürzeren. Über beide Bauwerke dieser Zwillingsbrücke gezählt gibt es 100 Bauwerksteile, wobei nicht alle davon kostenrelevant sind. Besonders in Kapitel 6, bei der Berechnung des Sofortmassnahmenrisikos sticht sie heraus.
- Die längste Brücke ist das *Viaduc de Chillon* mit einer beachtlichen Länge von 2081 Metern. Mit 422 Bauwerksteilen (inklusive der nicht kostenrelevanten) über beide Bauwerke hinweg ist sie die komplexeste und grösste Bauanlage. Eine Brücke wie das *Viaduc de Chillon* hat einen grösseren Einfluss auf die Methoden und deren Validierung, da sie prozentual einen so grossen Teil der Daten ausmacht. Gleiches gilt für das *Viaduc de la Plaine du Rhône* mit 356 Bauwerksteilen.

[2] Bei einer Bauanlage ist der höhere Wert der dazugehörigen Bauwerke angegeben.

Brückenanlagen der Teststrecke

Name	Baujahr	Länge [m]	Mittlere Höhe [m]	ZK
Pont sur La Sorge (09P006)	1964/1973	185	24	2
Pont sur La Mèbre (09P010)	1964/1973	155	10	3
Pont sur La Pétause (09P012)	1964	131	9	2
Pont sur Le Flon (09P024)	1964/1973	434	16	2
Pont A JCT Lausanne-Vennes (09PI026)	1964	24	6	2
Pont sur La Chandelar (09P032)	1973	273	19	2
Pont sur la Paudèze (09P034)	1974	422	63	2
Pont sur La Lutrive (09P038)	1973	395	19	2
Pont des Daillettes (09P045)	1971	95	4	2
Pont de la Criblette (09P047)	1972	62	4	2
Pont de Bahyse (09P048)	1972	315	10	3
Estacade En Jérusalem (09P050)	1972	100	4	2
Pont du Rio d'Enfer (09P051)	1971	76	7	2
Pont du Crau Coulet (09P052)	1974	129	4	2
Estacade du Crau Coulet (09P053)	1974	122	2	3
Estacade de la Cornallaz (09P054)	1972/1974	66	3	2
Pont de la Cornallaz (09P055)	1974	135	9	2
Pont JCH Chexbres (09PI058)	2023	21	5	1
Pont sur La Salenche (09P062)	1969/1971	149	7	2
Pont des Curnilles (09P063)	1971	326	12	2
Pont du Chenaux (09P066)	1970	136	11	2
Pont sur La Veveyse (09P071)	1969	328	4	2
Pont JCT Montreux (09PI083)	1970	28	6	2
Pont sur la Baye de Clarens (09P084)	1971	182	2	2
Pont des Vuarennes (09P088)	1970	129	15	2
Pont sur la Baye de Montreux (09P090)	1970	274	62	2
Pont sur La Veraye (09P091)	1970	100	18	3
Viaduc de Chillon (09V092)	1970	2081	31	3
Pont du Cabinet (09P096)	1970	72	10	3
Viaduc de la Plaine du Rhône (09V098)	1970	1162	10	2

Tabelle 6: Brückenanlagen der Teststrecke mit: Baujahr, Länge, mittlere Höhe und Zustandsklasse (ZK) der letzten Inspektion.

Tunnel der Teststrecke

Name	Baujahr	Länge [m]	ZK
Tunnel de Belmont (09T501)	1974	384	2
Tunnel de Chauderon (09T502)	1972	222	3
Tunnel de la Criblette (09T503)	1974	294	3
Tunnel du Flonzaley (09T504)	1973	723	2
Tunnel de Glion (09T505)	1970	1348	2

Tabelle 7: Tunnelanlagen der Teststrecke mit: Baujahr, Länge, und Zustandsklasse (ZK) der letzten Inspektion.

3.1.1 Die Pont sur La Sorge im Detail

Die *Pont sur La Sorge* befindet sich nordwestlich von Lausanne und östlich des Autobahnkreuzes Villars-Ste-Croix. Sie überspannt den kleinen Fluss La Sorge, der in einem Tobel verläuft. Ein Übersichtsplan ist in Abbildung 27 zu sehen. Die *Pont sur La Sorge* ist eine Bauanlage und besteht aus zwei Brückenbauwerken, die mit *droit*[3] (rechts) und *gauche* (links) bezeichnet werden. Beide weisen einen Kastenquerschnitt auf und sind auch sonst nahezu identisch. Bei beiden Bauwerken beträgt die Länge ca. 180m und die maximale Höhe ca. 35m. Mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) von 91916 Fahrzeugen, gemessen im Jahr 2023, handelt es sich um ein stark frequentiertes Infrastrukturobjekt (ASTRA, 2023b).

Abbildung 28 sowie die beiden folgenden Abbildungen zeigen den Querschnitt, den Längsschnitt und den Grundriss der *Pont sur La Sorge – droit*. Die Kurzbezeichnungen in den Abbildungen, wie «EN_1», helfen, die Bauwerksteile zu lokalisieren. Die beiden Brückenbauwerke bestehen jeweils aus 30 kostenrelevanten Bauwerksteilen. Diese sind in Tabelle 8 für das Brückenbauwerk *droit* mit folgenden Daten aufgelistet: Bezeichnung, Typ, Zustandsklasse (ZK), Inspektionsdatum, Ausmass und dessen Einheit, generalisierter Bauwerksteiltyp und (primärer) Schadensprozess (vgl. Kapitel 1.4).

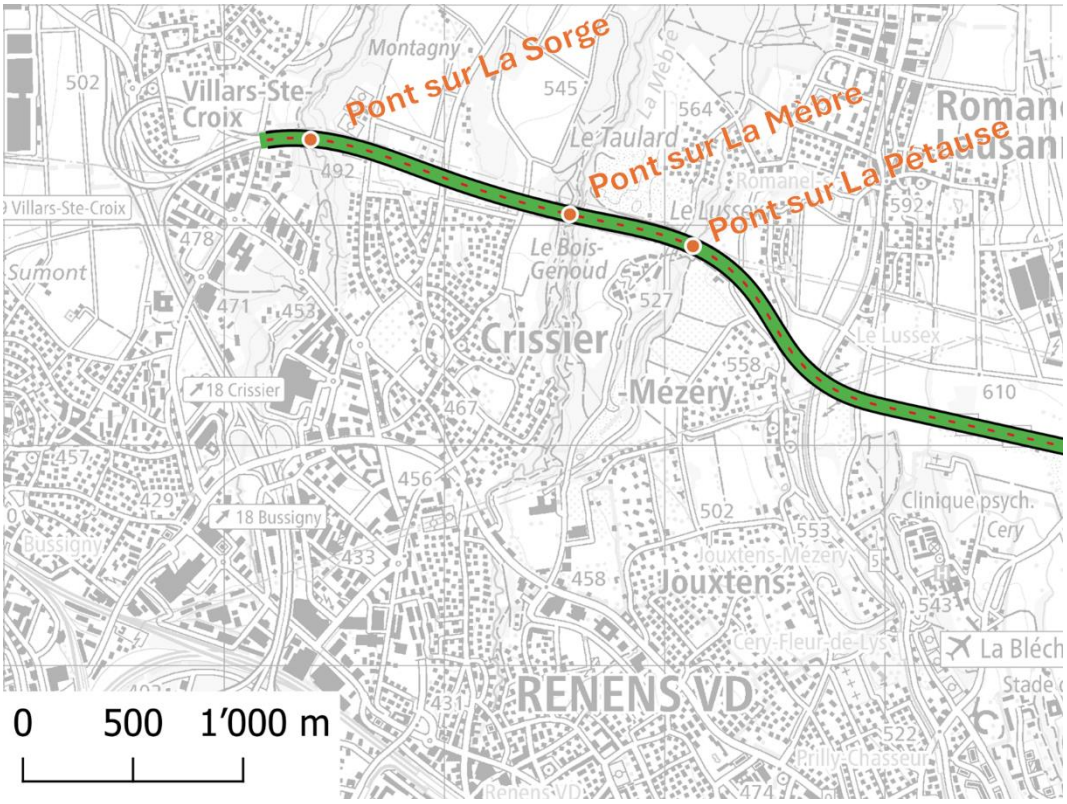


Abbildung 27: Übersichtsplan der *Pont sur La Sorge* mit Beschriftung. Kartenbasis © swisstopo, 01.10.25.

[3] Das *droit*-Bauwerk bezeichnet immer dasjenige, welches sich auf der «+»-Achse befindet oder sich in positiver Achsenrichtung auf der rechten Seite befindet.

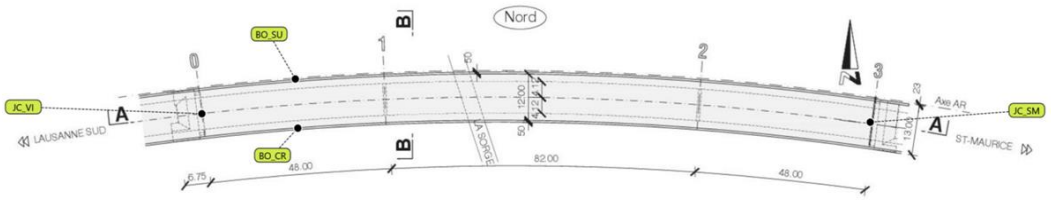


Abbildung 28: Grundriss *Pont sur La Sorge - droit* mit Bauwerksteilbezeichnung (ASTRA, 2024a).

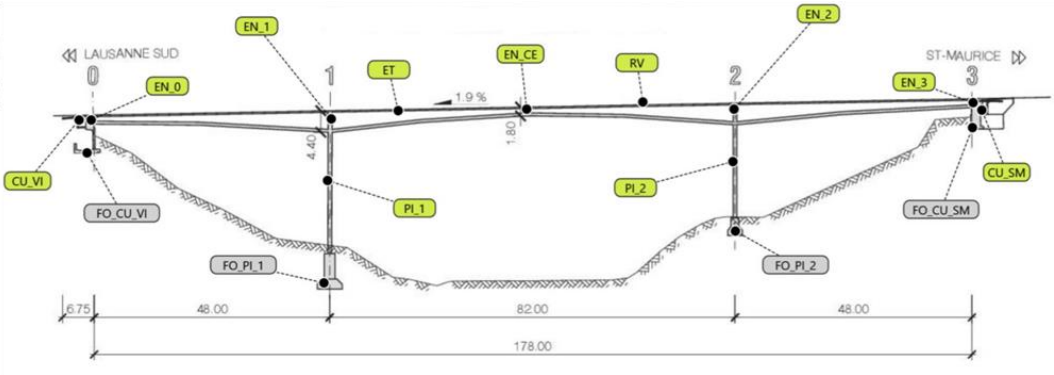


Abbildung 29: Längsschnitt *Pont sur La Sorge - droit* mit Bauwerksteilbezeichnung (ASTRA, 2024a).

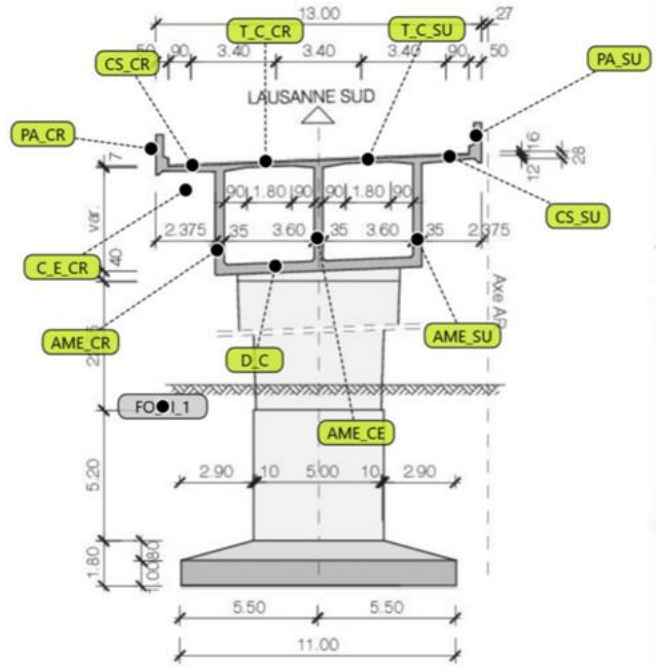


Abbildung 30: Querschnitt *Pont sur La Sorge - droit* mit Bauwerksteilbezeichnung (ASTRA, 2024a).

Bauwerksteile der *Pont sur La Sorge - droit*

Bez.	Typ	ZK	Insp. Datum	Aus-mass	Ein-heit	Gen. Bwt. Nr.	Schadens-prozess
AME_CE	Steg	2	2019	795	m²	10	10
AME_CR	Steg	2	2019	870	m²	10	10
AME_SU	Steg	2	2019	870	m²	10	10
AP_SM_CR	Verformungslager	2	2019	1	Stk	18	70
AP_SM_SU	Verformungslager	2	2019	1	Stk	18	70
AP_VI_CR	Verformungslager	2	2019	1	Stk	18	70
AP_VI_SU	Verformungslager	2	2019	1	Stk	18	70
BO_CR	Randborde	2	2019	220	m²	16	10
BO_SU	Randborde	2	2019	220	m²	16	10
CS_CR	Kragplatte	2	2019	422	m²	14	10
CS_SU	Kragplatte	2	2019	422	m²	14	10
CU_SM	Widerlager	2	2019	96	m²	5	10
CU_VI	Widerlager	2	2019	75	m²	5	10
D_C	Untere Platte	2	2019	2750	m²	10	10
EN_0	Querträger	2	2019	19	m²	10	10
EN_1	Querträger	2	2019	46	m²	10	10
EN_2	Querträger	2	2019	46	m²	10	10
EN_3	Querträger	2	2019	19	m²	10	10
EN_CE	Querträger	2	2019	19	m²	10	10
ET	Fahrbahnabdichtung	2	2019	2286	m²	23	90
JC_SM	Fahrbahnübergang	2	2019	13	m	19	60
JC_VI	Verformbare Fuge	2	2019	13	m	19	60
LO_CU_SM	Verankerte Mauer	2	2019	1	m²	7	10
PA_CR	Leitmauer	2	2019	188	m²	16	10
PA_SU	Leitmauer	2	2019	188	m²	16	10
PI_1	Einzelpfeiler	2	2019	220	m²	9	10
PI_2	Einzelpfeiler	2	2019	305	m²	9	10
RV	Deckschicht	2	2019	2160	m²	24	80
T_C_CR	Fahrbahnplatte	2	2019	641	m²	14	10
T_C_SU	Fahrbahnplatte	2	2019	641	m²	14	10

Tabelle 8: Bauwerksteile der *Pont sur La Sorge – droit*, identisch mit denen der Seite *gauche*.

3.2 Trassee

Die Teststrecke liegt auf der N9 im Achssegment VILLARS-STE-CROIX – Brig und reicht vom Bezugspunkt 0 mit U-Distanz 0 m bis zum Bezugspunkt 420 mit U-Distanz 500 m, was einer Länge von ca. 42 km entspricht. Jede Fahrtrichtung hat eine eigene Achse, die aus dem Schlüsseleigentümer CH, der Achsnummer N9 und dem Lagecode «+» oder «-» besteht, wobei der Lagecode hier auch als positive bzw. negative Achsrichtung verstanden wird. Die Achsen ausgedrückt im RBBS ist Grundlage für die Definition von der ganzen Infrastruktur im Raum. Die Daten für das Trassee (Begriffswahl erläutert in Kapitel 1.4) sind also nicht an ein Bauwerksteil gebunden, das wiederum zu einem Bauwerk gehört, sondern sie können immer ganz genau im Raum platziert werden. Bei einem kontinuierlich eingebauten Deckbelag ist immer klar, wo dieser beginnt und endet. Für die Zustandsbewertung wird vom ASTRA ein Raster aus Bewertungsflächen (Begriff erläutert in Kapitel 1.4) definiert, für die Teststrecke sind das ca. 1850. Über die Bewertungsflächen werden die Informationen zum Zustand gesammelt. Diese werden zusammen mit dem Deckbelagsalter in den Methoden zur Abschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Zustands verwendet. Für die Prognose und Bündelung von Unterhaltsmassnahmen wird diese Information jedoch aggregiert, um für grössere Teilstücke des Trassees Massnahmenvorschläge zu machen.

3.2.1 Erhaltungsobjekte

Innerhalb einer Mehrjahresplanung werden die Unterhaltsmassnahmen für sogenannte Erhaltungsobjekte prognostiziert. «Das Erhaltungsobjekt definiert den räumlichen Bereich der Fahrbahn, welchem später eine bestimmte Erhaltungsmassnahme zugeordnet werden soll» (ASTRA, 2024b). Dabei muss ein Erhaltungsobjekt zusammenhängend sein und innerhalb eines Achssegment liegen. Meist geht es über die Gesamte Fahrbahnfläche, kann aber auch auf die dazugehörigen Streifen beschränkt werden. Entlang der Achse kann sich ein Erhaltungsobjekt auch sehr weit erstrecken. Dem Erhaltungsplaner stehen Informationen wie der Schichtaufbau, das Alter und die Schichtsorte des Deckbelags oder die Zustandsmerkmale entlang des Achsbands zur Verfügung. Wichtig zu betonen ist, dass Erhaltungsobjekte eine Wahl des Erhaltungsplaners sind und nicht automatisch generiert werden, aber sich aus dem Zustandskontext implizit ergeben. Jedes Erhaltungsobjekt hat noch diverse andere Attribute, wobei die Details im entsprechenden Datenerfassungshandbuch beschrieben sind (ASTRA, 2024b). Abbildung 31 zeigt beispielhaft, wie für den Streifen +1 und +2 sowie den Mittelstreifen +9 Erhaltungsobjekte entlang des Achsbands definiert sind.

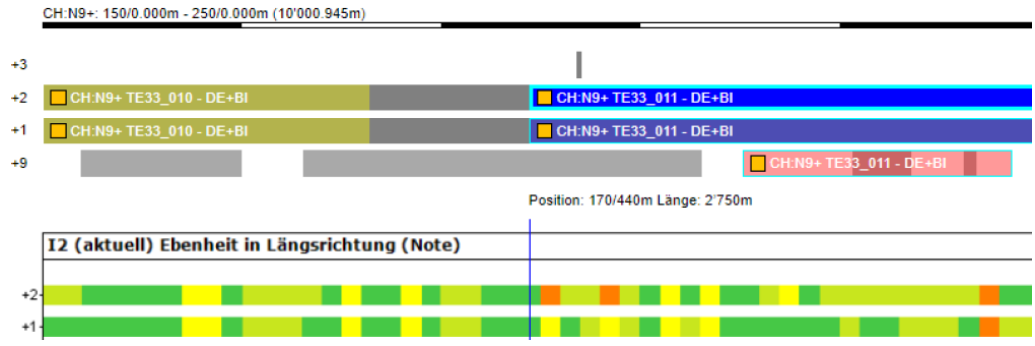


Abbildung 31: Achsbanddarstellung der potenziellen Erhaltungsobjekte und des Zustandsindex I2 (ASTRA, 2024c, S. 14).

Im Modul PMS, der Fachapplikation Trassee, werden die Daten der Bewertungsflächen genutzt, um für die Erhebungsjahre eine aggregierte Indexnote zu berechnen, was längengewichtet für jedes Erhaltungsobjekt geschieht. Das Modul PMS kennt jedoch keine Methode zur Ermittlung fehlender Daten. Für die Abschätzung der Zukünftigen Indexnote kann mithilfe einer aggregierten Indexnote, dem Alter der Deckschicht und einer vom Nutzer gewählten Verhaltensklasse eine Zustandsindexnote mit einer Potenzfunktion der Form $a \cdot t^b + c$ in die Zukunft prognostiziert werden. Für die Nationalstrassen sind dabei vier Verhaltensklassen (VK1 bis VK4) definiert, um sowohl langsame als auch schnelle Zustandsverschlechterung abzubilden. Abbildung 32 zeigt die möglichen Verlaufskurven für die Zustandsprognose des Index I3.

Basierend auf dieser Ausgangslage muss für diese Arbeit auch die Möglichkeit bestehen, Unterhaltsmassnahmen zu definieren, ohne dass zuvor manuell ein Erhaltungsobjekt erstellt werden muss. Zu diesem Zweck werden im nächsten Unterkapitel 3.2.2 «Trassee-Teilstücke» definiert.

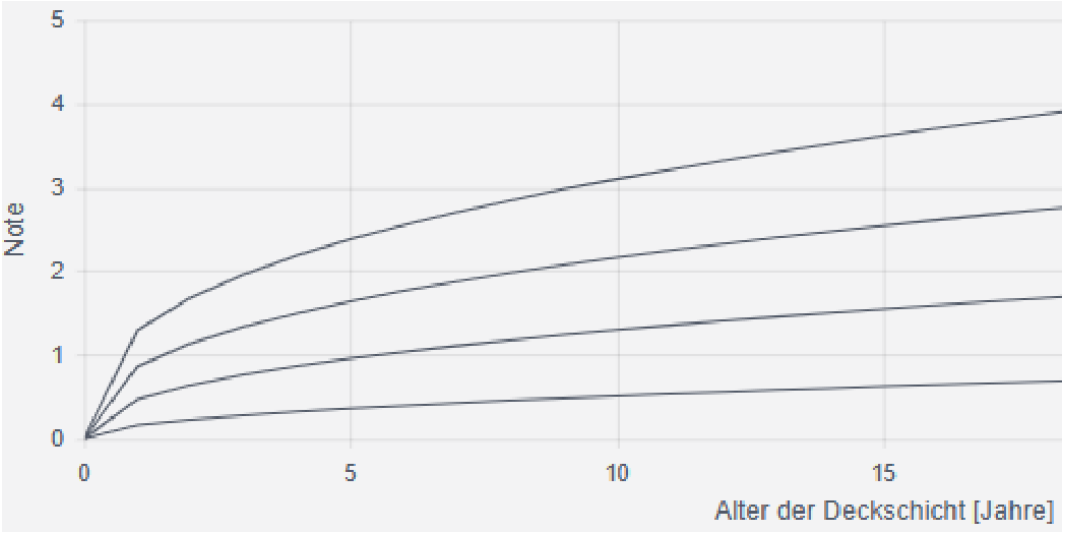


Abbildung 32: Verlaufskurve für die Zustandsprognose im ASTRA für Index I3 (ASTRA, 2024b, S. 91). Die Linien sind von unten nach oben VK1 bis VK4.

3.2.2 Trassee Teilstücke

Für die Methodik zur Prognose (vgl. Kapitel 6) und zur Bündelung von Massnahmen (vgl. Kapitel 7) wird die Teststrecke in Erhaltungsobjekte von ca. 100 m bis 1000 m, meist aber 500 m Länge, aufgeteilt. Somit wird für das gesamte Achssegment prognostiziert, welche Unterhaltsmassnahmen nötig sind. Um eine klare Abgrenzung zwischen der Modellierung im Modul PMS und der leicht angepassten Version für diesen Bericht zu schaffen, werden die kontinuierlich gebildeten Erhaltungsobjekte „Trassee-Teilstücke" genannt, da das Trasse, wie in der Abbildung 33 zu sehen, in Teilstücke aufgeteilt wird. Die Teilstücke sind in Blau nummeriert und die Trasse-Teilstücke, zusätzlich unterschieden in den Fahrtrichtungen, darin enthalten. Bezeichnet werden die Trasse-Teilstücke mit T gefolgt von einer Zahl. In Abbildung 34 sind die Trassee-Teilstücke auf der Karte dargestellt. Für das Modul PMS wurden also für jede Fahrtrichtung aneinandergereihte Erhaltungsobjekte erstellt. Zuerst für die Brücken und die Tunnel und danach auf der Freien Strecke dazwischen. Dies ermöglicht die Anwendung der Methoden, verhindert jedoch, dass die Grenzen von Erhaltungsobjekten

z. B. an Einbaugrenzen (in Längsrichtung) oder Zustandsmerkmalen der Fahrbahn gewählt werden. Die gewählte Netzwerkabstraktion wird noch detaillierter in Kapitel 7.2 erläutert.

Die ganze Teststrecke aufgeteilt in die Teilstücke ist in Tabelle 9 und Tabelle 10 gezeigt, also von Villars-Sainte-Croix (T2, T3) bis Rennaz (T180, T191). Trassee-Teilstücke, die zumindest teilweise auf einer Brücke oder in einem Tunnel liegen, sind dabei hellgrau bzw. dunkelgrau hinterlegt. Teilweise, weil die Trennung immer an Grenzen von Bewertungsflächen gemacht wird und diese nicht an den Grenzen von Brücken oder Tunnel sind. Die Spalten «Start» und «Ende» enthalten die aus dem Bezugspunkt und der U-Distanz ermittelten Kilometerangaben.

Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass die Trassee-Teilstücke die Wahl von Erhaltungsobjekten simulieren sollen. Trassee-Teilstücke werden jedoch für das gesamte Netz definiert, also auch wenn kein Erhaltungsbedarf besteht, und es wird nicht zwischen Fahrspuren in einer Fahrtrichtung unterschieden. Trassee-Teilstücke werden gebildet, um Methoden zur Prognose und Bündelung von Massnahmen zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Methodiken sind somit auch von dieser Einteilung abhängig. Als erste Teilstücke wurden Brücken und Tunnel ausgewählt, was sinnvoll erscheint, da sich der Belagsaufbau dort von dem der freien Strecke unterscheidet. Anschliessend wurden Teilstücke mit einer Länge von 500 m auf der freien Strecke dazwischen ausgewählt. Da eine Baustelle im ASTRA eine Länge von ca. 5 km haben soll, ist dies eine gute Länge als Teiler davon. Der Diskussion kann somit vorweggenommen werden, dass die Wahl der Trassee-Teilstücke in dieser Arbeit nicht an «homogenen» Belagsgrenzen erfolgt. Dies ist eine Limitation, die sich mit entsprechenden vorhandenen Grundlagedaten anders gestalten lässt.

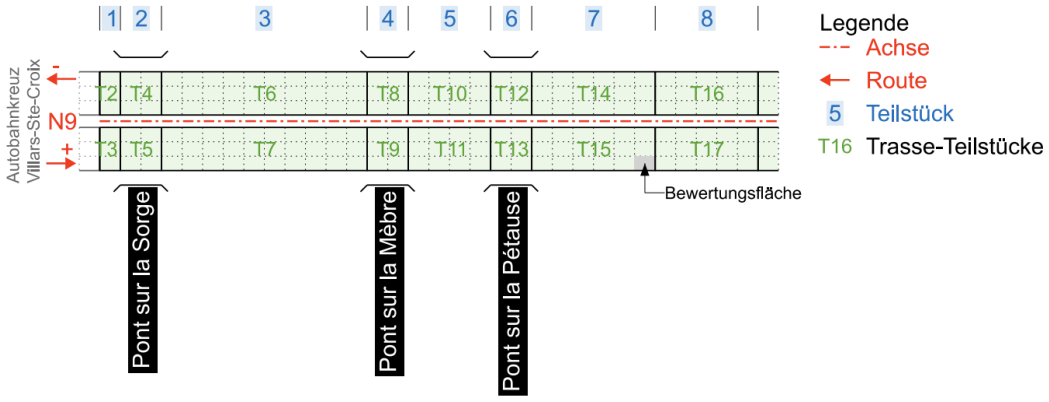


Abbildung 33: Beispielhafte Darstellung von den gewählten Erhaltungsobjekten bzw. Trasse-Teilstücke für das Fallbeispiel.

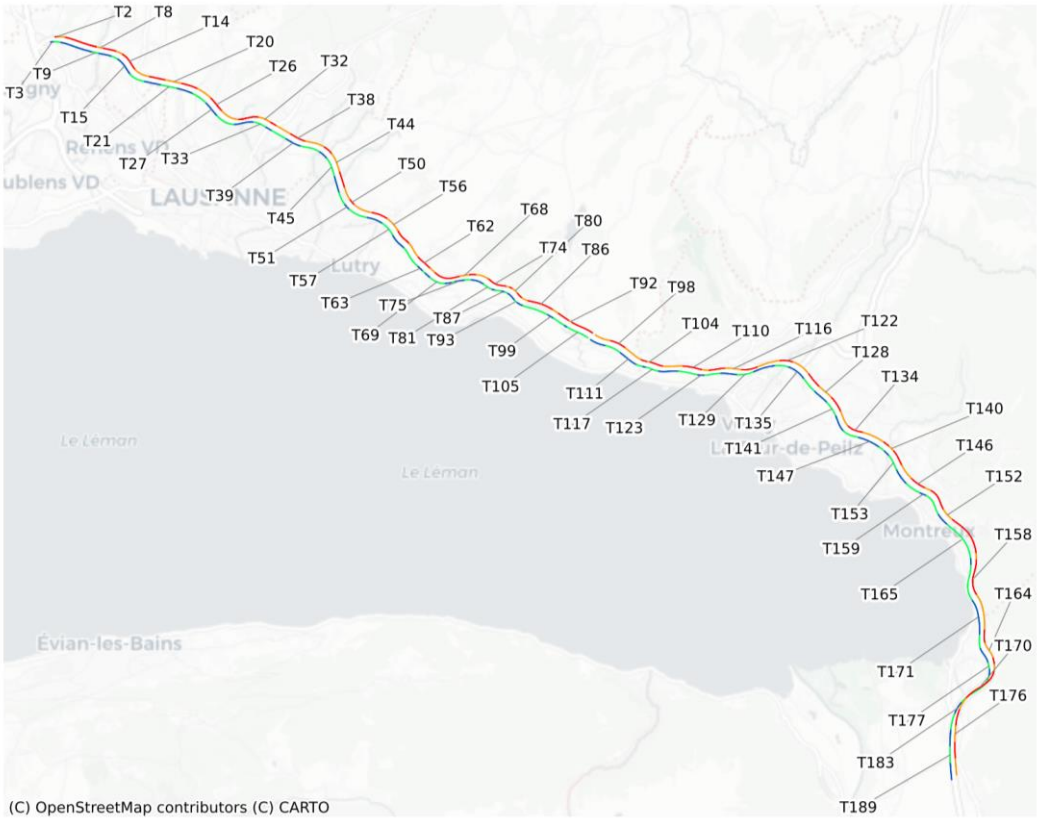


Abbildung 34: Trassee-Teilstücke in positiver (Grün und Blau) und negativer (Rot und Orange) Achsenrichtung (Farben abwechselnd zur Unterscheidung, Beschriftung nur für jedes dritte Trasse-Teilstück).

Trassee Portfolio in negativer Achsenrichtung

Bez.	Start [km]	Ende [km]	Länge [m]	Bez.	Start [km]	Ende [km]	Länge [m]	Bez.	Start [km]	Ende [km]	Länge [m]
T2	0.00	0.11	110	T62	14.50	15.00	500	T122	26.50	26.90	400
T4	0.11	1.10	210	T64	15.00	15.20	200	T124	26.90	27.50	600
T6	1.10	2.10	1000	T66	15.20	16.00	800	T126	27.50	28.00	500
T8	2.10	2.30	200	T68	16.00	16.30	300	T128	28.00	28.50	500
T10	2.30	2.70	400	T70	16.30	16.50	200	T130	28.50	29.00	500
T12	2.70	2.90	200	T72	16.50	16.90	400	T132	29.00	29.50	500
T14	2.90	3.50	600	T74	16.90	17.50	600	T134	29.50	30.00	500
T16	3.50	4.00	500	T76	17.50	17.60	100	T136	30.00	30.70	700
T18	4.00	4.50	500	T78	17.60	17.70	100	T138	30.70	30.90	200
T20	4.50	5.00	500	T80	17.70	17.90	200	T140	30.90	31.10	200
T22	5.00	5.50	500	T82	17.90	18.10	200	T142	31.10	31.60	500
T24	5.50	6.00	500	T84	18.10	18.30	200	T144	31.60	32.10	500
T26	6.00	6.50	500	T86	18.30	19.10	800	T146	32.10	32.60	500
T28	6.50	7.10	600	T88	19.10	19.30	200	T148	32.60	32.80	200
T30	7.10	7.70	600	T90	19.30	19.70	400	T150	32.80	33.50	700
T32	7.70	8.10	400	T92	19.70	19.80	100	T152	33.50	33.90	400
T34	8.10	8.30	200	T94	19.80	20.50	700	T154	33.90	35.20	1300
T36	8.30	8.80	500	T96	20.50	21.10	600	T156	35.20	35.40	200
T38	8.80	9.30	500	T98	21.10	21.60	500	T158	35.40	36.50	1100
T40	9.30	9.90	600	T100	21.60	22.20	600	T160	36.50	37.60	1100
T42	9.90	10.20	300	T102	22.20	22.40	200	T162	37.60	38.00	400
T44	10.20	10.80	600	T104	22.40	22.50	100	T164	38.00	38.50	500
T46	10.80	11.30	500	T106	22.50	22.90	400	T166	38.50	38.70	200
T48	11.30	11.70	400	T108	22.90	23.50	600	T168	38.70	38.90	200
T50	11.70	11.90	200	T110	23.50	24.10	600	T170	38.90	40.10	1200
T52	11.90	12.50	600	T112	24.10	24.30	200	T172	40.10	40.50	400
T54	12.50	13.00	500	T114	24.30	24.80	500	T174	40.50	41.00	500
T56	13.00	13.50	500	T116	24.80	25.30	500	T176	41.00	41.50	500
T58	13.50	14.00	500	T118	25.30	25.80	500	T178	41.50	42.00	500
T60	14.00	14.50	500	T120	25.80	26.50	700	T180	42.00	42.50	500

Tabelle 9: Trassee-Teilstücke auf der positiven Achssegment Richtung von Villars-Sainte-Croix (T2) nach Rennaz (T180). Hellgrau, Trassee-Teilstücke, die teilweise über eine Brücke führen und Dunkelgrau, Trassee-Teilstücke, die teilweise im Tunnel liegen.

Trassee Portfolio in positiver Achsenrichtung

Bez.	Start [km]	Ende [km]	Länge [m]	Bez.	Start [km]	Ende [km]	Länge [m]	Bez.	Start [km]	Ende [km]	Länge [m]
T3	0.00	0.11	110	T67	15.00	15.20	200	T131	25.80	26.50	700
T5	0.11	1.10	210	T69	15.20	15.70	500	T133	26.50	26.90	400
T7	1.10	2.10	1000	T71	15.70	15.90	200	T135	26.90	27.50	600
T9	2.10	2.30	200	T73	15.90	16.00	100	T137	27.50	28.00	500
T11	2.30	2.70	400	T75	16.00	16.30	300	T139	28.00	28.50	500
T13	2.70	2.90	200	T77	16.30	16.50	200	T141	28.50	29.00	500
T15	2.90	3.50	600	T79	16.50	16.90	400	T143	29.00	29.50	500
T17	3.50	4.00	500	T81	16.90	17.20	300	T145	29.50	30.00	500
T19	4.00	4.50	500	T83	17.20	17.30	100	T147	30.00	30.70	700
T21	4.50	5.00	500	T85	17.30	17.50	200	T149	30.70	30.90	200
T23	5.00	5.50	500	T87	17.50	17.60	100	T151	30.90	31.10	200
T25	5.50	6.00	500	T89	17.60	17.70	100	T153	31.10	31.60	500
T27	6.00	6.50	500	T91	17.70	18.00	300	T155	31.60	32.10	500
T29	6.50	7.10	600	T93	18.00	18.10	100	T157	32.10	32.60	500
T31	7.10	7.70	600	T95	18.10	18.30	200	T159	32.60	32.80	200
T33	7.70	8.10	400	T97	18.30	19.10	800	T161	32.80	33.50	700
T35	8.10	8.30	200	T99	19.10	19.30	200	T163	33.50	33.90	400
T37	8.30	8.80	500	T101	19.30	19.70	400	T165	33.90	35.20	1300
T39	8.80	9.30	500	T103	19.70	19.80	100	T167	35.20	35.40	200
T41	9.30	9.90	600	T105	19.80	20.50	700	T169	35.40	36.50	1100
T43	9.90	10.20	300	T107	20.50	21.10	600	T171	36.50	37.60	1100
T45	10.20	10.80	600	T109	21.10	21.60	500	T173	37.60	38.00	400
T47	10.80	11.30	500	T111	21.60	22.20	600	T175	38.00	38.50	500
T49	11.30	11.70	400	T113	22.20	22.40	200	T177	38.50	38.70	200
T51	11.70	11.90	200	T115	22.40	22.50	100	T179	38.70	38.90	200
T53	11.90	12.50	600	T117	22.50	22.90	400	T181	38.90	40.10	1200
T55	12.50	13.00	500	T119	22.90	23.50	600	T183	40.10	40.50	400
T57	13.00	13.50	500	T121	23.50	24.10	600	T185	40.50	41.00	500
T59	13.50	14.00	500	T123	24.10	24.30	200	T187	41.00	41.50	500
T61	14.00	14.70	700	T125	24.30	24.80	500	T189	41.50	42.00	500
T63	14.70	14.90	200	T127	24.80	25.30	500	T191	42.00	42.50	500
T65	14.90	15.00	100	T129	25.30	25.80	500				

Tabelle 10: Trassee-Teilstücke auf der positiven Achssegment Richtung von Villars-Sainte-Croix (T3) nach Rennaz (T191). Hellgrau, Trassee-Teilstücke, die teilweise über eine Brücke führen und Dunkelgrau, Trassee-Teilstücke, die teilweise im Tunnel liegen.

4 Methodik

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die verschiedenen Methoden dieses Forschungsberichts gegeben. Die in den einzelnen Kapiteln vorgestellten Methoden sind dort ausführlicher beschrieben.

4.1 Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Infrastrukturzuständen (Kapitel 5)

Für die Abschätzung von Infrastrukturzuständen wurden die Methoden für die Anlagearten Brücken und Trassee separat erarbeitet, da diese unterschiedliche Zustandsskalen verwenden. Beim Trassee bzw. der Fahrbahn werden nur die Zustandsmerkmalen I0, I2, I3 und I4 betrachtet. Für Tunnels wurden Bemerkungen zur Adaption der Methodik verfasst.

4.1.1 Brücken (Kapitel 5.1)

4.1.1.1 Abschätzung des gegenwärtigen Zustands (Kapitel 5.1.1)
Für die Abschätzung des gegenwärtigen Zustands von Brückenbauwerksteilen wurde eine Methodik verwendet, welche anhand von einfach zugänglichen Einflussgrössen mithilfe eines Bayes'schen Netzes eine probabilistische Abschätzung des gegenwärtigen Zustandes geben kann. Die gewählten Einflussgrössen (Alter, Verkehr, Umwelt) wurden mittels des Analytischen Hierarchieprozesses (AHP) durch Experteninterviews gewichtet. Dies resultierte für verschiedene generalisierte Bauwerksteiltypen und Schadensprozesse in bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen, welche abhängig von den Einflussgrössen, eine probabilistische Zustandsabschätzung enthalten.

4.1.1.2 Abschätzung des zukünftigen Zustands (Kapitel 5.1.2)
Für die Abschätzung des zukünftigen Zustands von Brückenbauwerksteilen wurden Verfallsmatrizen verwendet. Diese Verfallsmatrizen sind spezifiziert durch den primären Schadensprozess und die Auswahl der Einflusskategorie (negativ, neutral, positiv). Um die Zustände verschiedener Bauwerksteile aus unterschiedlichen Inspektionsjahren in einem gemeinsamen Jahr vergleichbar darzustellen, wurde eine Methode verwendet, welche die vorhandenen 5-Jahres-Matrizen in 1-Jahres-Matrizen umwandelt.

4.1.2 Trassee (Kapitel 5.2)

4.1.2.1 Abschätzung des gegenwärtigen Zustands (Kapitel 5.2.1)
Für die Abschätzung des gegenwärtigen Zustands von Trassee-Bewertungsflächen wurde eine Methode verwendet, welche fehlende Zustandsdaten anhand der räumlichen Korrelation abschätzen kann. Dafür wurde ein hybrider Ansatz von Kriging mit einem künstlichen neuralen Netz (ANN) verwendet.

4.1.2.2 Abschätzung des zukünftigen Zustands (Kapitel 5.2.2)
Für die Abschätzung des zukünftigen Zustands von Trassee-Bewertungsflächen wurde ein erweiterter Kalman-Filter (EKF) verwendet. Dieser basiert auf einer angeglichenen Prozessfunktion, welche die Zustandsentwicklung beschreibt, basierend auf

den vorhandenen Zustandsdaten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags. Der Filter hat die Fähigkeit aufgrund von neuen Informationen (Messwerte) die Verlaufskurve der Zustandsentwicklung einer Bewertungsfläche anzupassen. Mit dieser Methode kann nicht nur der Erwartungswert des Zustandes in der Zukunft erörtert werden, sondern auch die Varianz dieser Abschätzung als Mass der Unsicherheit berücksichtigt werden.

4.2 Prognose von Unterhaltsmassnahmen (Kapitel 6)

Auch bei der Prognose von Unterhaltsmassnahmen unterscheidet sich die Methodik je nach Anlageart (Brücken oder Trasse). Beim Trassee bzw. den Belägen der Fahrbahn liegt nur für die Zustandsmerkmale I0, I2, I3 und I4 eine Abschätzung vor. Mit der vorgestellten Methode kann daher nur eine Unterhaltsmassnahme für Beläge ohne spezielle Funktion prognostiziert werden. Für andere Beläge sind meist andere Zustandsmerkmale massgeben für eine Unterhaltsmassnahme.

4.2.1 Brücken (Kapitel 6.2)

Für die Prognose von Unterhaltsmassnahmen an Brücken wurde eine Methodik verwendet, welche nicht nur Bedarf prognostiziert, sondern auch gleich eine Priorisierung verschiedener Massnahmen ermöglicht. Mit vergleichbaren Daten des gegenwärtigen und zukünftigen Zustands auf einem definierten Teilnetz kann anhand von standardisierten Fehlerbäumen das Sofortmassnahmenrisiko bei einer Brücke berechnet werden. Die auf Grundlage der Wahrscheinlichkeit einer auf der Strategie beruhenden Massnahme sowie der dafür anfallenden Kosten empfohlenen Unterhaltsmassnahmen können bei Ressourcenknappheit anhand des Risikos priorisiert werden.

4.2.2 Trassee (Kapitel 6.3)

Ähnlich wie für Brücken werden auch für das Trassee mögliche Unterhaltsmassnahmen aufgrund der Zustandsdaten und der Strategie prognostiziert. Im Gegensatz zu den Brücken werden jedoch nicht Fehlerbäume zur Abschätzung des Risikos der Notwendigkeit einer Sofortmassnahme benutzt, sondern das Zustandsbasierte Risiko der Notwendigkeit eines totalen Belagsersatzes verwendet. Diese Risikobewertung bietet eine vergleichbare Grundlage zur Priorisierung von Unterhaltsmassnahmen.

4.3 Automatische Bündelung von Massnahmen (Kapitel 7)

Bei der Automatischen Bündelung von Massnahmen wurde eine Methodik verwendet, welche zuerst den Nettonutzen von Unterhaltsmassnahmen berechnet, die Abhängigkeiten verschiedener Unterhaltsmassnahmen prüft, um Synergien zu nutzen, und über ein Netzwerkflussmodell ein optimiertes Massnahmenprogramm vorschlagen kann. Neben ökonomischen und funktionalen Abhängigkeiten werden auch übergeordnete Ziele aus der Unterhaltsplanung Nationalstrassen (UPlaNS) bezüglich der Rückkehrperiode und des Baustellenabstands berücksichtigt.

5 Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Infrastrukturzuständen

Infrastrukturbetreiber sind dafür verantwortlich, die Infrastruktur so zu betreiben, dass ein Leistungsniveau sichergestellt wird, das den Bedürfnissen der Anspruchsgruppen bestmöglich entspricht und den grösstmöglichen Nutzen bietet. Ihr Auftrag umfasst nicht nur den laufenden Betrieb, sondern auch den Unterhalt und die Weiterentwicklung der Infrastruktur. In einem Land wie der Schweiz, in dem kaum noch neue Infrastruktur gebaut wird und viele bestehende Anlagen bereits ein gewisses Alter erreicht haben, hat der Unterhalt eine zunehmend grössere Bedeutung. Der gegenwärtige Zustand sowie Abschätzungen zum zukünftigen Zustand sind für den Unterhaltsplaner notwendige Informationen, um den optimalen Zeitpunkt für Unterhaltsmassnahmen zu bestimmen – insbesondere dann, wenn begrenzte Ressourcen in Bezug auf Finanzen oder Fachkräfte eine ausgewogene Planung erfordern. Die Forschung zeigt zunehmend, dass digitale Ansätze und datenbasierte Algorithmen Erhaltungsplaner bei vielen Aufgaben unterstützen können, wodurch diese effizienter und effektiver ausgeführt werden. Der Vorteil solcher Ansätze liegt darin, dass sie quantitative Ergebnisse liefern, die im Vergleich zu qualitativen Vorgehensweisen transparente und konsistente Entscheidungen ermöglichen. In den anderen Kapiteln dieses Forschungsberichtes werden verschiedene Ansätze vorgestellt, wie zum Beispiel die Abschätzung möglicher Unterhaltsmassnahmen in Kapitel 6 oder die automatische Bündelung von Massnahmen in Kapitel 7. Weiterführende Ansätze wie die dort vorgestellten sind von gegenwärtigen und zukünftigen Zustandsdaten abhängig. Aus diesem Grund ist das Ziel dieses Kapitels den Erhaltungsplanern einen möglichst vollständigen und vergleichbaren Überblick zu den gegenwärtigen und zukünftigen Zuständen zu ermöglichen. In diesem Kapitel werden dafür Methoden zur Abschätzung des Zustands vorgestellt.

Im ersten Teil dieses Kapitels liegt der Fokus auf Brücken, wobei zuerst die Methodik zur Abschätzung des gegenwärtigen Zustands vorgestellt wird, welche es ermöglicht für alle Bauwerksteile vergleichbare Zustandsdaten zum aktuellen Zeitpunkt zu haben. Danach wird die Methodik zur Abschätzung des zukünftigen Zustands vorgestellt. Anschliessend werden die Methoden an der Teststrecke angewandt und diskutiert. Im zweiten Teil dieses Kapitels liegt der Fokus auf dem Trassee, wobei Methoden zur Abschätzung des gegenwärtigen und des zukünftigen Zustands vorgestellt und anschliessend an der Teststrecke angewandt und diskutiert werden. In einem letzten Teil werden noch Bemerkungen zur Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Zuständen in Bezug auf Tunnel gemacht.

5.1 Brücken

Die Abschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Zustands von Brücken findet, wie bereits die Erfassung der Zustandsdaten in KUBA auf Bauwerksteilebene statt (wobei Schadensgruppen die Bewertungseinheit sind). Bauwerksteile von Brücken werden in diskreten Zustandsklassen von 1 bis 5 beschrieben. Ein Bauwerksteil in Zustandsklasse 1 ist in gutem Zustand und ein Bauwerksteil in Zustandsklasse 5 ist in alarmierendem Zustand. Die genauere Definition der Klassifizierung des Zustands von Brückenbauwerksteilen in der Schweiz wurde bereits in der vorangehenden Terminologie (Kapitel 1.4) beschrieben. Für die Abschätzungen der Zustände wurde ebenfalls auf die in KUBA bereits definierten Schadensprozesse (Terminologie, Kapitel 1.4) zurückgegriffen.

5.1.1 Abschätzung des gegenwärtigen Zustands

5.1.1.1 Keine Zustandsdaten vorhanden

Für die Betrachtung des Ausgangsszenarios, wenn keine Zustandsdaten vorhanden sind, bezieht sich auf quantitative oder qualitative Informationen, die im direkten Zusammenhang den Zustand der Brücke oder von Brückenbauwerksteilen beschreiben. Diese Zustandsdaten liegen nicht vor, wenn zum Beispiel noch nie Zustandsdaten erhoben wurden oder historische Daten verloren gingen, sei es durch physischen Verlust der Erhebungsdokumente oder durch Fehler bei der Datenmigration (z.B. bei der Digitalisierung der Daten, oder einem Wechsel der Datenbank). Die konzeptuell einfachste Lösung für fehlende Zustandsdaten wäre es, diese einfach zu erheben. Je nach Anzahl der zu inspizierenden Brücken wäre dies jedoch eine ressourcenintensive Aufgabe limitiert durch verfügbares Personal, Geld und Zeit. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel eine Methodik vorgestellt, welche anhand von einfach zugänglichen Einflussgrössen eine realitätsnahe, schnelle und Ressourcen schonende Abschätzung des gegenwärtigen Zustands von Bauwerksteilen von Brücken ermöglicht. Die betrachteten Einflussgrössen umfassen das Alter, in dem sich ein Bauwerksteil bezogen auf die erwartete Nutzungsdauer befindet, das Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung (kurz Verkehr) sowie die vorhandenen Umwelteinflüsse (kurz Umwelt). Diese Einflüsse werden als Haupteinflussgrössen der Zustandsentwicklung angesehen und sind nachfolgend noch genauer beschrieben.

Die Methodik ermöglicht es über ein Bayes'sches Netz die Einflussgrössen zu verknüpfen und einen probabilistischen Zustandsvektor in Abhängigkeit der Einflusswerte der verschiedenen Einflussgrössen zu berechnen. Dafür werden Tabellen berechnet, welche für alle möglichen Einflusswertekombinationen die bedingte Wahrscheinlichkeit einer Zustandsklasse berechnen und so den Zustandsvektor bilden. Um die bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen für die Abschätzung des gegenwärtigen Zustands zu erhalten, werden die folgenden Schritte angewandt (adaptierte Form von Chuo et al. 2023):

- Bayes'sches Netz der Einflussgrössen aufstellen
- Mögliche Einflusswerte definieren
- Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einflusswerte festlegen
- Gewichtung der Einflussgrössen bestimmen
- Kombinationen durch Monte-Carlo-Simulationen erstellen

- Je Ergebnis die Zustandsklasse berechnen
- Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung berechnen

Für die Methodik zur Abschätzung des gegenwärtigen Zustands hat sich gezeigt, dass es aus Aufwandsgründen bei der Entwicklung des Bayes'schen Netzes und der Herleitung der Gewichtung über den Analytischen Hierarchieprozess (AHP) zielführend ist, die Abschätzung für generalisierte Bauwerksteiltypen (Terminologie, Kapitel 1.4) in Kombination mit dem Schadensprozess vorzunehmen. Dies ist sinnvoll, da die generalisierten Bauwerksteiltypen in KUBA-MS bereits durch die Bündelung ähnlicher kostenbestimmender Bauwerksteiltypen definiert wurden. Dadurch werden die Bauwerksteiltypen nicht nur zusammengefasst, sondern auch gefiltert, ob sie kostenbestimmend sind und somit als relevant für die Erhaltungsplanung eingestuft werden.

Bayes'sches Netz der Einflussgrössen aufstellen

Ein Bayes'sches Netz verknüpft bekannte Werte einzelner Einflussgrössen, um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die davon beeinflusste Variable zu erzeugen. In dieser Methode besteht das Ziel darin, die Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Zustand eines Bauwerksteils zu bestimmen und dafür ein Bayes'sches Netz mit den relevanten Einflussgrössen aufzustellen. Beim Aufstellen wurde darauf geachtet, Einflussgrössen zu wählen, die einerseits allgemein genug sind, um möglichst alle relevanten Einflüsse ganzheitlich abzudecken, und andererseits nur geringfügig voneinander abhängig sind, d.h. weitgehend orthogonal. Diese beiden Ansprüche sind qualitativ betrachtet mehrheitlich erfüllt, wobei eine quantitative Bestätigung nicht möglich ist, und ein gewisser Interpretationsspielraum vorhanden ist. Für diese Methodik wurde für alle generalisierten Bauwerksteiltypen und deren mögliche Kombinationen mit den Schadensprozessen das in Abbildung 35 dargestellte Bayes'sche Netz mit den entsprechenden Einflussgrössen aufgestellt. Die einzelnen Einflussgrössen sind im folgenden Abschnitt • zu den Einflusswerten noch genauer beschrieben.

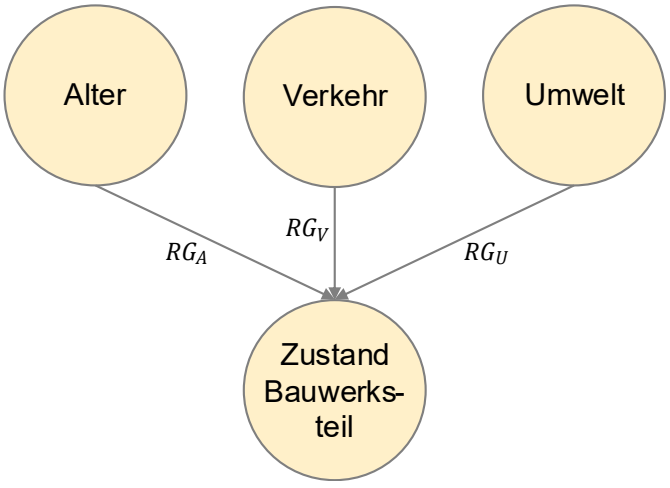


Abbildung 35: Bayes'sches Netz mit den Einflussgrössen für die Abschätzung des Zustands eines Bauwerksteils und den relativen Gewichten (RG) der einzelnen Einflussgrössen.

Mögliche Einflusswerte definieren

Einflusswerte sind festgelegte Werte, welche die Einflussgrössen für spezifische Situationen annehmen können. Ein bereits bekanntes Beispiel ist die Kategorisierung

des Zustands von Bauwerksteilen in die Zustandsklassen 1 bis 5. Ebenso werden für die festgelegten Einflussgrössen mögliche Einflusswerte definiert. Bei der Definition soll eine Balance gefunden werden, sodass Unterschiede zwischen möglichen Einflusswerten einerseits hinreichend erkennbar sind, andererseits aber nicht zu grob abgestuft wirken. Zur Veranschaulichung könnte man zum Beispiel für die Einflussgrösse Alter den Einflusswert der einzelnen Jahre nehmen. Der Unterschied einzelner Jahre, zum Beispiel ob ein Bauwerksteils 22 oder 23 Jahre alt ist, kann kaum einen wahrnehmbaren Unterschied des Zustands des Bauwerksteils darstellen. Die Einflusswerte werden eingeführt um verschiedene Kombinationen der Einflusswerte für die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung des Bayes'schen Netzes berechnen und darstellen zu können. Diese Kategorisierung durch die Einführung von Einflusswerten stellt eine spezifische Situation abstrahiert dar und führt somit zu eher generalisierten Ergebnissen. Generalisierte Ergebnisse sind im Kontext von Abschätzungen ohne Zustandsinformationen auch gar nicht ungewollt, um nicht eine ungerechtfertigte Genauigkeit zu vermitteln. In Tabelle 11 sind die definierten Einflusswerte ordinal entsprechend dem positiven Einfluss auf die Zustandsentwicklung eines Bauwerksteils aufgelistet. Das bedeutet, dass Einflusswerte mit positivem Einfluss zuoberst stehen mit zunehmend negativbeeinflussenden Einflusswerten darunter.

Einflusswerte der Einflussgrössen

Alter	Verkehr	Umwelt	Zustandsklasse
Erstes Viertel	Niedrig	Niedrig	1
Zweites Viertel	Mittel	Mittel	2
Drittes Viertel	Hoch	Hoch	3
Viertes Viertel			4
			5

Tabelle 11: Mögliche Einflusswerte der Einflussgrössen sowie die möglichen Zustandsklassen von Bauwerksteilen.

Die Einflussgrösse **Alter** bezieht sich auf die Zeit entweder seit Erstellung oder seit der letzten wesentlichen Unterhaltsmassnahme und benutzt die jeweilige Phase in der erwarteten Nutzungsdauer eines Bauwerksteils als Indikator für die Zustandsentwicklung. Die festgelegten Einflusswerte beschreiben in welchem Viertel der erwarteten Nutzungsdauer (vgl. Kapitel 1.4 Terminologie) sich das Bauwerksteil befindet. Ein Bauwerksteil kann also abhängig von seinem Alter alle vier Einflusswerte annehmen, wobei der letzte Einflusswert 'Viertes Viertel' auch alle Fälle beinhaltet, bei welchen das Alter die erwartete Nutzungsdauer bereits überschritten hat. Als Beispiel wäre ein 54-jähriges Bauwerksteil mit erwarteter Nutzungsdauer von 100 Jahren im Einflusswert 'Drittes Viertel'. In Tabelle 12 ist die verwendete erwartete Nutzungsdauer für jeden generalisierten Bauwerksteiltyp aufgeführt. Diese Zahlen richten sich mehrheitlich nach dem Fachhandbuch für Kunstbauten (ASTRA 22001) welches sich nach der SIA Norm 260 (Art. 2.3.2) richtet. In diesem Fachhandbuch werden für Bauteile aus Stahlbeton 100 Jahre verwendet und für Bauteile aus Stahl 50 Jahre. Diese Werte werden im Bewusstsein verwendet, dass es eine grosse Streuung gibt und die Werte in der Realität stark abweichen können.

Erwartete Nutzungsdauer

Typ Nr.	Generalisierter Bauwerksteiltyp	Erwartete Nutzungsdauer [Jahre]
5	Widerlager	100
7	Stützmauer, Flügelmauer	100
9	Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben	100
10	Wand, Scheibe	100
11	Vollwandträger	100
12	Kastenträger	100
13	Fachwerkträger	100
14	Fahrbahnplatte	100
15	Decke	50
16	Randborde, Brüstung	100
18	Lager, Gelenke	50
19	Fahrbahnübergang	20
20	Rahmen	100
22	Bogen, Gewölbe	100
23	Abdichtung	20
24	Belag	20
25	Leitschranke, Geländer	50
28	Rohr, Bachdurchlass	100

Tabelle 12: Liste der generalisierten Bauwerksteiltypen mit deren erwarteten Nutzungsdauer.

Die Einflussgrösse **Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung (kurz Verkehr)** beschreibt, inwiefern der Verkehr, welcher über die Brücke passiert, einen Einfluss auf die Zustandsentwicklung der einzelnen Bauwerksteile hat. Der Verkehr ist jedoch für die ganze Brücke gleich und entsprechend auch für alle deren Bauwerksteile. Inwiefern der Verkehr doch einen unterschiedlichen Einfluss auf die Zustandsentwicklung verschiedener Bauwerksteiltypen hat, wird im späteren Abschnitt zur Gewichtung der Einflussgrössen bestimmt. Der Verkehr wurde in die drei Einflusswerte ‘Niedrig’, ‘Mittel’ und ‘Hoch’ eingeteilt. Diese wurden gemäss der Schweizerischen automatischen Strassenverkehrszählung (SASVZ) aus dem Jahr 2023 über den durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) definiert (alternativ auch mehr Fokus auf Schwerverkehr möglich). Eine Brücke, deren zugehörige Zählstelle einen spezifischen DTV hat, wurde einem Einflusswert gemäss Tabelle 13 mit den festgelegten Schwellenwerten zugewiesen. Diese Schwellenwerte wurden anhand der 33%- und 67%-Perzentile der Fahrzeugbelastung im Nationalstrassennetz festgelegt. Dies bedeutet zum Beispiel, dass die am meisten belasteten Zählstellen, welche zusammen 33% der gesamten Fahrzeugbelastung im Nationalstrassennetz tragen, zählen mehr als 72'000 Fahrzeuge im durchschnittlichen Tagesverkehr. Gemäss Tabelle 13 sind das 40 Zählstellen. Umgekehrt zählen die 200 am wenigsten belasteten Zählstellen weniger als 43'500 Fahrzeuge im durchschnittlichen Tagesverkehr und tragen ebenfalls 33% der gesamten Fahrzeugbelastung im Nationalstrassennetz. Eine weitere Möglichkeit wäre eine spezifischere Berücksichtigung des Schwerverkehrs.

DTV-Schwellenwerte

Einflusswert	DTV von	DTV bis	Anzahl Zählstellen
Niedrig	0	43’500	200
Mittel	43’500	72’000	67
Hoch	72’000	offen	40

Tabelle 13: Schwellenwerte für die Einteilung des DTV in die Einflusswerte gemäss den 33%- und 67%-Perzentilen.

Die Einflussgrösse **Umwelt** verkörpert alle äusseren Bedingungen, welche rund um eine Brücke wirken. Wie fest der spezifische Einfluss auf die Zustandsentwicklung der verschiedenen generalisierten Bauwerksteiltypen ist, wird bei der Gewichtung der Einflussgrössen, in Abschnitt • bestimmt, welche für jeden Typ spezifisch durchgeführt wurde. Der Umwelt wurde in die drei Einflusswerte ‘Niedrig’, ‘Mittel’ und ‘Hoch’ eingeteilt. Die Einflussgrösse Umwelt wurde über verschiedene Klimaindikatoren definiert, welche über MeteoSchweiz verfügbar sind.

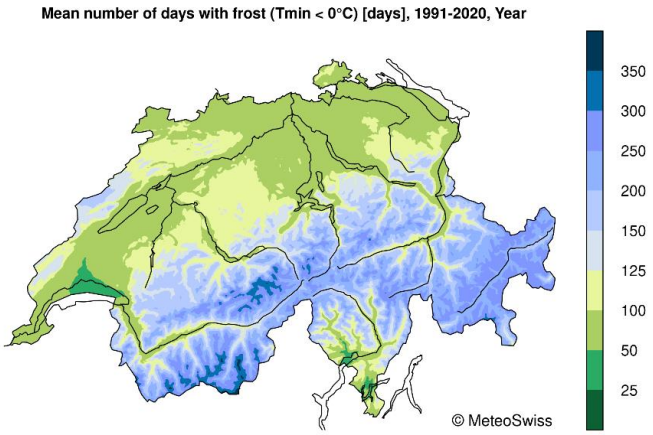


Abbildung 36: Karte der Schweiz mit der durchschnittlichen Anzahl der Frosttage. (Quelle MeteoSchweiz)

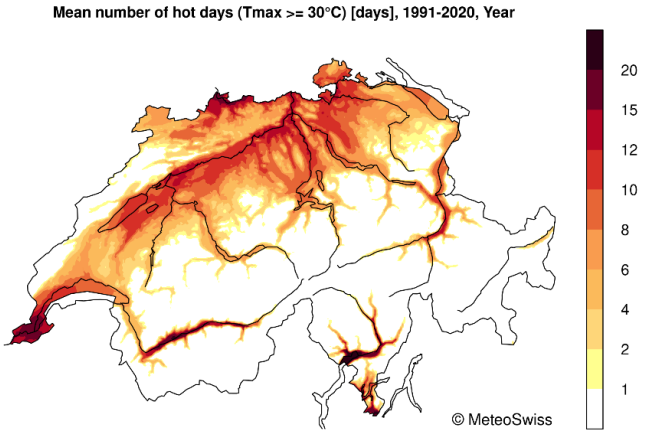


Abbildung 37: Karte der Schweiz mit der durchschnittlichen Anzahl der Hitzetage. (Quelle MeteoSchweiz)

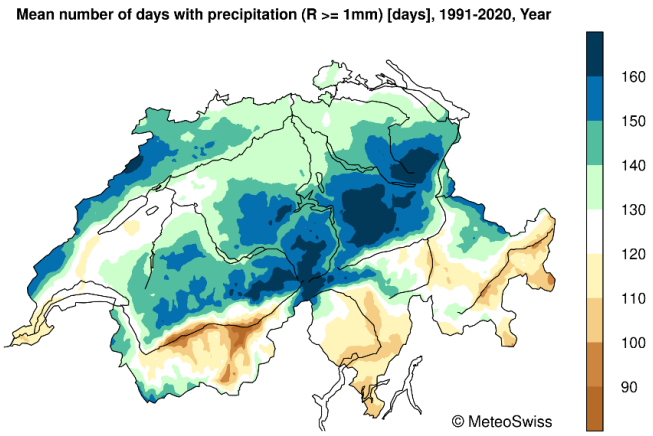


Abbildung 38: Karte der Schweiz mit der durchschnittlichen Anzahl der Niederschlagstage. (Quelle MeteoSchweiz)

Die ausgewählten Klimaindikatoren sind die durchschnittliche Anzahl Tage im Jahr für Frost (Abbildung 36, Tagesmindesttemperatur unter 0°C), Hitze (Abbildung 37, Tagesmaximaltemperatur über oder gleich 30°C) und Niederschlag (Abbildung 38, Tagesniederschlag über oder gleich 1 mm). Der Vergleichszeitraum ist wie in den Abbildungen angegeben von 1991 bis 2020.

Die Zuordnung einer Brücke zu einem Einflusswert kann einerseits qualitativ mit Hilfe der Karten von MeteoSchweiz eingeschätzt werden. Dabei wird die Region der Brücke anhand der Werte und des Farbbalkens an der Seite der Karte (Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38) national verglichen und eingeschätzt. Andererseits wurde eine quantitative Methode entwickelt, um einem Bauwerk einen ortspezifischen Einflusswert zuzuweisen. Dies wurde möglich, durch das Zurverfügungstellen der Messdaten durch MeteoSchweiz. Für die verschiedenen Klimaindikatoren wurden über die Koordinaten die standortspezifischen Werte ausgelesen. Um die Daten der verschiedenen Klimaindikatoren und entsprechend verschiedenen Grössenordnungen zusammenführen zu können, wurden diese normalisiert. Die Normalisierung basiert auf dem Wertebereich, in dem 99 % der Daten liegen, also zwischen dem 0.5. und dem 99.5. Perzentil, um den Einfluss von Ausreissern auf die Skala zu minimieren; Werte ausserhalb werden entsprechend auf 0 bzw. 1 begrenzt.

Abbildung 39 zeigt in drei Histogrammen, was die Karten in Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38 räumlich darstellen, und hebt gleichzeitig den erklärten Normalisierungsbereich für jeden Klimaindikator hervor. Sind die Werte für jeden Klimaindikator normalisiert, können diese anschliessend gewichtet zusammengeführt werden, um einen aggregierten Wert (im Bereich von 0 bis 1) für die Einflussgrösse Umwelt zu erhalten. Es ist jedoch naheliegend, dass durch die Zusammenrechnung kaum mehr Punkte an den extremen liegen (siehe Abbildung 40 Min und Max). Dementsprechend können für die Einteilung in die Kategorien ‘Niedrig’, ‘Mittel’ und ‘Hoch’ verschiedene Schwellenwerte verwendet werden. Abbildung 40 zeigt zwei mögliche Schwellenwertdefinitionen anhand des Histogramms der vorkommenden Werte in der Schweiz.

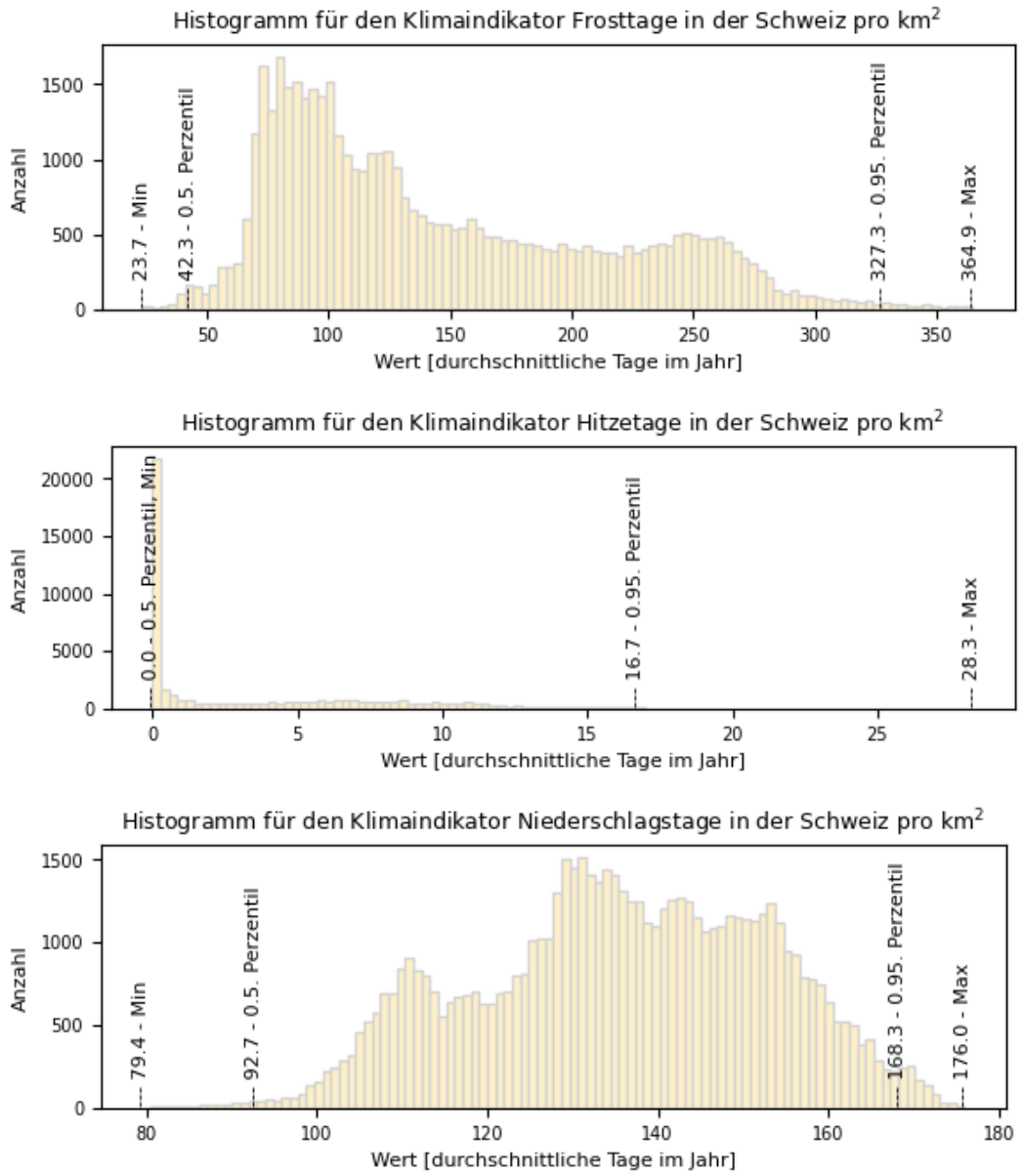


Abbildung 39: Histogramme der durchschnittlichen Anzahl Tage im Jahr für die drei Klimaindikatoren (Frost, Hitze, Niederschlag) für jeden Quadratkilometer in der Schweiz über die Jahre 1991 bis 2020 (Hervorhebung der Werte Min und Max sowie der Perzentile für die Normalisierung).

Die eine Möglichkeit ist es, die Schwellenwerte über die Drittels-Perzentile festzulegen (grüne Strich-Punkt-Linie), welche die in Abbildung 41 sichtbare flächenmässige Einteilung des Einflusswerts zur Folge hätte. In diesem Fall wird allen drei Einflusswerten gleich viel Fläche zugeordnet. Die andere Möglichkeit ist es, die Schwellenwerte über die Unterteilung des Wertbereichs (zwischen Min und Max) in gleichmässige Drittel festzulegen (blau gestrichelte Linie). Die Wahl dieser Schwellenwerte führt zur flächenmässigen Einteilung der Einflusswerte, welche in Abbildung 42 dargestellt wird.
Die Gewichtung der verschiedenen Klimaindikatoren kann, wie später in Abschnitt • beschrieben, beispielsweise mittels AHP erfolgen. Der Einfachheit halber wurde die Gewichtung auf Basis einer plausiblen Annahme festgelegt: Frosttage mit 60 %, Hitzetage mit 30 % und Niederschlagstage mit 10 %. Diese Aufteilung sowie die Wahl der

Einflussindikatoren können bei Bedarf angepasst werden. Grundsätzlich liesse sich die Methodik zur Herleitung des Einflusswerts der Einflussgrösse Umwelt weiter verfeinern, im Kontext der übergeordneten, eher konzeptionellen Methodik erscheint eine solche Detaillierung jedoch nicht zielführend.

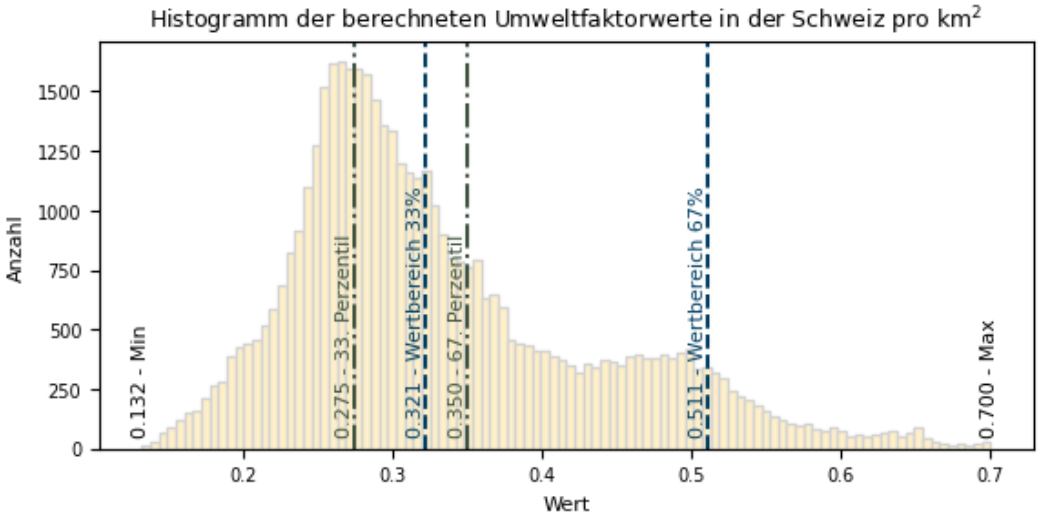


Abbildung 40: Histogramm der zusammengerechneten Werte für die Einflussgrösse Umwelt in der Schweiz für jeden Quadratkilometer mit zwei möglichen Schwellenwertpaaren über die Jahre 1991 bis 2020.

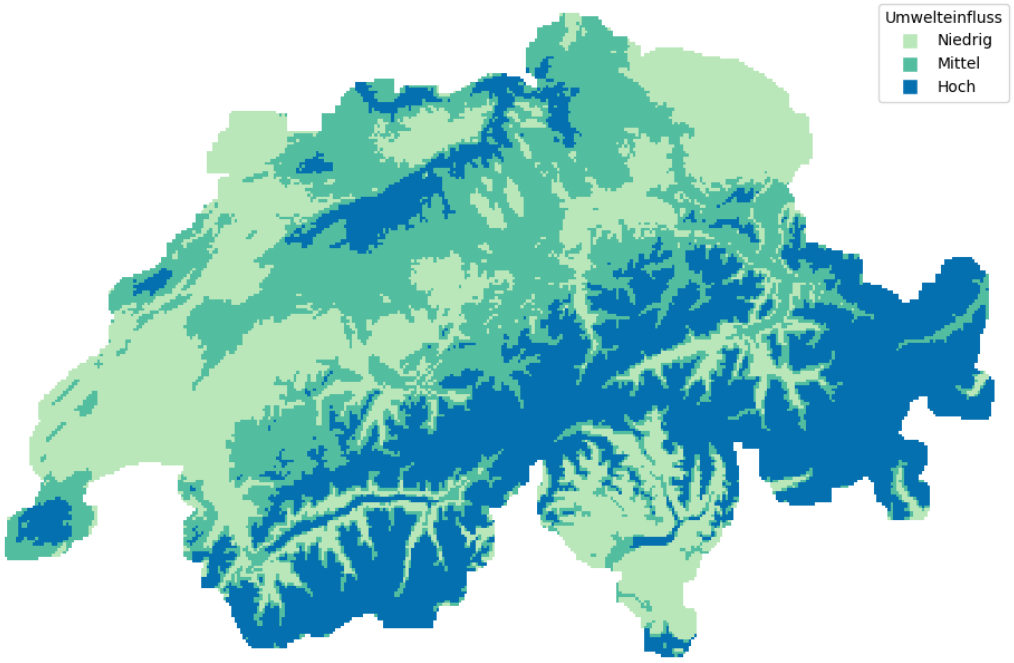


Abbildung 41: Karte der Schweiz mit dem berechneten Einflusswert Umwelt mit dem Schwellenwert der Drittels-Perzentile über die Jahre 1991 bis 2020 (entsprechend gleich viel Fläche für alle drei Einflusswerte).

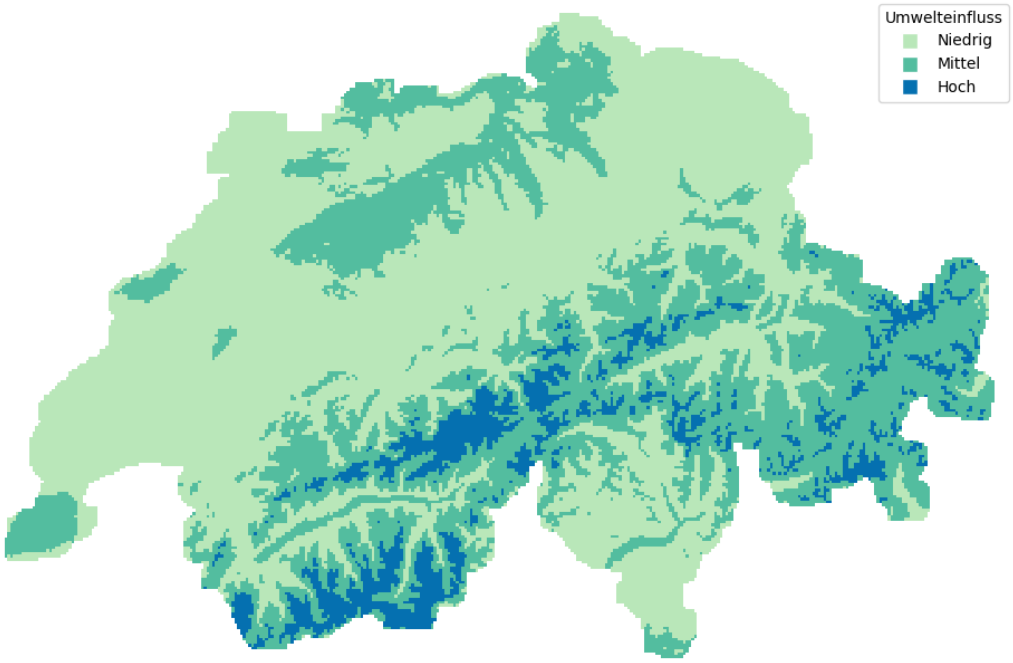


Abbildung 42: Karte der Schweiz mit dem berechneten Einflusswert Umwelt mit den Schwellenwerten bei den Dritteln des Wertebereichs über die Jahre 1991 bis 2020.

Für spezifische Bauwerke kann die Einteilung des Einflusswerts aufgrund der klimatischen Daten auch angepasst werden. Dies bedeutet vor allem eine Erhöhung des Einflusses, wenn zum Beispiel eine unterquerende Strasse vorhanden ist, wodurch Tausalz einen höheren Einfluss hat, oder bei Gewässern in unmittelbarer Nähe, wodurch die Strömung oder die Feuchtigkeit einen erhöhten Einfluss auf die Zustandsentwicklung ausüben können. Diese spezifische Erhöhung kann für einzelne Bauwerksteile oder ganze Brücken angewandt werden, denn in einem gewissen Masse wird die grundsätzliche Ausgesetztheit von generalisierten Bauwerksteiltypen bereits bei der Gewichtung zwischen den Einflussgrössen, in Abschnitt •, berücksichtigt.

Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einflusswerte festlegen

In einem nächsten Schritt werden den verschiedenen Einflusswerten eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugeordnet. Dies wird gemacht, um verschiedene Kombinationen der möglichen Einflusswerte der unterschiedlichen Einflussgrössen simulieren zu können. Zum Beispiel die Einflussgrössenkombination für ein Widerlager mit einem Alter im ‘Zweiten Viertel’, mit Verkehr im Bereich ‘Hoch’ und einem Umwelteinfluss der ‘Mittel’ ist. Die festgelegte Wahrscheinlichkeitsverteilung zeigt sich in der Definition der Simulationsbereiche der Einflusswerte, welche in Tabelle 14 ersichtlich sind. Für die festgelegten Einflusswerte wurde eine uniforme Verteilung angenommen, welche bedeutet, dass alle Einflusswerte einer Einflussgrösse dieselbe Auftretenswahrscheinlichkeit haben. In so einem Fall sind bei drei möglichen Einflusswerten für eine Einflussgrösse die Wahrscheinlichkeiten ein Drittel und bei Vier ein Viertel für jeden Einflusswert.

Mit mehr und genaueren Informationen kann man diese Wahrscheinlichkeitsverteilungen noch genauer festlegen. Die Festlegung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung hat

eine wichtige Rolle und beeinflusst primär die Resultate in der bedingten Wahrscheinlichkeitstabelle, respektive zu welcher Kombination von Einflusswerten ein Simulationsresultat zugeordnet wird und infolgedessen auch wie die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Zustandsklassen für diese Kombination aussieht. Wie für die Einflusswerte wird auch den bekannten Zustandsklassen von 1 bis 5 ein Bereich auf der Skala von 0 bis 1 zugewiesen. Diese Zuweisung eines Bereichs bedeutet ebenfalls die Festlegung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, welche mangels Argumente ebenfalls als uniform und dementsprechend nicht-informativ festgelegt wurde. Die festgelegten Bereiche sind so ausgelegt, dass bei den vielen Simulationen (mehr dazu im Abschnitt zu Monte-Carlo-Simulationen) viele Zufallszahlen zwischen 0 und 1 generiert werden, und diese dadurch die gewählte Wahrscheinlichkeit eines Einflusswerts abbilden.

Einflusswertbereiche

Alter		**Verkehr**		**Umwelt**		**Zustandsklasse**	
Erstes Viertel	0 - 0.25	Niedrig	0 - 0.33	Niedrig	0 - 0.33	1	0 - 0.2
Zweites Viertel	0.25 - 0.5	Mittel	0.33 - 0.67	Mittel	0.33 - 0.67	2	0.2 - 0.4
Drittes Viertel	0.5 - 0.75	Hoch	0.67 - 1	Hoch	0.67 - 1	3	0.4 - 0.6
Viertes Viertel	0.75 - 1					4	0.6 - 0.8
						5	0.8 - 1

Tabelle 14: Einteilungsbereich der Einflusswerte sowie der Zustandsklasse basierend auf der festgelegten Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Gewichtung der Einflussgrössen bestimmen

In einem vierten Schritt wird eine relative Gewichtung der einzelnen Einflussgrössen vorgenommen. Mit dieser relativen Gewichtung wird versucht, den unterschiedlichen Einfluss der einzelnen Einflussgrössen auf einen generalisierten Bauwerksteiltyp relativ zueinander darzustellen. Die Verhältnisse zueinander sind wichtig, da bei dem in Abbildung 35 dargestellten Bayes'schen Netz keine weiteren unbekannten Einflussgrössen angenommen werden und somit die berücksichtigten Einflussgrössen die Gesamtheit des Einflusses (100%) darstellen. Die Bestimmung der relativen Gewichtung der Einflussgrössen geschieht mit Expertenwissen. Für die Quantifizierung dieses Expertenwissens zu relativen Gewichten wurde der analytische Hierarchieprozess (AHP) verwendet. Der AHP ist eine Entscheidungshilfe für komplexe Voraussetzungen, welche durch paarweise Vergleiche die Einflussgrössen hierarchisch quantifiziert (Saaty, 1980).

Mit Hilfe einer Matrix (Beispiel in Tabelle 16) werden immer zwei Einflussgrössen miteinander verglichen und mit einem Skalenwert aus Tabelle 15 gemäss der Definition quantifiziert. Für das Matrixfeld des umgekehrten Vergleichs wird jeweils der Kehrwert eingesetzt. Beispiel gemäss Tabelle 16: Zuerst wird gefragt, inwiefern grösser der Einfluss auf Zustandsentwicklung der Einflussgrösse Alter gegenüber der Einflussgrösse Verkehr ist. Wird dies mit 'deutlich grösserem Einfluss' beantwortet füllt man entsprechend eine 5 ein und gegenüber der Diagonalen, bei der Rückfrage, den Wert 1/5.

AHP-Skalenwerte für paarweisen Vergleich

Skalenwert	Definition
1	gleichen Einfluss
3	etwas grösseren Einfluss
5	deutlich grösseren Einfluss
7	sehr viel grösseren Einfluss
9	maximal grösseren Einfluss (dominierend)
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte
Kehrwert (1/x)	Für den umgekehrten Vergleich (i gegenüber j = 3 → j geg. i =1/3)

Tabelle 15: Definition der Skalenwerte, welche für den paarweisen Vergleich im AHP benutzt werden. (Nach Saaty 1990)

Dies wird gemacht, bis alle Einflussgrössen paarweise miteinander verglichen wurden und die Matrix somit vollständig ausgefüllt ist (mit Einsen auf der Diagonale). Dies bedeutet jedoch auch, dass mit zunehmender Anzahl von Einflussgrössen der AHP exponentiell komplexer wird und dieser mit zunehmender Grösse schwieriger anzuwenden ist. Für Experten wird es dadurch schwieriger genaue und konsistente Einschätzungen zu allen paarweisen Vergleichen zu machen. Das in Abbildung 35 dargestellte Bayes'sche Netz ist mit nur drei Einflussgrössen nicht zu komplex, aber kann aufgestellt für 74 verschiedene Kombinationen von generalisiertem Bauwerksteiltyp und Schadensprozess doch ein grosses Spektrum abdecken.

AHP-Matrix Beispiel

Einflussgrössen	Alter	Verkehr	Umwelt	Relatives Gewicht
Alter	1	5	1/4	*0.237*
Verkehr	1/5	1	1/8	*0.064*
Umwelt	4	8	1	*0.699*

Tabelle 16: Beispiel einer ausgefüllten AHP-Matrix für den generalisierten Bauwerksteiltyp 'Stütze, Pfeiler' und den Schadensprozess 'Korrosion im Stahlbeton'.

Ist eine Matrix ausgefüllt, werden anschliessend die Eigenwerte und die Eigenvektoren berechnet, wobei der normalisierte Eigenvektor des maximalen Eigenwerts das relative Gewicht der Einflussgrössen ergibt. Die Tabelle 16 zeigt für das Beispiel einer ausgefüllten AHP-Matrix das berechnete relative Gewicht der Einflussgrössen. In diesem Beispiel hat die Einflussgrösse Umwelt ein relatives Gewicht von 69.9%, die Einflussgrösse Alter eines von 23.7% und die Einflussgrösse Verkehr eines von 6.4%. Für eine ausgefüllte AHP-Matrix wird ebenfalls ein Konsistenzindex berechnet, welcher mit einem Zufallskonsistenzindexwert in Relation gesetzt wird, um das Verhältnis der Konsistenz ('Consistency Ratio' kurz CR) der Antworten zu einer zufällig ausgefüllten Matrix zu bestimmen. Grundsätzlich kann man sagen, dass konsistente Antworten einen Wert nahe 0 ergeben und widersprüchliche Antworten einen Wert grösser als 1 ergeben. Gemäss dem Entwickler des AHP (Saaty) wird ein Wert von unter 0.1 für das Konsistenzverhältnis angestrebt. Für das Beispiel in Tabelle 16 beträgt der Konsistenzindex 0.047, der Zufallskonsistenzindex für eine 3x3 Matrix beträgt 0.58 und entsprechend ist das Konsistenzverhältnis 0.081, was unter dem angestrebten Wert von 0.1 liegt und somit als konsistent betrachtet werden kann.

Um das Expertenwissen für diese Methode zu erheben wurde ein Fragebogen entwikkelt, welcher entweder selbständig anhand einer Anleitung durch die Experten oder in einem geführten Interview ausgefüllt wurde (vgl. Anhang Seite 304). Der Fragebogen erhob die AHP-Matrizen für alle 74 ausgemachten Kombinationen von generalisiertem Bauwerksteiltyp und entsprechendem Schadensprozess bestimmt. An der Umfrage teilgenommen haben verschiedene Fachexperten des ASTRA oder der Kantone mit reichlich Erfahrung in Bezug auf Kunstbauten (Fachunterstützung, Erhaltungsplanung, Zustandserfassung, etc.). Um die verschiedenen Antworten der Experten zu jeweils einer Matrix zusammenfügen zu können wurden, wie vom Entwickler des AHP empfohlen, die Matrixeinträge elementweise durch den geometrischen Mittelwert aggregiert. Im Vergleich zum bekannteren arithmetischen Mittelwert, werden beim geometrischen Mittelwert (Formel (1)) die Werte miteinander multipliziert und anschliessend wird die Wurzel der Anzahl Werte entsprechend gezogen.

$$a_{ij}^{(aggr.)} = \left(\prod_{k=1}^{n} a_{ij}^{(interview=k)} \right)^{\frac{1}{n}} \tag{1}$$

Der geometrische Mittelwert hat in diesem Kontext den Vorteil, dass er die Kehrwerteigenschaft behält und gleichzeitig zu konsistenteren Matrizen führt. Abbildung 43 zeigt ein Beispiel, wie sechs unterschiedliche Matrizen mittels des geometrischen Mittelwertes zu einer Matrix aggregiert werden. Ebenfalls ist ersichtlich, dass das Konsistenzverhältnis (CR) um einiges besser wird, während gewisse Interviewmatrizen leicht über dem gewünschten Wert sind. Die resultierenden aggregierten Matrizen, respektive deren resultierenden relativen Gewichte, sind im Anhang in Tabelle 81 ersichtlich.

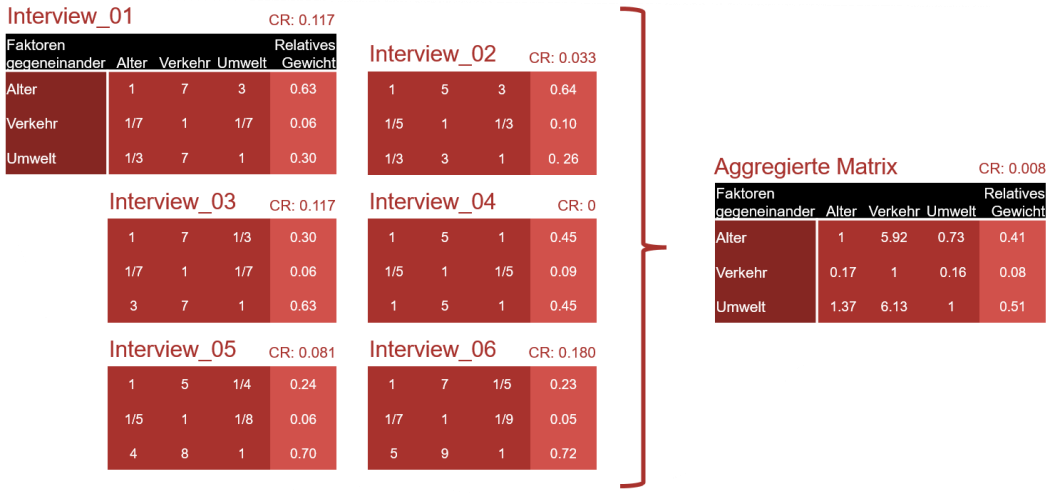


Abbildung 43: Beispiel der Aggregierung von sechs unterschiedlichen Matrizen für den generalisierten Bauwerksteiltyp ‘Stütze, Pfeiler’ und den Schadensprozess ‘Korrosion im Stahlbeton’.

Für die Erhebung der aggregierten Matrizen wurde der Fragebogen von sechs Experten ausgefüllt. Auch wenn die Einbeziehung weiterer Experten grundsätzlich wünschenswert erscheint, führt dies gemäss Saaty & Özdemir (2014) nicht zwingend zu einer höheren Qualität der aggregierten Resultate. Die Autoren empfehlen eine

Gruppengrösse von fünf bis sieben Personen als optimal, da in diesem Bereich eine ausgewogene Balance zwischen Genauigkeit und Vielfalt erreicht wird, ohne übermässige Inkonsistenz oder Rauschen in die Bewertung einzubringen. Dabei dürfen einzelne Experten in ihren Einschätzungen von der aggregierten Meinung abweichen, solange die resultierenden aggregierten Matrizen konsistent sind.

Alle Daten zum Fragebogen, den Antworten und Resultaten können dem Anhang «AHP-Fragebögen: Fragen, Antworten und Resultate» entnommen werden. Für alle in diesem Projekt erhobenen aggregierten Matrizen liegt das Konsistenzverhältnis unter 0.1 und weisst mit einem durchschnittlichen Wert von 0.021 ein grundsätzlich gutes Konsistenzniveau auf.

Kombinationen durch Monte-Carlo-Simulationen erstellen

Mit den ermittelten Gewichten für die Einflussgrössen und den festgelegten Bereichen für die Einflusswerte werden in einem nächsten Schritt durch Monte-Carlo-Simulationen (MC-Simulationen) verschiedene Kombinationen der Einflusswerte erstellt. Dies wird erreicht, indem für alle Einflussgrössen unabhängige Zufallswerte von 0 bis 1 (uniform verteilt) generiert werden. Tabelle 17 zeigt ein Beispiel von zwölf MC-Simulationen mit unterschiedlichen und untereinander unabhängigen MC-Zufallswerten für die verschiedenen Einflussgrössen und daneben jeweils der entsprechende Einflusswert entsprechend dem festgelegten Bereich.

Monte-Carlo-Simulationen

Sim.	Alter		Verkehr		Umwelt	
Nr.	**MC-Wert**	**Einf.-Wert**	**MC-Wert**	**Einf.-Wert**	**MC-Wert**	**Einf.-Wert**
1	0.279	Zweites Viertel	0.919	Hoch	0.015	Niedrig
2	0.909	Viertes Viertel	0.992	Hoch	0.877	Hoch
3	0.006	Erstes Viertel	0.594	Mittel	0.936	Hoch
4	0.498	Zweites Viertel	0.677	Hoch	0.758	Hoch
5	0.727	Drittes Viertel	0.419	Mittel	0.414	Mittel
6	0.094	Erstes Viertel	0.459	Mittel	0.006	Niedrig
7	0.879	Viertes Viertel	0.012	Niedrig	0.437	Mittel
8	0.056	Erstes Viertel	0.416	Mittel	0.495	Mittel
9	0.343	Zweites Viertel	0.411	Mittel	0.998	Hoch
10	0.205	Erstes Viertel	0.208	Niedrig	0.379	Mittel
11	0.558	Drittes Viertel	0.285	Niedrig	0.013	Niedrig
12	0.848	Viertes Viertel	0.477	Mittel	0.415	Mittel

Tabelle 17: Beispiel von 12 MC-Simulationen mit dem Einflusswert entsprechend den Zufallswerten.

Mit genügend Simulationen, in diesem Fall wurden 500'000 durchgeführt, wird sichergestellt, dass alle Kombinationen der Einflusswerte genügend repräsentiert sind, um die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zustandsklasse für ebendiese Kombinationen zu berechnen.

Je Ergebnis die Zustandsklasse berechnen

In diesem Schritt wird die Zustandsklasse für jede MC-Simulation berechnet. Dies geschieht gemäss Formel (2) mittels der in Abschnitt • erhobenen relativen Gewichten. Die Simulation und die Berechnung ist dementsprechend für jede vorhandene AHP-Matrix bezüglich generalisiertem Bauwerksteiltyp und Schadensprozess durchzuführen.

$$ZK_{berechnet} = RG_A * MCW_A + RG_V * MCW_V + RG_U * MCW_U \quad (2)$$

(ZK=Zustandsklasse, RG=relatives Gewicht, MCW=Monte-Carlo-Wert, A=Alter, V=Verkehr, U=Umwelt)

Ein Beispiel für die Berechnung der Zustandsklasse für die Simulation Nr. 10 mit den relativen Gewichten von Tabelle 16 (für den generalisierten Bauwerksteiltyp 'Stütze, Pfeiler' und den Schadensprozess 'Korrosion im Stahlbeton') ist in der folgenden Formel (3) gegeben.

$$0.327 = 0.237 * 0.205 + 0.064 * 0.208 + 0.699 * 0.379 \quad (3)$$

In Tabelle 18 sind wieder die zwölf MC-Simulationen dargestellt, aber diesmal mit den zusätzlichen Spalten für den errechneten Wert der Zustandsklasse und wie dieser anhand der festgelegten Bereiche aus Tabelle 14 in die effektive Zustandsklasse eingeteilt wird in der letzten spalte.

Zustandsklasse der Monte-Carlo-Simulationen

Sim.	Alter		Verkehr		Umwelt		*Zustandsklasse*	
Nr.	**MCW**	**Einf.-W**	**MCW**	**Einf.-W**	**MCW**	**Einf.-W**	***Wert***	***ZK***
1	0.279	Zweites Viertel	0.919	Hoch	0.015	Niedrig	*0.1354*	*1*
2	0.909	Viertes Viertel	0.992	Hoch	0.877	Hoch	*0.8919*	*5*
3	0.006	Erstes Viertel	0.594	Mittel	0.936	Hoch	*0.6937*	*4*
4	0.498	Zweites Viertel	0.677	Hoch	0.758	Hoch	*0.6911*	*4*
5	0.727	Drittes Viertel	0.419	Mittel	0.414	Mittel	*0.4885*	*3*
6	0.094	Erstes Viertel	0.459	Mittel	0.006	Niedrig	*0.0558*	*1*
7	0.879	Viertes Viertel	0.012	Niedrig	0.437	Mittel	*0.5145*	*3*
8	0.056	Erstes Viertel	0.416	Mittel	0.495	Mittel	*0.3859*	*2*
9	0.343	Zweites Viertel	0.411	Mittel	0.998	Hoch	*0.8051*	*5*
10	0.205	Erstes Viertel	0.208	Niedrig	0.379	Mittel	*0.3268*	*2*
11	0.558	Drittes Viertel	0.285	Niedrig	0.013	Niedrig	*0.1595*	*1*
12	0.848	Viertes Viertel	0.477	Mittel	0.415	Mittel	*0.5215*	*3*

Tabelle 18: In den letzten beiden Spalten sind der berechnete Wert der Zustandsklasse für die MC-Simulationen und die entsprechende Einteilung.

Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung berechnen

Im letzten Schritt werden anhand aller 500'000 MC-Simulationen für eine AHP-Matrix, welche für die Kombination generalisierter Bauwerksteiltyp und Schadensprozess definiert ist, Tabellen mit der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung für jede Kombination der Einflusswerte erstellt. Das sind durchschnittlich 13'889 Simulationen pro Einflussgrössenkombination. Dies geschieht durch das Zusammennehmen aller Simulationen, welche dieselbe Kombination der drei Einflusswerte haben. Für eine solche

Kombination wird anschliessend die Anzahl Simulationsergebnisse in einer Zustandsklasse gezählt. Mit der Anzahl Ergebnisse für jede Zustandsklasse bei dieser Kombination der drei Einflusswerte kann die prozentuelle Wahrscheinlichkeit für diese Zustandsklasse bei dieser Kombination berechnet werden.

Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung

Zustandsklasse	Anzahl Simulationsergebnisse	Wahrscheinlichkeit
1	0	0
2	8861	62.1%
3	5398	37.9%
4	0	0
5	0	0

Tabelle 19: Beispiel der Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung anhand der Anzahl Simulationsergebnisse in der resultierenden Zustandsklasse.

Tabelle 19 zeigt ein Beispiel, bei dem von den 500'000 Simulationen für den generalisierten Bauwerksteiltyp ‘Stütze, Pfeiler’ und den Schadensprozess ‘Korrosion im Stahlbeton’ 14’259 Simulationsergebnisse auf die Einflusswertekombination Alter=’Drittes Viertel’, Verkehr=’Mittel’ und Umwelt=’Niedrig’ fallen. Betrachtet man den berechneten Zustand und die dazugehörige Einteilung in die entsprechende Zustandsklasse, sieht man, dass 8861 der 14’259 Simulationsergebnisse zur Zustandsklasse 2 gehören, was einem Anteil von 62.4% entspricht. Somit erhält man die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zustands bedingt durch die Kombination der Einflusswerte. Diese Berechnung wird für alle Kombinationen der drei Einflusswerte angewandt und kann in einer Tabelle dargestellt werden (MINERVA-Datensatz). Tabelle 20 zeigt ein Beispiel einer solchen Tabelle mit der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung für den generalisierten Bauwerksteiltyp ‘Stütze, Pfeiler’ und den Schadensprozess ‘Korrosion im Stahlbeton’. Die berechnete Wahrscheinlichkeitsverteilung aus Tabelle 19 ist in Tabelle 20 durch kursive Schrift leicht hervorgehoben.

Bei der Betrachtung von Tabelle 20 fällt auf, dass die Wahrscheinlichkeiten der Zustandsklassen über die verschiedenen Einflusswertekombinationen hinweg leicht einer Diagonale folgen. Oben ist die Tendenz noch bei den guten Zustandsklassen 1 und 2 während es sich gegen unten zu den schlechteren Zustandsklassen hinbewegt. Dies macht insofern Sinn, dass auch die Einflusswerte von den positivbeeinflussenden hin zu den negativeren sortiert sind. Die Ausrichtung entlang der Diagonale wäre noch akzentuierter, wenn die Einflussgrössen noch nach deren Gewicht sortiert wären, mit dem stärksten zuerst. Ebenfalls kann man bei genauerer Betrachtung gewissermassen eine Punktsymmetrie beobachten, nämlich, dass die Werte oben links unten rechts gespiegelt wieder fast dieselben sind. Dies macht insofern Sinn, dass alle Einflussgrössen uniform in gleichmässige Bereiche aufgeteilt wurden und die Zufallszahlen in den Monte-Carlo-Simulationen ebenfalls einer uniformen Verteilung folgten. Die kleinen beobachtbaren Abweichungen dieser Punktsymmetrie kommen von den MC-Simulationen, welche doch immer noch auf Zufallszahlen beruhen. Dies könnte zum Beispiel bedeuten, dass eine Zeile durch den Zufall ein paar Simulationen weniger abbekommen hat als die der Symmetrie entsprechende Partnerzeile. Dieser Unterschied könnte mit noch mehr Simulationen weiter verringert werden, weil dadurch der Einfluss

einzelner Simulationen noch kleiner wird. Bei genügend hoher Anzahl Simulationen stabilisieren sich die gefundenen Wahrscheinlichkeiten gemäss dem Gesetz der grossen Zahlen um die theoretische Wahrscheinlichkeit. Dies bedeutet somit auch, dass die Tabelle nur einmal erstellt werden muss. Mit neuen Simulationen und somit auch neuen Zufallszahlen kann sich das Resultat zwar jedes Mal ein klein wenig verändern, was jedoch bei einer hohen Anzahl an Simulationen kaum ins Gewicht fällt.

Tabelle mit der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung

Alter	Verkehr	Umwelt	ZK 1	ZK 2	ZK 3	ZK 4	ZK 5
Erstes Viertel	Niedrig	Niedrig	0.792	0.208	0	0	0
Erstes Viertel	Niedrig	Mittel	0.011	0.893	0.097	0	0
Erstes Viertel	Niedrig	Hoch	0	0.057	0.920	0.023	0
Erstes Viertel	Mittel	Niedrig	0.658	0.342	0	0	0
Erstes Viertel	Mittel	Mittel	0	0.803	0.197	0	0
Erstes Viertel	Mittel	Hoch	0	0.012	0.902	0.085	0
Erstes Viertel	Hoch	Niedrig	0.508	0.492	0	0	0
Erstes Viertel	Hoch	Mittel	0	0.658	0.342	0	0
Erstes Viertel	Hoch	Hoch	0	0	0.817	0.183	0
Zweites Viertel	Niedrig	Niedrig	0.204	0.796	0	0	0
Zweites Viertel	Niedrig	Mittel	0	0.363	0.637	0	0
Zweites Viertel	Niedrig	Hoch	0	0	0.532	0.468	0
Zweites Viertel	Mittel	Niedrig	0.102	0.891	0.007	0	0
Zweites Viertel	Mittel	Mittel	0	0.222	0.778	0	0
Zweites Viertel	Mittel	Hoch	0	0	0.366	0.634	0
Zweites Viertel	Hoch	Niedrig	0.033	0.922	0.044	0	0
Zweites Viertel	Hoch	Mittel	0	0.119	0.875	0.006	0
Zweites Viertel	Hoch	Hoch	0	0	0.232	0.768	0
Drittes Viertel	Niedrig	Niedrig	0	0.767	0.233	0	0
Drittes Viertel	Niedrig	Mittel	0	0.006	0.876	0.118	0
Drittes Viertel	Niedrig	Hoch	0	0	0.046	0.920	0.034
Drittes Viertel	*Mittel*	*Niedrig*	*0*	*0.621*	*0.379*	*0*	*0*
Drittes Viertel	Mittel	Mittel	0	0	0.771	0.229	0
Drittes Viertel	Mittel	Hoch	0	0	0.006	0.895	0.099
Drittes Viertel	Hoch	Niedrig	0	0.468	0.532	0	0
Drittes Viertel	Hoch	Mittel	0	0	0.630	0.370	0
Drittes Viertel	Hoch	Hoch	0	0	0	0.790	0.210
Viertes Viertel	Niedrig	Niedrig	0	0.182	0.818	0	0
Viertes Viertel	Niedrig	Mittel	0	0	0.338	0.662	0
Viertes Viertel	Niedrig	Hoch	0	0	0	0.496	0.504
Viertes Viertel	Mittel	Niedrig	0	0.089	0.901	0.010	0
Viertes Viertel	Mittel	Mittel	0	0	0.202	0.798	0
Viertes Viertel	Mittel	Hoch	0	0	0	0.351	0.649
Viertes Viertel	Hoch	Niedrig	0	0.025	0.921	0.055	0
Viertes Viertel	Hoch	Mittel	0	0	0.101	0.889	0.010
Viertes Viertel	Hoch	Hoch	0	0	0	0.208	0.792

Tabelle 20: Beispiel einer Tabelle mit der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zustands für jede mögliche Kombination der drei Einflusswerte.

Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen die Stabilisierung der Wahrscheinlichkeiten der Zustandsklassen für eine spezifische Einflussgrössenkombination mit zunehmender Anzahl MC-Simulationen. Abbildung 44 zeigt die Stabilisierung, wenn zwei Zustandsklassen durch die Simulationen eine gewisse Wahrscheinlichkeit erhalten. In Abbildung 45 sieht man ebenfalls eine Stabilisierung, aber für eine andere Einflussgrössenkombination. Für diese Kombination erhalten drei Zustandsklassen eine gewisse Wahrscheinlichkeit, wobei ZK 2 ganz unten in der Abbildung nur sehr klein ist. In den Abbildungen werden die Anzahl Simulationen auf der x-Achse auf einer logarithmischen Skala dargestellt, damit die fluktuierenden Werte bei einer geringen Anzahl Simulationen besser sichtbar sind. Es ist ersichtlich, dass die beiden Abbildungen nach einer unterschiedlichen Anzahl Simulationen den Konvergenzschwellenwert erreichen (nach 6180 und 9839 Simulationen). Durch die Festlegung des gewünschten Konvergenzschwellenwerts (d.h. nach welcher Simulation zum letzten Mal eine Veränderung der Wahrscheinlichkeit grösser als dieser Schwellenwert von 0.0001 war) kann man die benötigte Anzahl MC-Simulationen herausfinden, damit sich die Wahrscheinlichkeiten für alle Einflusswertekombinationen stabilisieren. Für diese Abbildungen wurden 1'000’000 MC-Simulationen durchgeführt, was zu ca. 27'777 Simulationen pro Einflussgrössenkombination führt (36 mögliche Kombinationen mit gleicher Wahrscheinlichkeit). Mit dem Ergebnis aus Abbildung 45 kann man sagen, dass man mit 500'000 Simulationen und entsprechend ca. 14'000 Simulationen pro Einflussgrössenkombination stabile Wahrscheinlichkeiten erhält. Dieser heuristische Ansatz mit den MC-Simulationen erlaubt eine schnelle und pragmatische Findung der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen im Gegensatz zu möglichen analytischen Lösungen.

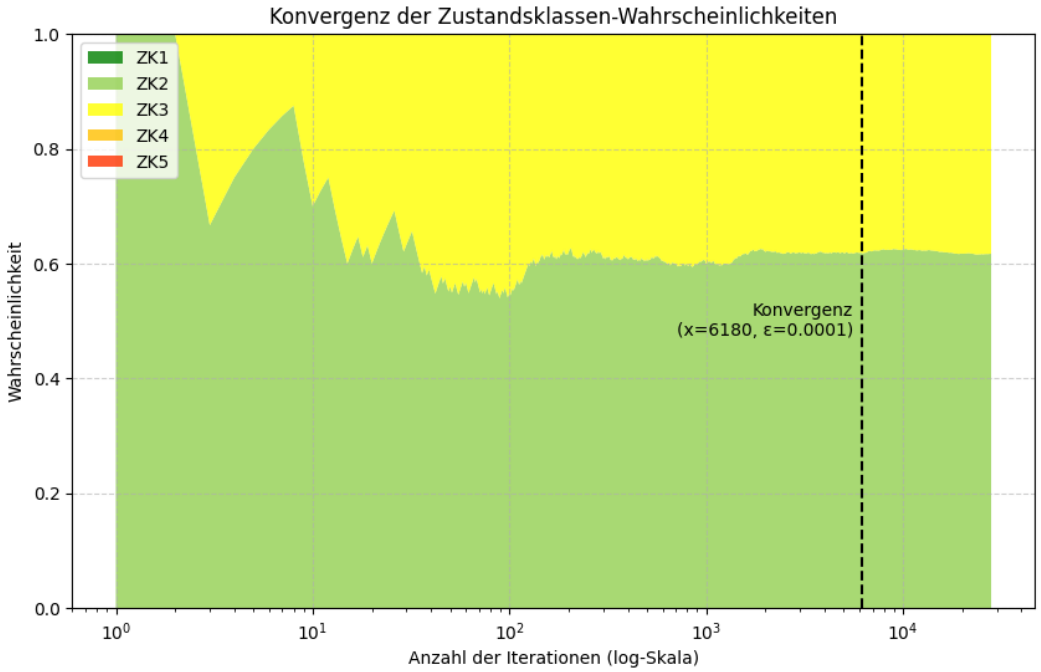


Abbildung 44: Stabilisierung der Wahrscheinlichkeiten für eine spezifische Einflussgrössenkombination (resultierend in zwei Zustandsklassen).

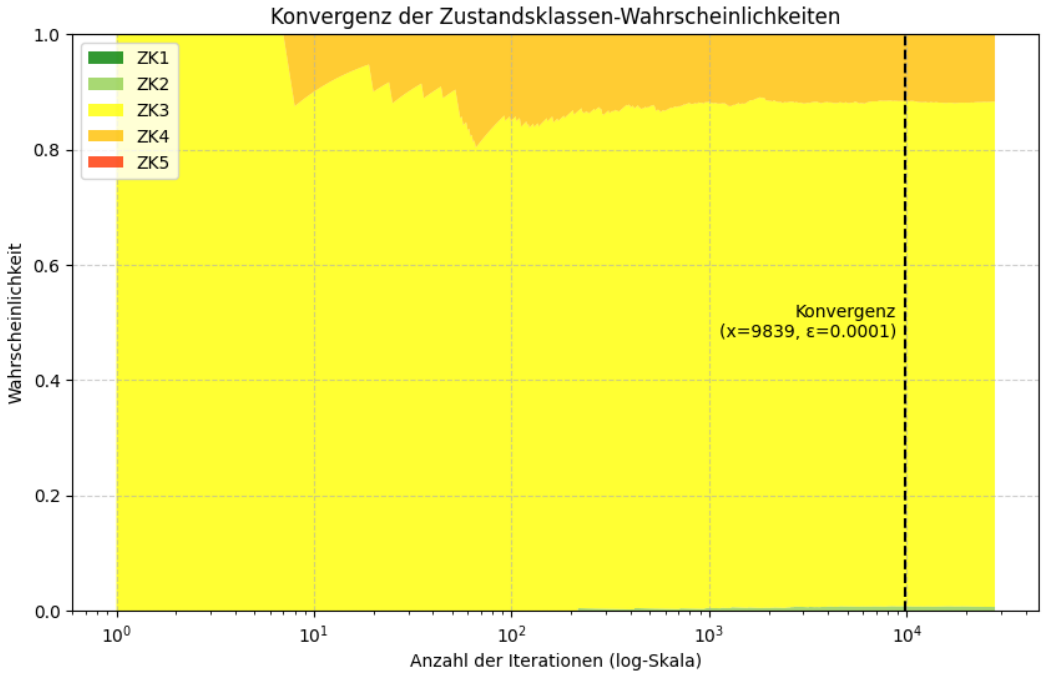


Abbildung 45: Stabilisierung der Wahrscheinlichkeiten für eine spezifische Einflussgrössenkombination (resultierend in drei Zustandsklassen).

Fazit gegenwärtige Zustandsschätzung ohne Zustandsdaten

Die vorgestellte Methode mit dem Bayes'schem Netz für die Modellierung der Einflussgrössen, mit dem analytischen Hierarchieprozess für die Gewichtung der Einflussgrössen anhand von Expertenwissen und mit den Monte-Carlo-Simulationen für die Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung stellt eine einfache Art und Weise dar, um den Zustand ohne irgendwelche Zustandsinformationen, sondern nur anhand von Einflussgrössen abzuschätzen. Eine Eigenschaft dieser Methode ist, dass man mit den Wahrscheinlichkeitstabellen zu den verschiedenen Einflusswertekombinationen, pro generalisiertem Bauwerksteiltyp und Schadensprozess, eine probabilistische Zustandsschätzung für jedes kostenbestimmende Bauwerksteil einer Brücke bekommt. Der probabilistische Charakter der Zustandsschätzung lässt eine gewisse Unsicherheit zu, welche bei einer Methode wie dieser, mit relativ wenig genauen Informationen, hilfreich ist, um nicht den Anschein zu erregen, genauer zu sein, als sie tatsächlich ist. Denn diese Methode beinhaltet nach wie vor Ungewissheiten, wie zum Beispiel die Abschätzung der Gewichtung der Einflussgrössen, oder die Festlegung der Einflusswerte und deren Wahrscheinlichkeitsverteilung. Unter Berücksichtigung, dass die Methodik für die Situation, wenn keine Zustandsinformationen vorhanden sind, entwickelt wurde, ist es oft einfacher, diese Ungewissheiten über die Abschätzung der Einflussgrössen anzugehen, als direkt den Zustand der Bauwerksteile zu versuchen abzuschätzen. Durch diesen methodischen Ansatz werden, gegenüber Einzeleinschätzungen, konsistente Einschätzungen über alle Bauwerksteile von Brücken in einem Infrastrukturnetz gemacht. Dabei hilft es, dass diese bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen nur einmal berechnet werden müssen und danach für spezifische Bauwerksteile ausgelesen werden können.

Um die Einleitung dieser Methodik nochmals aufzugreifen, ermöglicht dieser Ansatz, mit überschaubarem Aufwand, eine Netzübergreifende Abschätzung des Zustands, wenn keine Zustandsinformationen vorhanden sind und die Erhebung dieser auf ressourcentechnische Hindernisse stösst. Diese verallgemeinerte Abschätzungsmöglichkeit hat jedoch einen geringen Nutzen bei detaillierten Beurteilungen spezifischer Bauwerksteile.

Inwiefern diese Methodik angewendet werden kann und wie gut die Abschätzungen sein können, wird in Abschnitt 5.1.3 mit der Anwendung an der Teststrecke gezeigt.

5.1.1.2 Teilweise Zustandsdaten vorhanden

Es gibt auch die Anfangssituation, in der teilweise Zustandsdaten vorhanden sind. Es wurden zwei mögliche Arten identifiziert, wie dies der Fall sein kann:

1. Die Zustandsdaten sind nicht für alle Bauwerksteile vorhanden.
2. Die Zustandsdaten sind (teilweise) veraltet.

Eine Mischsituation dieser zwei Arten von teilweise vorhandenen Zustandsdaten kann auch vorliegen. Diese zwei Arten von fehlenden aktuellen Zustandsdaten können individuell angegangen werden. Die erste Art bedeutet, dass für gewisse Bauwerksteile eines Bauwerks oder im Netz keine Zustandsdaten vorhanden sind, während die Zustandsdaten für andere vorhanden sind. Für diese spezifischen Bauteile kann dies mit der zuvor beschriebenen Methodik für die Situation, dass keine Zustandsdaten vorhanden sind, angegangen werden (Abschnitt 5.1.1.1). Die zweite Art bedeutet, dass gewisse Bauwerksteile veraltete Zustandsdaten gegenüber anderen haben. Dies kann von Fehlern bei der Datenübertragung, von der Unzugänglichkeit bei der Inspektion, oder von unterschiedlichen Inspektionskampagnen an verschiedenen Standorten kommen. Für diese spezifischen Bauwerksteile kann die im nachfolgenden Abschnitt 5.1.2 zur Abschätzung des zukünftigen beschriebene Methodik angewandt werden. Dort wird eine 1-Jahres Verfallsmatrix vorgestellt, welche mit dem Zustandsvektor so oft multipliziert werden kann, wie es dem Unterschied in Jahren entspricht. Dadurch erhält man für alle Bauwerksteile einen Zustandsvektor, der für den gegenwärtigen Zustand zum Zeitpunkt t=0 steht. In Abschnitt 5.1.3 dies mit der Anwendung an der Teststrecke gezeigt.

5.1.2 Abschätzung des zukünftigen Zustands

Für die Planung von Unterhaltsmassnahmen sind Abschätzungen des zukünftigen Zustands von grossem Wert. In KUBA-MS gibt es bereits eine Möglichkeit, um den zukünftigen Zustand von Bauwerksteilen von Brücken abzuschätzen. Der Fokus dieses Kapitels liegt, wie bereits erwähnt, nicht darauf, bestehende Systeme grundlegend zu verändern, sondern gezielte Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Diese können in Abstimmung mit den zukünftigen Nutzern in ein umfassendes Hilfsmittel zur Unterstützung der Erhaltungsplanung integriert werden - mit dem Ziel, das Vertrauen in diese Hilfsmittel zu stärken, sodass ihre Anwendung zu einer Weiterentwicklung der Erhaltungsplanung beitragen kann.

Die bereits aus KUBA-MS vorhandenen Verfallsmatrizen sind schweizweit gültig und sind spezifiziert durch den primären Schadensprozess und die Auswahl der Einflusskategorie (negativ, neutral, positiv). Es ist zu betonen, dass die bestehende

Funktionsweise von KUBA-MS bereits eine durchdachte und gut abgestimmte Abstraktionsebene für die in der Erhaltungsplanung geforderte Ergebnisgenauigkeit darstellt.

In diesem Kapitel liegt der Fokus daher auf der Verbesserung der Abschätzung des zukünftigen Zustands von Brückenbauwerksteilen unter Berücksichtigung von zwei methodischen Anpassungen. Erstens betrifft dies die vorangehende Problemstellung für die Abschätzung des gegenwärtigen Zustands. Ein angesprochenes Problem dort ist es, dass neben fehlenden Daten auch veraltete Daten ein vollständiges, aktuelles und untereinander vergleichbares Bild über den Zustand der Infrastruktur verhindern. Um ein aktuelles und damit vergleichbares Bild von Bauwerksteilen aus unterschiedlichen Inspektionskampagnen zu erhalten, wäre es wertvoll den Verfall einzelner Jahre modellieren zu können. Die Verfallsmatrizen sind eine bewährte Methode zur Modellierung des Verfalls einzelner Bauwerksteile, weshalb für die hier vorgeschlagene Methodik 1-Jahres-Verfallsmatrizen verwendet werden. Zweitens wird die Einführung nicht stationärer Verfallsmatrizen betrachtet. Diese Annahme ist insbesondere dann sinnvoll, wenn davon auszugehen ist, dass sich der Verfallsprozess über die Nutzungsdauer eines Bauteils verändert – etwa aufgrund veränderter Materialeigenschaften nach Unterhaltsmassnahmen. Dies führt zu einer realistischeren Abbildung des Verfalls, macht die Berechnung kostenoptimierter Massnahmenstrategien jedoch auch komplexer.

5.1.2.1 1-Jahres-Verfallsmatrizen

Für die mathematische Umwandlung einer 5-Jahres-Verfallsmatrix zu einer 1-Jahres-Verfallsmatrix ist es wichtig, sich deren Aufbau und Eigenschaften bewusst zu sein. Wie die Beispielsmatrix in Tabelle 21 zeigt, ist die Matrix überwiegend mit Nullen gefüllt und nur auf der Diagonalen, die das Verbleiben in einer Zustandsklasse repräsentiert, sowie auf der Superdiagonalen, die den Verfall in die nächstschlechtere Zustandsklasse abbildet, mit Werten besetzt. Eine Verfallsmatrix hat die Eigenschaft, dass die Werte zwischen 0 und 1 liegen und die Summe einer Zeile genau 1 ergibt (stochastische Matrix). Da eine spontane Zustandsverbesserung ausgeschlossen wird, beträgt der Wert auf der Diagonalen für das Verbleiben in der schlechtesten Zustandsklasse in der letzten Zeile und Spalte stets 1.

5-Jahres-Verfallsmatrix

	ZK 1	**ZK 2**	**ZK 3**	**ZK 4**	**ZK 5**
ZK 1	0.79	0.21	0	0	0
ZK 2	0	0.75	0.25	0	0
ZK 3	0	0	0.77	0.23	0
ZK 4	0	0	0	0.75	0.25
ZK 5	0	0	0	0	1

Tabelle 21: Beispiel einer 5-Jahres-Verfallsmatrix für den Schadensprozess ‘Korrosion im Stahlbeton’ bei neutralem Einfluss.

In einem ersten Schritt für die Umwandlung einer 5-Jahres-Verfallsmatrix (P_5) zu einer 1-Jahres-Verfallsmatrix (P_1) wird die fünfte Wurzel jedes Diagonalelements gezogen (Formel (4)). Diese Vorgehensweise zur Berechnung der Diagonalelemente kann für

solcher Verfallsmatrizen (obere Dreiecksmatrizen) analytisch hergeleitet werden (Alonso-Solorzano et al., 2023). Bei einer Matrix mit fünf Zustandsklassen ist $n = 5$.

$$P_1[i,i] = \sqrt[5]{P_5[i,i]} \qquad \textit{für } i = 1,\ 2,\ \ldots,\ n \tag{4}$$

In einem zweiten Schritt wird entsprechend der Eigenschaft, dass die Zeilensumme 1 ergibt, das Superdiagonalelement berechnet (Formel (5)). Diese Definition der Berechnung des Superdiagonalelements ist eine Modellannahme, die der Grundhypothese des monotonen Zustandsverfalls entspricht: Ein Objekt kann pro Zeitschritt höchstens in die nächstschlechtere Zustandsklasse übergehen. Dies ist insbesondere relevant, da bei kleineren Verfallsschritten (z. B. 1 Jahr statt 5 Jahre) der Zustandsübergang über denselben Zeitraum hinweg ohnehin weiter fortschreitet als bei einem grösseren Verfallsschritt, der nur einen einmaligen Übergang in die nächstschlechtere Zustandsklasse erlaubt. Das Superdiagonalelement wird somit nicht mathematisch bestimmt, sondern aus der Modelllogik abgeleitet und stellt sicher, dass jede Zeile die stochastische Eigenschaft (Summe = 1) beibehält.

$$P_1[i,i+1] = 1 - P_1[i,i] \qquad \textit{für } i = 1,\ 2,\ \ldots,\ n-1 \tag{5}$$

In einem dritten und letzten Schritt wird lediglich abgesichert, dass das letzte Element den Wert 1 hat (Formel (6)).

$$P_1[n,n] = 1 \tag{6}$$

Tabelle 22 zeigt die 1-Jahres-Matrix, welche aus der Umwandlung der 5-Jahres-Matrix in Tabelle 21 resultiert. Es fällt auf, dass die Werte auf der Diagonalen höher sind als bei der 5-Jahres-Version. Dies ist nachvollziehbar, da ein Zustandsvektor im übertragenen Sinne fünf Anwendungen der 1-Jahres-Verfallsmatrix durchlaufen muss, um im selben Zustand zu sein wie bei der einmaligen Anwendung der 5-Jahres-Verfallsmatrix.

1-Jahres-Verfallsmatrix

	ZK 1	**ZK 2**	**ZK 3**	**ZK 4**	**ZK 5**
ZK 1	0.95	0.05	0	0	0
ZK 2	0	0.94	0.06	0	0
ZK 3	0	0	0.95	0.05	0
ZK 4	0	0	0	0.94	0.06
ZK 5	0	0	0	0	1

Tabelle 22: Die berechnete 1-Jahres-Verfallsmatrix für den Schadensprozess ‘Korrosion im Stahlbeton’ bei neutralem Einfluss.

Die fünfmalige Anwendung der 1-Jahres-Verfallsmatrix ergibt nicht den exakt gleichen Zustand wie die einmalige Anwendung der 5-Jahres-Verfallsmatrix. Denn bei jeder Anwendung wandert ein kleiner Teil des Wertes des probabilistischen Zustandsvektors weiter zur nächstschlechteren Zustandsklasse. Dies lässt sich veranschaulichen, wenn man die 5-Jahres-Verfallsmatrix über die fünffache Matrixmultiplikation der 1-Jahres-Verfallsmatrix rekonstruiert (Tabelle 23).

Rekonstruierte 5-Jahres-Verfallsmatrix

	ZK 1	ZK 2	ZK 3	ZK 4	ZK 5
ZK 1	0.79	0.187	0.022	0.001	0
ZK 2	0	0.75	0.224	0.024	0.001
ZK 3	0	0	0.77	0.204	0.026
ZK 4	0	0	0	0.75	0.25
ZK 5	0	0	0	0	1

Tabelle 23: Die rekonstruierte 5-Jahres-Verfallsmatrix aus der 1-Jahres-Verfallsmatrix für den Schadensprozess 'Korrosion im Stahlbeton' bei neutralem Einfluss.

Während die Diagonalelemente konstant geblieben sind, was Sinn macht, damit wenigstens der Verbleib in einer Zustandsklasse gleichbleibt, sind die Werte auf der Superdiagonalen etwas breiter verteilt. Dies bedeutet, dass die Verschlechterung nun nicht nur in die nächstschlechtere Zustandsklasse möglich ist, sondern auch in die übernächstschlechtere. Mathematisch gesehen ist es nicht möglich genau dieselbe 5-Jahres-Verfallsmatrix zu rekonstruieren und daher ist diese Umwandlung in eine 1-Jahres-Verfallsmatrix der bestmögliche Weg die wichtigsten Eigenschaften beizubehalten. Dies liegt daran, dass die Multiplikation von Verfallsmatrizen einen stochastischen Prozess beschreibt, der sich über die Zeit akkumulativ entwickelt. Bei jeder Anwendung der Verfallsmatrix wird ein Teil der Wahrscheinlichkeit aus den besseren Zustandsklassen in die schlechteren überführt. Wird die 1-Jahres-Matrix fünfmal angewendet, so verschiebt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Zustände schrittweise weiter nach rechts (zu schlechteren Zuständen), als dies in einem einzigen Schritt mit der 5-Jahres-Matrix geschieht, deren Struktur nur auf der Diagonalen und der Superdiagonalen von Null verschiedene Werte enthält.

5.1.2.2 Nicht stationäre Verfallsmatrizen

Die Berücksichtigung eines nicht stationären Verfalls ermöglicht eine feinere Modellierung der Zustandsänderung. Da das ASTRA bereits Verfallsmatrizen verwendet, bietet sich eine Anpassung zu nicht stationären Verfallsmatrizen an. So kann beispielsweise die Verbindung zwischen der Anzahl durchgeführter Unterhaltsmassnahmen und dem Zustandsverlauf untersucht werden. Bei der Beschaffung der Datengrundlagen aus KUBA für den MINERVA-Datensatz zeigte sich jedoch, dass für die Teststrecke nur lückenhafte oder teilweise fehlende Informationen vorlagen. Zu Demonstrationszwekken wird deshalb nur eine einfache Implementierung gezeigt in Abhängigkeit des Alters. Die Gleichungen (7)-(8) beschreiben das Vorgehen. Diese Abschätzung der Zustandsnote wie hier vorgestellt, wird im Kapitel 6.2 zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen verwendet.

$$\boldsymbol{V} = \begin{pmatrix} p_{1,1} \cdot a^n & 1 - p_{1,1} \cdot a^n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{2,2} \cdot a^n & 1 - p_{2,2} \cdot a^n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{3,3} \cdot a^n & 1 - p_{3,3} \cdot a^n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{4,4} \cdot a^n & 1 - p_{4,4} \cdot a^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{7}$$

$$n = \left\lfloor \frac{Alter_{BWT}}{Nutzungsdauer_{BWT}} \cdot m \right\rfloor \tag{8}$$

wobei

$\boldsymbol{V}$ eine Verfallsmatrix ist, die vom Alter, Schadensprozess und Einfluss abhängig ist,

$p_{k,k}$ die Wahrscheinlichkeit ist, in Zustand k zu verbleiben,

a ein Faktor $\in (0,1]$ ist, der die Veränderung der Verfallsgeschwindigkeit beschreibt und für die Arbeit bei der 1-Jahres-Verfallsmatrizen mit 0.99 und bei 5-Jahres-Verfallsmatrizen mit 0.95 angenommen wird,

n ein Exponent ist, der die Wirkung von a verstärkt und nach Gleichung (8) berechnet wird,

m die Anzahl der Altersabschnitte ist, in die die Nutzungsdauer unterteilt wird, um altersabhängige Effekte auf die Verfallsgeschwindigkeit zu berücksichtigen. Die Abrundungsfunktion $\lfloor \cdot \rfloor$ macht n zu einer Ganzzahl, wodurch die Anpassung der Verfallsgeschwindigkeit altersabhängig skaliert wird. Angenommen $Alter_{BWT} = 51, Nutzungsdauer_{BWT} = 80$ und $m = 4$, dann ist $n = 2$.

5.1.3 Anwendung an der Teststrecke

Auf der für das Projekt MINERVA definierten Teststrecke (Kapitel 3) gibt es 30 Brükkenanlagen mit 54 Brückenbauwerken. Von diesen Brücken wurden insgesamt 3143 Bauwerksteile identifiziert, welche kostenrelevant sind.

Bauwerksteile ausserhalb der verwendbaren Zustandsklassen

Generalisierter Bauwerksteiltyp		Zustandsklasse				Total
Nr.	**Name**	**(leer)**	**9**	**91**	**92**	
5	Widerlager	5	1	3		9
7	Stützmauer, Flügelmauer	8	1			9
9	Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben	41		2		43
10	Wand, Scheibe	4		11		15
14	Fahrbahnplatte	6	2	8		16
16	Randborde, Brüstung	26				26
18	Lager, Gelenke	42		31	16	89
19	Fahrbahnübergang	32		1		33
23	Abdichtung	3	1	4	6	14
24	Belag	6				6
25	Leitschranke, Geländer	19				19
28	Rohr, Bachdurchlass		1	2		3
Total		**192**	**6**	**62**	**22**	**282**

Tabelle 24: Anzahl der Bauwerksteile mit Zustandsklasse ausserhalb der gewünschten Skala von 1 bis 5 aufgeschlüsselt nach generalisiertem Bauwerksteiltyp.

Von diesen 3143 Bauwerksteilen haben 282 (9%) bei der letzten Inspektion eine Zustandsklasse zugewiesen bekommen, welche sich nicht auf der bewertbaren Skala von 1 bis 5 befinden (vgl. Kapitel 1.4). Diese Bauwerksteile wurden entweder der Zustandsklasse 9, 91, 92 zugewiesen, welche für nicht inspizierbare Infrastrukturobjekte verwendet werden, oder es wurde gar kein Zustand zugewiesen (leer). Diese 282 Bauwerksteile sind über 43 Brücken verteilt und verteilen sich auch über fast alle

generalisierten Bauwerksteiltypen (Tabelle 24). Für diese Bauwerksteile ermöglicht die vorgestellte Methodik die Abschätzung des gegenwärtigen Zustands um diesen für die weiterführenden Algorithmen (Kapitel 7) eine verwendbare Zustandsklasse auf der Skala von 1 bis 5 zuzuweisen.

Datenvorbereitung

Da in dem Datensatz doch 91% der Bauwerksteile keine Abschätzung des gegenwärtigen Zustands benötigen, kann man diese Bauwerksteile verwenden, um die vorgestellte Methodik zu validieren. Um die Zustandsklasse aus der Inspektion mit der Abschätzung durch die Tabellen mit den bedingten Wahrscheinlichkeiten zu vergleichen, wurden diese entsprechend der Anzahl vergangener Jahre seit der letzten Inspektion mit der in Abschnitt 5.1.2 vorgestellten 1-Jahres Verfallsmatrix für das aktuelle Jahr berechnet (Zeitpunkt T=0).

Für die Anwendung der Abschätzung an der gesamten Teststrecke müssen den Bauwerken abhängig von ihrem Standort die Einflusswerte Verkehr und Umwelt zugewiesen werden (beschrieben auf Seite 107). Für die Einflussgrösse Verkehr wurden die Schwellenwerte für den DTV einer Brücke bereits in Tabelle 13 vorgestellt. Die Zuweisung einer Brücke zur korrekten Messstelle konnte aufgrund fehlender Daten nicht automatisiert durchgeführt werden und wurde daher für die Teststrecke manuell durchgeführt. Für diese Zuweisung wurden alle Brücken eines Abschnittes zwischen zwei Rampen (Ein- und Ausfahrten) der entsprechenden Messstelle zugewiesen. Brücken, welche auf Kreuzungen zwischen den Ein- und Ausfahrten einer Rampe stehen, können nicht direkt einem Messpunkt der Verkehrszählung zugewiesen werden. Da gleichzeitig Fahrzeuge rauf- und runterfahren findet ein Netto-Verkehrsfluss statt, welcher nicht über die Brücke führt. Aus diesem Grund ist der Verkehr über die Brücke maximal die Verkehrsmenge, welche der kleineren der beiden benachbarten Verkehrsmessstellen entspricht. Für solche Brücken wurde aus diesem Grund die geringere Verkehrsmenge der beiden benachbarten Verkehrsmessstellen angenommen, auch wenn diese nur die maximal mögliche Verkehrsmenge darstellt und auf Grundlage der vorhandenen Informationen keine genauere Angabe zur tatsächlichen Verkehrsmenge gemacht werden kann.

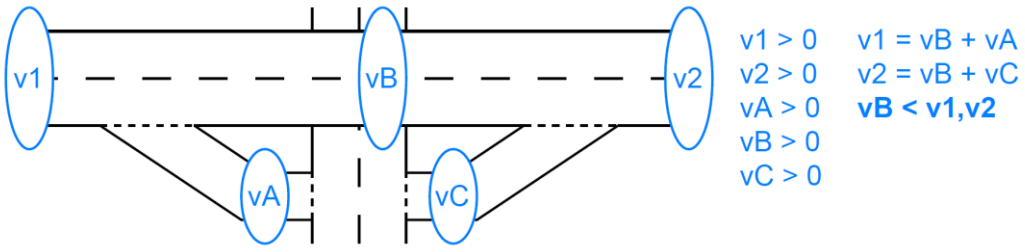


Abbildung 46: Illustration der Herleitung des maximalen Verkehrsflusses über eine Brücke zwischen Ein- und Ausfahrten.

Von den 54 Brückenbauwerken auf der Testrecke wurde der Einflusswert ‘Hoch’ 21-mal, ‘Mittel’ 33-mal und ‘Niedrig’ 2-mal zugewiesen. Der Einflusswert für die Einflussgrösse Umwelt wurde aus der Karte in Abbildung 42 für jede Brücke ausgelesen. Wie auf der Karte ersichtlich, ist die nordöstliche Uferregion des Genfersees schweizweit verglichen dem Einflusswert ‘Niedrig’ zuzuordnen, wie dies entsprechend für alle

Brücken der Teststrecke der Fall ist. Der Einflusswert für das Alter wurde spezifisch für jedes Bauwerksteil anhand der angegebenen erwarteten Nutzungsdauer berechnet. Die Daten zur letzten Massnahme sind leider nicht auf der Ebene der Bauwerksteile vorhanden, sondern nur auf der Ebene der Bauwerksanlage. Aus diesem Grund wurde die Zuweisung des Einflusswerts Alter etwas komplizierter. Aufgrund des Jahres der letzten Massnahme an einer Bauwerksanlage, was auch immer diese war, wurde für alle Bauwerksteile verglichen, ob die erwartete Nutzungsdauer des Bauwerksteils bei dieser Massnahme bereits überschritten war. War dies der Fall, wurde es als naheliegend angenommen, dass an diesem Bauwerksteil eine Massnahme durchgeführt wurde und der Einflusswert Alter wurde anhand der vergangenen Jahre seit dieser letzten Massnahme festgelegt. Bei den anderen Bauwerksteilen, welche bei der letzten Massnahme an der Bauwerksanlage noch nicht die erwartete Nutzungsdauer erreicht hatten, wurde es als naheliegend angenommen, dass kaum etwas gemacht wurde bei dieser letzten Massnahme. Dementsprechend wurde der Einflusswert Alter bei diesen Bauwerksteilen anhand der vergangenen Jahre seit dem Bau der Brücke zugewiesen. Diese Annahme wurde unabhängig möglichen Informationen aus Inspektionen getroffen.

Auswertung

Für die Validierung der Zustandsschätzung gibt es verschiedene Metriken. Da die Abschätzung den Zustand in Form eines Zustandsvektors mit probabilistischen Werten für jede Zustandsklasse angibt, kommen verschieden Metriken in Frage. Es gibt klassische Metriken wie den ‘Mean Absolute Error’ (MAE) oder den ‘Root Mean Squared Error’ (RMSE), welche sich für einzelne Werte oder Vektoren mit untereinander unabhängigen Werten eignen. In eine ähnliche Kategorie fällt die Vektornorm, welche die euklidische Distanz zweier Vektoren in unserem Fall in den fünf Dimensionen berechnet. Jedoch wird auch bei dieser Metrik die Eigenschaft des ordinalen Zusammenhangs der fünf Zustandsklassen vernachlässigt. Diese Eigenschaft bedeutet, dass die probabilistischen Werte für jede Zustandsklasse zusammen eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung mit fünf Bereichen abbilden, und diese fünf Bereiche in einer Reihenfolge sind und nicht unabhängig voneinander. Aus diesem Grund wurde besonderes Augenmerk auf Metriken gelegt, welche sich eignen, um verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu vergleichen.

Da die abgeschätzten Zustandswahrscheinlichkeitsvektoren mit deterministischen oder durch Verfallsmatrizen verschlechterte Zustandsvektoren aus Inspektionsdaten verglichen werden, ist die Wahl geeigneter Metriken entscheidend. Direkt nach einer Inspektion hat der Zustandsvektor eine deterministische Verteilung, die eine klare Zustandszuweisung, die der Inspektion, darstellt (z. B. [0, 1, 0, 0, 0]). Sind seit der Inspektion ein paar Jahre vergangen bewirkt die Anwendung der Verfallsmatrizen, zur Abschätzung des unterdessen aktuellen Zustands (T=0), oft asymmetrische Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Bei diesen verbleibt der grösste Teil der Wahrscheinlichkeit in einem bestimmten Zustand und nur schrittweise geht die Verteilung in schlechtere Zustände über (z.B. [0, 0.75, 0.22, 0.03, 0]). Klassische Fehlermasse wie mittlerer absoluter Fehler (MAE) oder euklidische Distanz werden dieser Art von Daten nicht zufriedenstellend gerecht. Es muss auch ein gewisser Fehler in Kauf genommen werden, wenn die Methodik verschiedene resultierende Zustandsverteilungen unter gleichen Einflusswertekombinationen möglichst allgemein abdecken möchte.

Eine Metrik, welche die genannten Eigenschaften einfangen kann, ist die 'Earth Mover's Distance' (EMD). Diese entspricht der von den Mathematikern Kantorovič und Vaserštajn geprägten Metrik zwischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen, der sogenannten Wasserstein-Distanz 1. Ordnung (W1) für diskrete Verteilungen. Sie beschreibt, wie viel 'Arbeit' notwendig ist, um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung in eine andere 'umzuwandeln'. Die 'Arbeit' entspricht hierbei der 'Wahrscheinlichkeitsmasse' multipliziert mit der Distanz, also der Anzahl Übergänge in andere Zustandsklassenbereiche. Der Wert dieser Metrik ist diese 'Arbeit', welche in unserem Beispiel mit fünf Zustandsklassen Werte von 0 bis 4 annehmen kann. Der maximale und schlechteste EMD-Wert von 4 würde bedeuten, dass, für eine Übereinstimmung, die ganze 'Wahrscheinlichkeitsmasse' von der Zustandsklasse 1 zu 5 oder umgekehrt bewegt werden müsste. Einen EMD-Wert von 1 würde bedeuten, dass die notwendige Verschiebung eine ganze Zustandsklasse ausmacht. Entsprechend könnte man einen EMD-Wert von 0.43 interpretieren, dass die Abschätzung weniger als eine halbe Zustandsklasse daneben liegt. Die Metrik bietet somit eine fast bildliche Interpretation, welche einfach verständlich ist. Wegen der Kontextabhängigkeit (Anzahl diskrete Bereiche) dieser Metrik gibt es jedoch keine festen, oder allgemein anerkannte Schwellenwerte oder Einteilungen für die Interpretation. Formel (9) zeigt die Berechnung der EMD, respektive der W1 für diskrete Verteilungen, für die zwei Verteilungen P und Q. Dabei sind C_P und C_Q die kumulativen Verteilungen mit $C_P = \sum_{j=1}^{i} p_j$ und $n = 5$ für die fünf Zustandsklassen.

$$EMD(P,Q) = W_1(P,Q) = \sum_{i=1}^{n} \left| C_P(i) - C_Q(i) \right| = \sum_{i=1}^{n} \left| \sum_{j=1}^{i} (p_j - q_j) \right| \tag{9}$$

In Tabelle 25 ist das Abschneiden der Validierung der Methodik im Vergleich zu den Inspektionsdaten an der Teststrecke anhand vier verschiedener Metriken gezeigt. Wie bereits zuvor argumentiert eignet sich die Metrik EMD voraussichtlich am besten, um den Daten gerecht zu werden. Der EMD-Wert über alle 2861 Bauwerksteile unabhängig des Typs beträgt 0.62 und bedeutet demnach, dass eine Abschätzung durchschnittlich etwas mehr als eine halbe Zustandsklasse daneben liegt. Dieses Resultat ist unter den gegebenen Eigenschaften des Kontrolldatensatzes zu betrachten (Bspw. Das mittlere Alter oder Zustand der Bauwerksteile). Ein EMD-Wert von 0.62 bedeutet, dass die abgeschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilung im Durchschnitt um etwa 15 % der ganzen Zustandsklassenskala (1–5) verschoben werden muss, um mit der tatsächlichen Verteilung übereinzustimmen. In Anbetracht der Natur dieser Methodik aus eher allgemeinen Einflussgrössen eine Abschätzung zum Zustand abzugeben, scheint dieser Fehlerwert eine akzeptable bis gute Übereinstimmung darzustellen, gerade auch, wenn man berücksichtigt, dass ein gewisser Fehler bei deterministischen Zuständen nach Inspektionen unvermeidbar ist. Das Resultat muss auch unter Berücksichtigung der betrachteten Situation angeschaut werden, solche Abschätzungen ohne vorgängig bekannte Zustandsdaten zu machen. Dies bedeutet auch, dass eventuell einfach nur den durchschnittlichen Zustand als Abschätzung zu verwenden, bessere Resultate hervorbringen könnte.

Betrachtet man die Werte der anderen Metriken in Tabelle 25 kann man sehen, dass MAE, RMSE und euklidische Distanz trotz der zuvor erklärten Unterschiede in Bezug

auf die ordinalen Eigenschaften ähnliche Tendenzen zeigen wie die EMD-Werte. Diese Metriken bewerten die Genauigkeit aber etwas schlechter. Die MAE- und RMSE-Werte beziehen sich auf den gesamten Zustandsklassenvektor mit fünf Bereichen, einschliesslich derer mit Null-Wahrscheinlichkeit. Dadurch entspricht ein MAE von 0.2 ungefähr einer durchschnittlichen Abweichung um eine Zustandsklasse. Der RMSE bestraft grössere Abweichungen noch stärker als der MAE. Da die RMSE-Werte meistens ungefähr 1.5-mal höher liegen als die MAE-Werte, deutet das auf das gelegentliche Auftreten grösserer Abweichungen hin.

Auswertung durch verschiedene Metriken

Generalisierter Bauwerksteiltyp Nr.	Name	Anzahl	EMD	MAE	RMSE	Eukl. Distanz
5	Widerlager	175	0.39	0.13	0.19	0.42
7	Stützmauer, Flügelmauer	165	0.42	0.14	0.20	0.44
9	Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben	383	0.28	0.11	0.17	0.38
10	Wand, Scheibe	657	0.58	0.23	0.35	0.79
11	Vollwandträger	168	0.80	0.30	0.47	1.04
12	Kastenträger	6	0.57	0.21	0.32	0.72
13	Fachwerkträger	4	1.30	0.38	0.52	1.17
14	Fahrbahnplatte	172	0.79	0.28	0.42	0.94
16	Randborde, Brüstung	189	0.47	0.16	0.23	0.51
18	Lager, Gelenke	529	0.89	0.25	0.34	0.77
19	Fahrbahnübergang	100	0.75	0.23	0.34	0.77
22	Bogen, Gewölbe	8	0.45	0.15	0.22	0.50
23	Abdichtung	76	0.73	0.21	0.29	0.65
24	Belag	78	0.83	0.26	0.37	0.82
25	Leitschranke, Geländer	145	0.57	0.19	0.29	0.64
28	Rohr, Bachdurchlass	6	0.20	0.08	0.12	0.26
Total		**2861**	**0.62**	**0.21**	**0.31**	**0.70**

Tabelle 25: Mittlere Abweichungen der abgeschätzten Zustandsklassenverteilungen für unterschiedliche generalisierte Bauwerksteiltypen anhand von vier Metriken.

Auswertung bezüglich Schadensprozess

Schadensprozess Nr.	Name	Anzahl	EMD
10	Korrosion im Stahlbeton (und Spannbeton)	1842	0.51
40	Korrosion am Baustahl	236	0.67
60	Schäden an Fahrbahnübergängen	100	0.75
70	Schäden an Lagern	529	0.89
80	Schäden am Belag	78	0.83
90	Schäden an der Abdichtung	76	0.73
Grand Total		**2861**	**0.62**

Tabelle 26: Mittlere Abweichungen der abgeschätzten Zustandsklassenverteilungen in Bezug auf die Schadensprozesse.

Betrachtet man die Metrik für die unterschiedlichen generalisierten Bauwerksteiltypen, kann man sehen, dass es auch unterschiedliche Übereinstimmungen von 0.2 bei 'Rohr, Bachdurchlass' bis 1.3 bei 'Fachwerkträger'. Diese beiden Extreme behandeln aber auch eher seltene Bauwerksteile und sind daher weniger repräsentativ. Betrachtet man nur die Typen mit mindestens 100 Bauwerksteilen reicht die Übereinstimmung von 0.28 bei 'Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben' bis zu 0.89 bei 'Lager, Gelenke'. Die Tabelle 26 zeigt noch besser, dass die Abschätzung insbesondere für den Schadensprozess 'Korrosion im Stahlbeton (und Spannbeton)' mit den meisten Bauwerksteilen die beste Übereinstimmung aufweist bei der Abschätzung des gegenwärtigen Zustands.

Eine weiterführende direkte unkomplizierte Möglichkeit die Funktionalität dieser Methode zu kontrollieren ist es diese mit dem Ansatz, der sonst verfolgt werden würde, zu vergleichen. Einen spezifischen Ansatz um den Zustand ohne Informationen abzuschätzen, wurde nicht gefunden, ausser der Verwendung der Zustandsklassen 9, 91, 92 oder gar keinen Zustand zuzuweisen. Diese Zustandsklassen sind jedoch ausserhalb der bewertbaren Skala von 1 bis 5 und erschweren somit die Berücksichtigung dieser Bauwerksteile mittels Algorithmen für die Planung von Unterhaltsmassnahmen. Die Betrachtung einzelner Bauwerksteile kann noch weiteren Einblick zur Abschätzung mit den bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen gewähren.

Ein illustratives Beispiel sind die Querträger bei der *Pont sur La Mèbre* nördlich von Lausanne. Bei der letzten Inspektion im Jahr 2019 wurde dem Querträger 1 die Zustandsklasse 2 zugewiesen. Die Querträger 2 und 3 waren jedoch nicht inspizierbar und wurden der Zustandsklasse 91 zugewiesen. Der Querträger 4 wurde aber in Zustandsklasse 3 eingestuft. Die Tabelle 27 zeigt den Querträger 1 und wie die Zustandsschätzung mit der bedingten Wahrscheinlichkeitstabelle im Vergleich mit dem Zustand der Inspektion. Dasselbe findet sich in Tabelle 28 für den Querträger 4. Da die Inspektion im Jahr 2019 stattgefunden hat, wurde mittels der erklärten Verfallsmatrizen, der Zustand zum aktuellen Zeitpunkt (Jahr 2024) berechnet, da auch das Alter für die Abschätzung auf diesem Jahr beruht. Es ist ersichtlich, dass beide Querträger, sowie die beiden in Zustandsklasse 91, dieselben Einflusswerte haben, welche für die Abschätzung durch die bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle verwendet werden. Diese sind die generalisierte Bauwerkteiltypen-Nummer und die Schadensprozess-Nummer für die Auswahl der korrekten Tabelle, sowie die Einflusswerte bezüglich Alter, Verkehr und Umwelt zur Auswahl der genauen Abschätzwerte. Aus diesem Grund ist die Abschätzung in diesem Fall dieselbe für beide Querträger. Während die Abschätzung für Querträger 1 weniger gut passt und einen EMD von 0.67 aufweist, ist die Übereinstimmung für Querträger 4 schon einiges besser. In diesem Beispiel lässt sich auch der EMD besser verstehen, indem man die Prozentpunkte sieht, welche verschoben werden müssten.

Die Querträger 2 und 3, welche mit Zustandsklasse 91 nicht eine, für die weiterführenden Algorithmen, verwendbare Zustandsklasse auf der Skala von 1 bis 5 haben, können daher über diese Abschätzung des gegenwärtigen Zustands berücksichtigt werden. Somit kann man für alle kostenrelevanten Bauwerksteile einen aktuellen Zustandsvektor aufstellen und diesen mit den weiterführenden Algorithmen für die

Planung von Unterhaltsmassnahmen weiterverwenden (siehe Tabelle 29). Die Abschätzungen für alle Bauwerksteile können im MINERVA-Datensatz gefunden werden.

Beispiel am Bauwerksteil

Bezeichnung	**Gen. BWT-Typ Nr.**	**Schadensprozess Nr.**	**Letzte Inspektion**
Querträger Achse 1	10	10	21.05.2019
Alter	**Verkehr**	**Umwelt**	
Drittes Viertel	Hoch	Niedrig	

Zustandsdatenquelle	**ZK 1**	**ZK 2**	**ZK 3**	**ZK 4**	**ZK 5**	**EMD**
Letzte Inspektion	0	1	0	0	0	
Inspektion für T=0 berechnet	0	0.75	0.22	0.02	0.00	
Abschätzung bed. Wahrscheinlichkeitstabelle	0	0.11	0.89	0.00	0	**0.67**

Tabelle 27: Auswertung der Abschätzung am Querträger 1 mit der EMD-Metrik.

Beispiel am Bauwerksteil

Bezeichnung	**Gen. BWT-Typ Nr.**	**Schadensprozess Nr.**	**Letzte Inspektion**
Querträger Achse 4	10	10	21.05.2019
Alter	**Verkehr**	**Umwelt**	
Drittes Viertel	Hoch	Niedrig	

Zustandsdatenquelle	**ZK 1**	**ZK 2**	**ZK 3**	**ZK 4**	**ZK 5**	**EMD**
Letzte Inspektion	0	0	1	0	0	
Inspektion hochgerechnet (T=0)	0	0	0.77	0.20	0.03	
Abschätzung bed. Wahrscheinlichkeitstabelle	0	0.11	0.89	0	0	**0.36**

Tabelle 28: Auswertung der Abschätzung am Querträger 4 mit der EMD-Metrik.

Komplettierte Zustandsvektoren für alle Bauwerksteile

Bezeichnung	**ZK 1**	**ZK 2**	**ZK 3**	**ZK 4**	**ZK 5**	**Abschätzung**
Querträger 1	0	0.75	0.22	0.02	0.00	Nein
Querträger 2	0	0.11	0.89	0	0	Ja
Querträger 3	0	0.11	0.89	0	0	Ja
Querträger 4	0	0	0.77	0.20	0.03	Nein

Tabelle 29: Beispiel der Verwendung der Zustandsschätzung anhand von vier Querträgern einer Brücke.

5.2 Trassee

Die Abschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Zustands des Trassees findet, wie bereits bei der Zustandserfassung und -bewertung, auf Basis von Streckenbewertungsflächen statt (100 m lang auf Stamm- und Zubringerachsen). Die detaillierte Beschreibung der Überwachung der Fahrbahn mittels Zustandserfassung und -bewertung ist in der gleichnamigen ASTRA-Richtlinie (ASTRA 11021) festgehalten. Die mit schnellfahrenden Messsystemen erhobenen Messwerte der Streckenbewertungsflächen werden als Grundlage zur Berechnung der Zustandsindizes verwendet (gemäss der Norm VSS 40 925B). Die Indikatoren erhalten Zustandsnoten auf einer kontinuierlichen Skala von 0 (gut) bis 5 (schlecht). Die vier vom ASTRA verwendeten Zustandsindikatoren sind:

- I0: Oberflächenschäden
- I2: Ebenheit in Längsrichtung
- I3: Ebenheit in Querrichtung
- I4: Griffigkeit

Weitere in der Norm definierte aber hier nicht weiter verwendete Indikatoren wären einerseits der Indikator I1, der ebenfalls Oberflächenschäden beschreibt, und I5 für die Tragfähigkeit. Die Analyse in diesem Kapitel beschränkt sich auf dichte Beläge und der Umstand, dass Messungen von Indikatorwerten nicht genau wiederholbar sind, wird berücksichtigt. Beläge mit spezifischen Funktionen, wie beispielsweise lärmarme Beläge, werden ersetzt, wenn die entsprechende Funktion nicht mehr gewährleistet ist.

5.2.1 Abschätzung des gegenwärtigen Zustands

Will man die Fahrbahnen aktiv in eine integrierte Planung von Unterhaltsmassnahmen verschiedener Objekttypen einbeziehen, sind konsistente und vollständige Daten sehr wichtig. Mit der zunehmenden Digitalisierung bei der Planung von Massnahmen, und der damit einhergehenden Nutzung der Daten von Algorithmen, sind vollständige Datensätze umso wichtiger. Da Datensätze auch Lücken aufweisen können, wird in diesem Unterkapitel eine Methodik vorgestellt, welche es erlaubt, so gut wie möglich fehlende Zustandswerte abzuschätzen.

Eine intuitive Herangehensweise, um die fehlenden Indikatorwerte abzuschätzen, wäre die lineare Interpolation über die Werte der beiden benachbarten Strassenbewertungsflächen. Die lineare Interpolation berücksichtigt jedoch lediglich die direkten Verbindungen zwischen benachbarten Punkten und vernachlässigt dabei die räumliche Struktur und Korrelation im gesamten Datensatz. Besonders bei unregelmässig verteilten Punkten kann dies jedoch zu ungenauen Abschätzungen führen. In Abbildung 47 kann man an einer Illustration sehen, wie für fehlende Datenpunkte (Rot) die benachbarten Datenpunkte einbezogen werden können, um das Abschätzungsmodell anzuwenden.

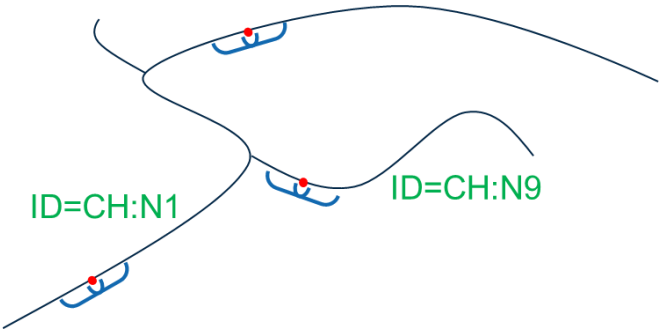


Abbildung 47: Illustrative Darstellung wie fehlende Zustandsdaten (Rot) anhand der benachbarten Daten (Blau) für ein Strassennetz abgeschätzt werden können.

Eine mögliche Methode zur Abschätzung fehlender Werte in räumlichen Datensätzen ist Kriging (Wackernagel, 1998), ein geostatistisches Interpolationsverfahren. Dabei wird der gesuchte Wert als gewichteter Mittelwert benachbarter Punkte berechnet, wobei die Gewichte aus der räumlichen Kovarianz der Daten abgeleitet werden. Diese Kovarianz wird typischerweise in Abhängigkeit der Distanz modelliert, wodurch Kriging räumliche Zusammenhänge auch über grössere, rundherum betrachtete Bereiche explizit berücksichtigt und so genauere Abschätzungen ermöglicht. Es eignet sich besonders dann, wenn Daten punktuell, unregelmässig verteilt oder teilweise unvollständig sind. Kriging erlaubt somit auch gute Abschätzungen zu erlangen, wenn keine Daten von früheren Zustandsbewertungen vorhanden sind. Ein wichtiger Teil der Anwendung von Kriging ist die Auswahl der optimalen Anzahl der berücksichtigten Nachbarspunkte. Die Berücksichtigung von nur wenigen Nachbarspunkten bedeutet eine limitierte Verfügbarkeit von Informationen, was eine gute Abschätzung erschwert. Die Berücksichtigung einer grossen Anzahl Nachbarspunkte beinhaltet ihrerseits mehr Punkte mit nur marginalem zusätzlichem Informationsnutzen.

Die Grundidee von Kriging besteht darin, den unbekannten Wert an einem Ort x_0 als gewichtete Summe benachbarter Messwerte abzuschätzen:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i) \tag{10}$$

Dabei sind $Z(x_i)$ die bekannten Werte an den benachbarten Positionen x_i, und λ_i sind die Gewichte. Die wesentlichen Schritte von Kriging lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. **Bestimmen der zu berücksichtigenden Daten**, respektive der Grösse des Bereichs für die Abschätzung (d.h. Anzahl der Nachbarspunkte).
2. **Herausfinden der Semivarianz**, um die Beziehung eines Wertes zum Zielwert in Abhängigkeit seiner Distanz zu kennen. Hierfür wird oft die empirische Semivarianz mit Formel (11) berechnet, wobei h der Abstand zwischen Punkpaaren ist (h kann auch diskret definiert werden, z.B. 100 m, 200 m, $N(h)$ ist die Anzahl Paare mit dem Abstand h). Die empirische Semivarianz wird anschliessen durch eine geeignete Funktion angenähert, was das theoretische Semivariogramm ergibt.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \tag{11}$$

3. **Aufstellen der Matrix der Semivarianzen** gemäss dem theoretischen Variogrammmodell (Formel (12) mittels der Berechnung der Semivarianzwerte zwischen allen berücksichtigten Datenpunkten ($\gamma(x_i, x_j)$ Semivarianz zwischen Punkt x_i und x_j) als Grundlage zur Bestimmung der Gewichte λ_i. Das Semivariogramm beschreibt den Zusammenhang zwischen Distanz h und Semivarianz $\gamma(h)$ als kontinuierliche Funktion und wird zur Modellierung der räumlichen Abhängigkeit verwendet. Für die eigentliche Kriging-Berechnung wird daraus eine diskrete Matrix der Semivarianzen abgeleitet, in der für jedes Punktpaar (x_i, x_j) der entsprechende Semivarianzwert gemäss dem theoretischen Variogrammmodell eingetragen wird.

$$\Gamma \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad mit \quad \Gamma_{ij} = \gamma(x_i, x_j) \tag{12}$$

4. **Ermitteln der Gewichte** λ_i durch das Aufstellen eines linearen Gleichungssystems (13) mit der Matrix der Semivarianzen zwischen den bekannten Punkten sowie dem Vektor der Semivarianzen zwischen den bekannten Punkten und dem Zielpunkt.

$$\begin{bmatrix} \Gamma & 1 \\ 1^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma \\ 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$\Gamma \in \mathbb{R}^{n \times n}$: Matrix der Semivarianzen zwischen den n bekannten Punkten
$\lambda \in \mathbb{R}^n$: Vektor der zu bestimmenden Kriging-Gewichte
$1 \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: Spaltenvektor aus Einsen (für die Nebenbedingung $\sum \lambda_i = 1$)
$\mu \in \mathbb{R}$: Lagrange-Multiplikator
$\gamma \in \mathbb{R}^n$: Vektor der Semivarianzen zwischen den bekannten Punkten und dem Zielpunkt

5. **Berechnen des Abschätzwerts** am Zielpunkt mit Formel (10) mit den ermittelten Gewichten.

Kriging wird also verwendet, um fehlende Daten abschätzen zu können, wobei man sich die räumliche Korrelation zunutze macht. Die Methodik kann damit auf unterschiedliche raumbezogene Daten angewendet werden. Dies erlaubt im Kontext der Strassen auch eine direkte Abschätzung der vier Indikatoren des Fahrbahnzustands. Im wissenschaftlichen Artikel von Lethanh et al. (2016) wird beschrieben, wie Kriging zur Abschätzung von Fahrbahnzuständen eingesetzt werden kann.

In diesem Kapitel wird eine leicht abgeänderte Variante des Krigings verwendet. Im wissenschaftlichen Artikel von Moghtadernejad et al. (2023) wurden verschiedene Kriging-Varianten verglichen, wobei ein neuer hybrider Ansatz mit einem ‘Artificial Neural Network’, kurz ANN, vielversprechende Resultate lieferte. Das im Artikel vorgestellte

ANN-Kriging wurde für dieses Projekt leicht adaptiert (Schritte 1-4 im folgenden Abschnitt), um den spezifischen Ausgangslagen und Ansprüchen gerecht zu werden.

5.2.1.2 Methodik

Neuronale Netze gehören zu den Methoden des maschinellen Lernens, ein Teilbereich von KI. Sie können durch Training Muster in Daten erkennen und erwartete Ausgaben abschätzen. Inspiriert vom menschlichen Gehirn sind die Neuronen der Eingabeschicht über gewichtete Verbindungen mit den Neuronen der nächsten Schicht verknüpft. Mit einer beliebigen Anzahl von Zwischenschichten bis hin zur Ausgabeschicht kann so ein neuronales Netz aufgebaut werden. Beim Training mit Daten, deren Zielwerte bekannt sind, werden die Gewichte der Verbindungen laufend angepasst, um den Fehler zwischen den abgeschätzten und den tatsächlichen Werten zu minimieren. Mit der Verwendung von sogenannten 'Batches' (Teilgruppen oder Stapel von Trainingsdaten) wird die Anpassung der Gewichte erst nach der Auswertung einer bestimmten Anzahl (Batchgrösse) zufällig gewählter Trainingsdaten gemacht. Die Verwendung solcher Datenstapel beim Training neuronaler Netze ermöglicht eine effizientere Nutzung der Rechenressourcen, stabilere Gradientenverläufe sowie eine bessere Generalisierungsfähigkeit, da das Modell schrittweise aus zufälligen Teilmengen der Trainingsdaten lernt. Durch mehrmaliges Wiederholen dieses Trainings mit denselben Daten (Epochen) verbessert sich die Genauigkeit der Abschätzungen kontinuierlich. Der Aufbau eines ANNs und somit die Struktur der einzelnen Schichten kann vom Entwickler individuell festgelegt werden. Diese Eigenschaft wurde im vorgeschlagenen hybriden ANN-Kriging-Ansatz genutzt. Der Ansatz ist insofern hybrid, als dass die grundsätzlichen Schritte des Krigings im neuralen Netz imitiert sind.

1. **Bestimmen der zu berücksichtigenden Daten**
   Das für dieses Projekt verwendete ANN-Modell ist in Abbildung 48 am Beispiel von 4 berücksichtigten Nachbarsbewertungsflächen (werden abstrahiert auch als Punkte behandelt) dargestellt. Ganz links werden die relative Distanz zu P0 (D) und die um den Mittelwert des Trainingsdatensatzes zentrierten Zustandsnoten (Z) der benachbarten Punkte von P0 in Matrixform als Eingabeschicht ins Modell gegeben. Diese Matrixform erlaub es die Relation von Distanz und Zustandsnote für jeden Nachbarspunkt dem Modell mitzugeben.

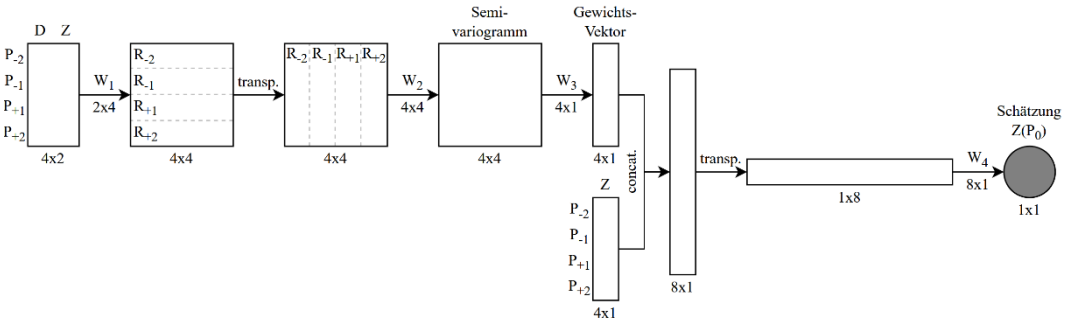


Abbildung 48: Struktur des verwendeten ANN-Kriging-Modells am Beispiel von 4 Nachbarn (D=Distanz, Z=Zustandsnote, W=trainierte Gewichte).

2. **Herausfinden der Semivarianz**
   Distanz und Zustandsnote der Nachbarpunkte werden über die erste zu trainierende Gewichtsmatrix W1 linear zusammengerechnet. Dadurch sind die Zeilen bei der resultierenden 4x4 Matrix lineare Kombinationen von weiterhin ausschliesslich Informationen bezüglich dem entsprechenden Nachbarspunkt selbst (veranschaulicht in Abbildung 49 mit den 1x4 Vektoren $R_{+/-i}$). Ähnlich wie die Semivarianz, lernt die Gewichtsmatrix W1 durch Training eine, zumindest lokal, optimale Kombination aus Distanz und Zustandsnote, die zur Abschätzung des Zielwerts beiträgt.

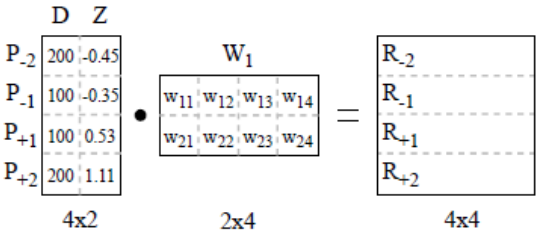


Abbildung 49: Detailbetrachtung der Multiplikation der Nachbarsdaten (Distanz und Zustandsnote) mit den zu trainierenden Gewichten der ersten Gewichtsmatrix W_1 des neuralen Netzes.

3. **Aufstellen der Semivariogramm-Matrix**
   Damit die in der ersten Zwischenschicht berechnete Matrix, welche immer noch nachbarspezifische Zeilen enthält (R-2 etc.), mit Werten der verschiedenen Nachbarspunkte kombiniert werden kann, wird sie zuerst transponiert. Durch diese Transposition besteht eine Zeile dieser Matrix nicht mehr nur aus Informationen bezüglich eines Nachbarpunktes, sondern aus Informationen aller betrachteten Nachbarn. Dies ist wichtig, dass wenn diese Zeilen in der Matrixmultiplikation mit den Spalten der zweiten Gewichtsmatrix W2 verrechnet werden, dadurch die Informationen der verschiedenen Nachbarn kombiniert werden. Ähnlich einer Semivariogramm-Matrix entsteht so eine Matrix, welche die verrechneten Werte der unterschiedlichen Nachbarn untereinander in Beziehung setzt.

4. **Ermitteln der Gewichte**
   Diese Semivariogrammähnliche Matrix wird mit einer dritten Gewichtsmatrix W3 verrechnet, um einen Gewichtsvektor zu erhalten

5. **Berechnen des Abschätzwerts**
   Der in dieser letzten Zwischenschicht resultierte Gewichtungsvektor wird nochmals mit den Zustandsnoten der Nachbarspunkte über eine einfache Zusammensetzung kombiniert. Dadurch kann das neurale Netz über die letzte Gewichtsmatrix W4 diese Informationen linear miteinander verrechnen. Durch die Transposition ist das eine normale Matrixmultiplikation, entspricht aber im Grunde einem Skalarprodukt. Das einzelne Ausgabeneuron enthält am Ende die Abschätzung für die fehlende Zustandsnote (noch in um den Mittelwert zentrierter Form).

Das künstliche neuronale Netz wurde in Python mit PyTorch implementiert und basiert auf einem mehrschichtigen vollvernetzten Feedforward-Modell. Das Training erfolgte über 50 Epochen mit einer Batch-Grösse von 64, was zu einer stabileren

Gradientenberechnung und schnelleren Konvergenz beiträgt. Als Optimierer wurde Adam (Adaptive Moment Estimation) verwendet, ein Verfahren, das die Vorteile von Momentum und adaptiver Lernratenanpassung kombiniert. Adam passt für jeden Parameter eine eigene Lernrate basierend auf den ersten beiden Momenten (Mittelwert und Varianz) der Gradienten an, was zu robusterem und effizienterem Training führt, insbesondere bei verrauschten oder spärlichen Daten. Die anfängliche Lernrate betrug 0.001 und wurde mit einem StepLR-Learning-Rate-Scheduler alle 10 Epochen um den Faktor 0.5 reduziert. Dadurch konnte das Modell zu Beginn schneller lernen und in späteren Phasen feiner konvergieren. Als Verlustfunktion wurde der Mean Squared Error (MSE) verwendet, da das Ziel eine präzise numerische Abschätzung (Regression) ist.

Datenaufbereitung

Für die Verwendung des ANN-Kriging-Modells an den Zustandsdaten werden diese in die entsprechende Form gebracht. Die Daten der Bewertungsflächen sind so aufgebaut, wie in Kapitel 3 beschrieben. Der Datensatz wird zuerst nach Achsen sortiert und aufgetrennt. Anschliessend werden bei jeder Achse die Fahrspuren abgetrennt, so dass eindimensionale Fahrspurreihen entstehen. Diese Fahrspurreihen werden mittels Übereinstimmung der RBBS-Endkoordinaten der einen Bewertungsfläche mit den RBBS-Anfangskoordinaten der nächsten Bewertungsfläche gebildet. Dadurch ergeben sich Gruppen von Bewertungsflächen, welche aneinanderhängen. Ist dies sichergestellt kann ein gleitendes Fensterverfahren verwendet, um die Daten für das Modell vorzubereiten und gleichzeitig möglichst viele verschiedene solche Datenfenster aus dem Datensatz zu gewinnen. In Abbildung 50 ist Konstruktion solcher Datenfenster am Beispiel von 4 berücksichtigten Nachbarsbewertungsflächen (Datenfenstergrösse 5) und den Zustandsnoten für den Indikator I2 bildlich dargestellt. Bei solchen Datenfenstern wird die zentrale Bewertungsfläche als Fehlender Datenpunkt behandelt und wird für die Kontrolle der Abschätzung verwendet, während die Nachbarsbewertungsflächen als Eingabe für die Abschätzung verwendet werden. Auf diese Weise wird jeder Punkt im Datensatz, mit Ausnahme der Randpunkte, einmal als Zielpunkt und mehrmals als Nachbarpunkt verwendet.

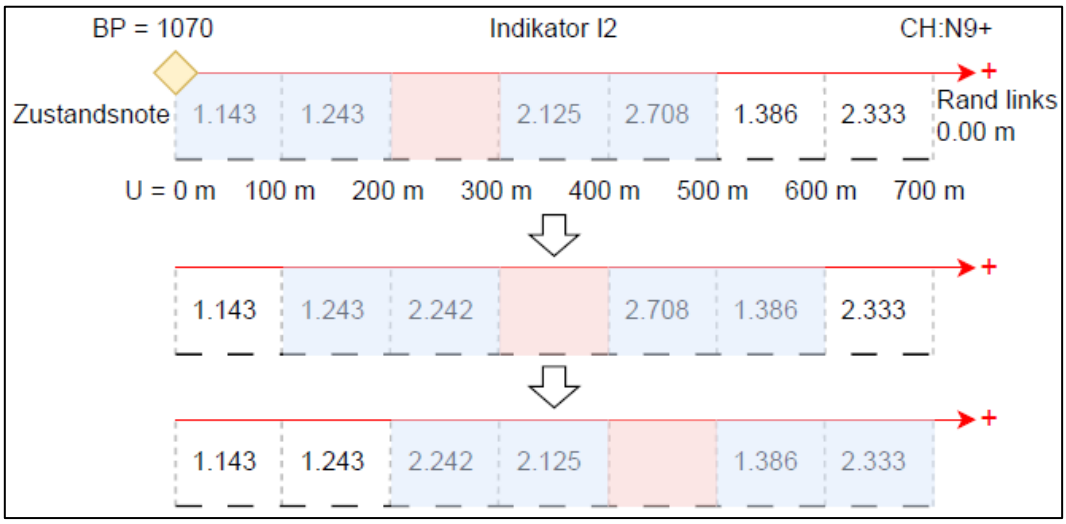


Abbildung 50: Konstruktion der Datenfenster für das Modell.

In einem nächsten Schritt werden die Längsrichtungsinformationen der Nachbarsbewertungsflächen in einem Datenfenster in Distanzen zur Zielbewertungsfläche umgewandelt (veranschaulicht in Abbildung 49). Diese Distanzen werden von Mittelpunkt zu Mittelpunkt berechnet mittels der bekannten Längen der Bewertungsflächen. Alle die generierten Datenfenster, abhängig von der gewählten Grösse, respektive Anzahl Nachbarn, bilden zusammen den im Modell einsetzbaren Datensatz. Mit diesem Datensatz kann ein Trainingsdatensatz sowie ein Testdatensatz erstellt werden. Dies erlaubt es, das Modell auf dem einen zu trainieren und sich ständig zu verbessern, um danach das fertige Modell am Testdatensatz zu validieren. Die präparierten Datenfenster wurden zufällig gemischt und in einen Trainingsdatensatz (80%) und einen Testdatensatz (20%) aufgeteilt. Dies funktioniert, weil das Modell die eingegebenen Datenfenster nie miteinander verknüpfen will. Das Modell kann so an allen vier Indikatoren angewendet werden. Um für das maschinelle Lernen genügend Daten zu haben, wurden die Zustandsnoten aller Strassenbewertungsflächen in der ganzen Schweiz verwendet, welche im Jahr 2024 erhoben wurden.

Datenübersicht

In den folgenden Tabellen wird eine Übersicht über die verwendeten Datensätze anhand von deskriptiven statistischen Kennzahlen präsentiert. Tabelle 30 zeigt die Deskriptive Statistik zum Datensatz des Indikators I0 für das Jahr 2024. In der Tabelle 31 sind die deskriptiven statistischen Kennzahlen für I2 im Jahr 2024.Für den Indikator I3 zeigt Tabelle 32 die statistischen Eckwerte des Datensatzes des Jahres 2024. Tabelle 33 zeigt die Deskriptive Statistik zum Datensatz von I4 für das Jahr 2024. Der oberste Eintrag mit allen enthaltenen Zustandsdaten zeigt die wahre Grösse des Datensatzes. Die folgenden Zeilen zeigen mit dem verwertbaren Datensatz, wieviele Datenfenster zur Abschätzung konstruiert werden konnten. Diese Datensätze werden mit zunehmender Anzahl berücksichtigter Nachbarn kleiner, weil an den Rändern der aneinanderhängenden Gruppen von Bewertungsflächen mehr wegfallen. Ebenfalls sind aufgrund der verwendeten Beispiele auch die Statistiken des Trainings- und Testdatensatzes bei 4 berücksichtigten Nachbarn enthalten.

Die durchschnittliche Zustandsnote ist bei allen vier Indikatoren recht tief, was einem guten Zustand entspricht. Eine interessante Beobachtung ist, dass bei allen vier Indikatoren der Mittelwert, sowie die Standardabweichung bei zunehmender Anzahl berücksichtigter Nachbarn abnimmt. Dies bedeutet, dass die ausgeschlossenen Daten, weil sie am Rand eines zusammenhängenden Fahrstreifens liegen und somit nicht auf beiden Seiten genügend Nachbarn haben, tendenziell weniger gut waren und mehr zur Streuung beigetragen haben. Dies könnte ein wichtiger Hinweis für die Interpretation der Resultate werden, wenn verschiedene Grössen der berücksichtigten Nachbarschaft verglichen werden. Speziell ist auch zu sehen, dass der Median für I3 in manchen Fällen gleich 0 ist. Dies bedeutet, dass dort die Hälfte des Datensatzes die gute Zustandsnote 0 hat.

Deskriptive Statistik zu I0 in 2024

	Anzahl	Mittelwert	Std. Abw.	Min	Median	Max
Alle enthaltenen Zustandsdaten	15177	0.427	0.460	0	0.3	3.1

Verwertbar bei 2 Nachbarn	13419	0.418	0.455	0	0.3	3.1
Verwertbar bei 4 Nachbarn	12174	0.407	0.447	0	0.2	3.1
Davon im Training 80 % (4 N.)	*9740*	*0.407*	*0.448*	*0*	*0.2*	*3.1*
Davon im Test 20 % (4 N.)	*2434*	*0.405*	*0.442*	*0*	*0.2*	*2.5*
Verwertbar bei 6 Nachbarn	11310	0.397	0.439	0	0.2	3.1
Verwertbar bei 8 Nachbarn	10704	0.390	0.431	0	0.2	3.1
Verwertbar bei 10 Nachbarn	10232	0.385	0.426	0	0.2	3.1

Tabelle 30: Deskriptive Statistik zum Datensatz von I0 für das Jahr 2024, mit den sich leicht ändernden verwertbaren Daten abhängig der Anzahl berücksichtigter Nachbarn.

Deskriptive Statistik zu I2 in 2024

	Anzahl	Mittel-wert	Std. Abw.	Min	Median	Max
Alle enthaltenen Zustandsdaten	17670	1.700	0.908	0	1.557	5
Verwertbar bei 2 Nachbarn	15887	1.634	0.877	0	1.5	5
Verwertbar bei 4 Nachbarn	14515	1.594	0.857	0	1.457	5
Davon im Training 80 % (4 N.)	*11612*	*1.595*	*0.860*	*0*	*1.457*	*5*
Davon im Test 20 % (4 N.)	*2903*	*1.588*	*0.845*	*0.04*	*1.471*	*5*
Verwertbar bei 6 Nachbarn	13436	1.561	0.839	0	1.429	5
Verwertbar bei 8 Nachbarn	12568	1.538	0.827	0	1.414	5
Verwertbar bei 10 Nachbarn	11807	1.516	0.815	0	1.386	5

Tabelle 31: Deskriptive Statistik zum Datensatz von I2 für das Jahr 2024, mit den sich leicht ändernden verwertbaren Daten abhängig der Anzahl berücksichtigter Nachbarn.

Deskriptive Statistik zu I3 in 2024

	Anzahl	Mittel-wert	Std. Abw.	Min	Median	Max
Alle enthaltenen Zustandsdaten	15727	0.529	0.887	0	0.065	5
Verwertbar bei 2 Nachbarn	13957	0.504	0.868	0	0.03	5
Verwertbar bei 4 Nachbarn	12656	0.473	0.839	0	0.005	5
Davon im Training 80 % (4 N.)	*10125*	*0.474*	*0.843*	*0*	*0.01*	*5*
Davon im Test 20 % (4 N.)	*2531*	*0.465*	*0.824*	*0*	*0*	*5*
Verwertbar bei 6 Nachbarn	11721	0.447	0.813	0	0	5
Verwertbar bei 8 Nachbarn	11055	0.422	0.786	0	0	5
Verwertbar bei 10 Nachbarn	10521	0.399	0.757	0	0	5

Tabelle 32: Deskriptive Statistik zum Datensatz von I3 für das Jahr 2024, mit den sich leicht ändernden verwertbaren Daten abhängig der Anzahl berücksichtigter Nachbarn.

Deskriptive Statistik zu I4 in 2024

	Anzahl	Mittel-wert	Std. Abw.	Min	Median	Max
Alle enthaltenen Zustandsdaten	14316	0.538	0.881	0	0.109	5
Verwertbar bei 2 Nachbarn	12657	0.540	0.884	0	0.1	5
Verwertbar bei 4 Nachbarn	11566	0.530	0.873	0	0.082	5
Davon im Training 80 % (4 N.)	9253	0.527	0.873	0	0.073	5

Davon im Test 20 % (4 N.)	2313	0.544	0.877	0	0.118	5
Verwertbar bei 6 Nachbarn	10864	0.518	0.864	0	0.064	5
Verwertbar bei 8 Nachbarn	10352	0.510	0.859	0	0.036	5
Verwertbar bei 10 Nachbarn	9941	0.503	0.857	0	0.018	5

Tabelle 33: Deskriptive Statistik zum Datensatz von I4 für das Jahr 2024, mit den sich leicht ändernden verwertbaren Daten abhängig der Anzahl berücksichtigter Nachbarn.

Metrik

Zur Bemessung der Zustandsabschätzung gibt es verschiedene Metriken, welche in Frage kommen könnten. Da hier nur ein einzelner Wert abgeschätzt wird, kann zu klassische Metriken gegriffen werden, welche über den ganzen Datensatz den Tatsächlichen mit dem abgeschätzten Wert vergleichen. Am gängigsten sind der 'Mean Absolute Error' (MAE), der 'Mean Squared Error' (MSE) oder der 'Root Mean Squared Error' (RMSE). Im Vergleich untereinander ist zu bemerken, dass MAE und RMSE denselben Wertebereich wie die Originaldaten besitzen, was eine direkte Interpretation der Fehlergrösse in derselben Einheit (z. B. Zustandsnote) erlaubt. Der MSE hingegen hat aufgrund der Quadrierung der Abweichungen eine andere Grössenordnung. Sowohl MSE als auch RMSE bestrafen grössere Fehler überproportional stärker als der MAE. Dies kann bei Anwendungen mit Ausreissern oder stark variierenden Werten relevant sein. Die Verwendung des RMSE verbindet die Vorteile beider Konzepte: Er bleibt interpretierbar in der ursprünglichen Einheit, gewichtet aber gleichzeitig grössere Fehler stärker. Daher wird im Folgenden der RMSE als Hauptmetrik für die Modellbewertung verwendet. Die Berechnung des RMSE ist in Formel (14) beschrieben, wobei n die Anzahl der Abschätzungen, $\hat{z}_i$ die abgeschätzte und z_i die tatsächliche Zielgrösse ist.

$$RMSE = \sqrt[2]{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{z}_i - z_i)^2} \tag{14}$$

Zur Einordnung der Resultate könnte zuerst ein kleiner Überblick über die Daten helfen, weshalb in Tabelle 31 die Anzahl Messbewertungsflächen, die durchschnittliche Zustandsnote sowie die Standardabweichung der Zustandsnote für die Datensätze aller vier Indikatoren gezeigt werden.

Will man diese Resultate des ANN-Kriging-Modells aber über den RMSE hinaus interpretieren, hilft oft ein Vergleich. Interessant für einen solchen Vergleich ist immer die Frage, was denn die Alternative wäre. Für fehlende Datenpunkte wäre die voraussichtlich einfachste Lösung, den fehlenden Wert über die beiden Nachbarn linear zu interpolieren (Formel (15).

$$y = y_1 + (x - x_1) * \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \tag{15}$$

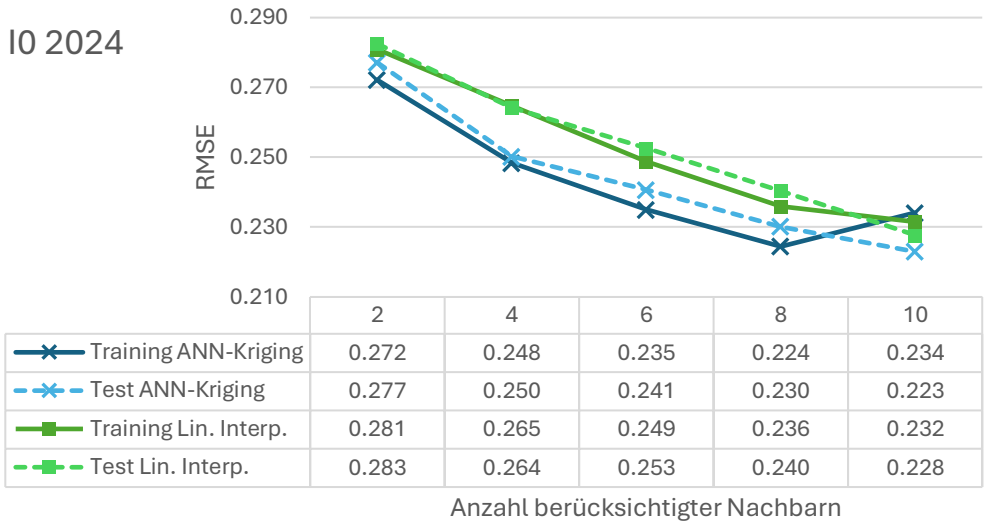
5.2.1.3 Resultate

In den folgenden Abbildungen sind die Resultate der Abschätzung der Zustandsnote mittels ANN-Kriging für die vier Indikatoren mit dem RMSE zusammengefasst. Die Resultate sind ebenfalls aufgeschlüsselt, nach Trainingsdatensatz (durchgehende Linie)

sowie Testdatensatz (gestrichelte Linie) und in X-Achsenrichtung nach der Anzahl berücksichtigter Nachbarn. Es gilt nochmals zu erwähnen, dass dadurch auch die Datensätze auch leicht unterschiedlich sind, und dass vor allem unterschiedliche Daten im Testdatensatz sein könnten. Ebenfalls in den Abbildungen sind die Anwendungen der linearen Interpolation an denselben Datensätzen. Obwohl die lineare Interpolation keine Trainings braucht, ist sie für die Vergleichbarkeit jeweils am selben Trainings- oder Testdatensatz durchgeführt worden.

I0 – Oberflächenschäden

Für den Indikator I0 (Abbildung 51) sind die Abschätzungsfehler am geringsten mit einem RMSE von 0.28 bis 0.22, was ungefähr einer Viertel-Zustandsnote entspricht. Ebenfalls ist erkenntlich, dass die Anwendung am Testdatensatz bis auf 10 Nachbarn stets etwas schlechter abschneidet während grundsätzlich der RMSE kleiner wird. Am Indikator I0 ist die Differenz zwischen ANN-Kriging und Interpolation gut ersichtlich, auch wenn sie nicht gross ist.



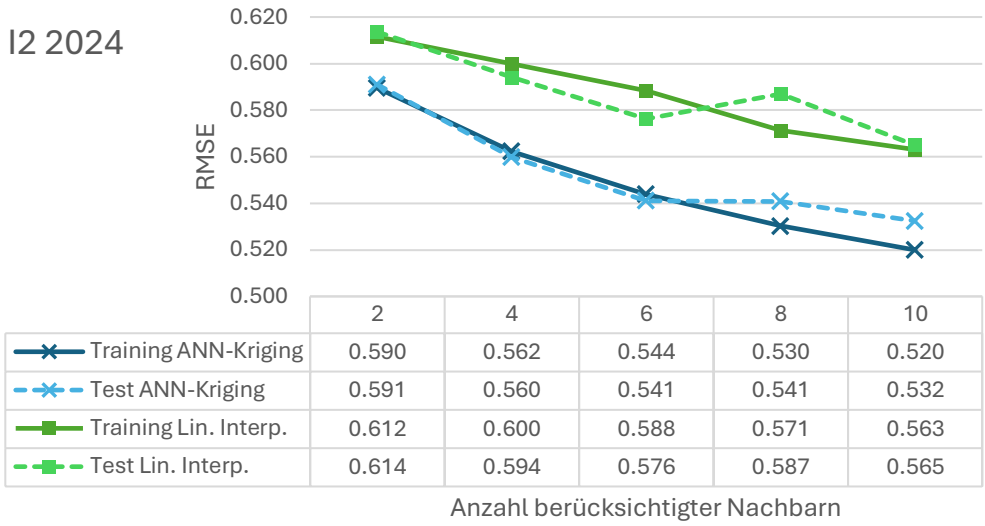
	2	4	6	8	10
Training ANN-Kriging	0.272	0.248	0.235	0.224	0.234
Test ANN-Kriging	0.277	0.250	0.241	0.230	0.223
Training Lin. Interp.	0.281	0.265	0.249	0.236	0.232
Test Lin. Interp.	0.283	0.264	0.253	0.240	0.228

Abbildung 51: Resultate des ANN-Krigings für den Indikator I0 mit dem Vergleich zur linearen Interpolation am Datensatz von 2024.

I2 – Ebenheit in Längsrichtung

Die in Abbildung 52 präsentierten Resultate der Abschätzung für den Indikator I2 zeigen die Verbesserung mit zunehmender Anzahl berücksichtigter Nachbarn gut. Die Abschätzungsfehler des Indikators I2 sind die höchsten im Vergleich zu den anderen Indikatoren. Mit einem RMSE der sich für den Testdatensatz zwischen 0.59 und 0.53 bewegt, was leicht höher ist als beim Trainingsdatensatz.

Bei I2 ist auch der Unterschied zwischen dem ANN-Kriging und der linearen Interpolation am grössten und das ANN-Kriging schneidet konstant besser ab. Die leichte Verschlechterung bei 8 berücksichtigten Nachbarn liegt wohl an der Eignung des zufälligen Testdatensatzes, da die lineare Interpolation dieselben Probleme bekundet.

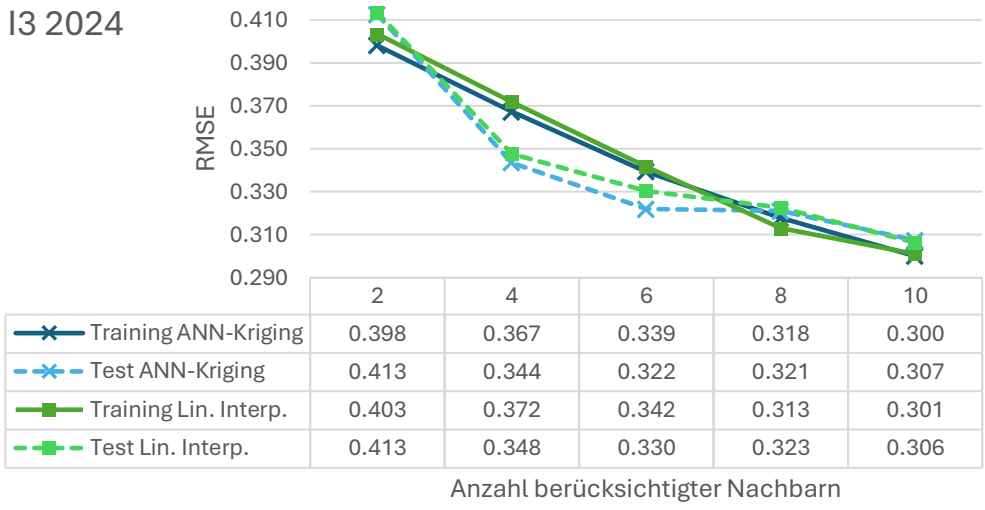


	2	4	6	8	10
Training ANN-Kriging	0.590	0.562	0.544	0.530	0.520
Test ANN-Kriging	0.591	0.560	0.541	0.541	0.532
Training Lin. Interp.	0.612	0.600	0.588	0.571	0.563
Test Lin. Interp.	0.614	0.594	0.576	0.587	0.565

Abbildung 52: Resultate des ANN-Krigings für den Indikator I2 mit dem Vergleich zur linearen Interpolation am Datensatz von 2024.

I3 – Ebenheit in Querrichtung

Die in Abbildung 53 gezeigten RSME-Werte für das ANN-Kriging und die lineare Interpolation sind für den Trainings- sowie für den Testdatensatz stets sehr nahe beieinander. Dies bedeutet, dass die Abschätzungen ähnlich gut sind, während sehr leichte Vorteile beim ANN-Kriging auszumachen sind.



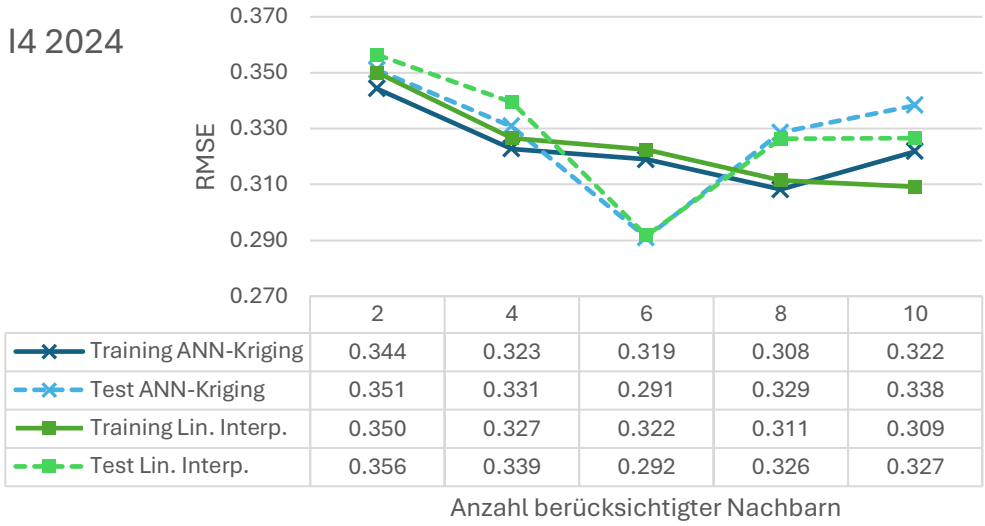
	2	4	6	8	10
Training ANN-Kriging	0.398	0.367	0.339	0.318	0.300
Test ANN-Kriging	0.413	0.344	0.322	0.321	0.307
Training Lin. Interp.	0.403	0.372	0.342	0.313	0.301
Test Lin. Interp.	0.413	0.348	0.330	0.323	0.306

Abbildung 53: Resultate des ANN-Krigings für den Indikator I3 mit dem Vergleich zur linearen Interpolation am Datensatz von 2024.

Der RMSE am Testdatensatz liegt in einem Bereich von 0.41 bis 0.31, was ungefähr einer Drittel-Zustandsnote entspricht. Die Auswertung am Testdatensatz schneidet in gewissen Fällen sogar besser ab als am Trainingsdatensatz. Mit Blick auf Tabelle 32 ist einem jedoch bewusst, dass die Hälfte der Zustandsnoten gleich 0 sind. Dies hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Abschätzbarkeit der Daten und mahnt zur Vorsicht bei der Interpretation.

I4 – Griffigkeit

Abbildung 54 zeigt die Resultate des ANN-Krigings im Vergleich mit der linearen Interpolation am Datensatz von 2009 des Indikators I4. Wie bereits bei den vorherigen Indikatoren werden die RMSE-Werte bei zunehmender Anzahl berücksichtigter Nachbarsbewertungsflächen im generellen Trend besser, auch wenn es am Testdatensatz mit 6 Nachbarn einen einzelnen, klar besseren Wert hat, was voraussichtlich mit dem zufällig ausgewählten Testdatensatz zu tun hat.



	2	4	6	8	10
Training ANN-Kriging	0.344	0.323	0.319	0.308	0.322
Test ANN-Kriging	0.351	0.331	0.291	0.329	0.338
Training Lin. Interp.	0.350	0.327	0.322	0.311	0.309
Test Lin. Interp.	0.356	0.339	0.292	0.326	0.327

Abbildung 54: Resultate des ANN-Krigings für den Indikator I4 mit dem Vergleich zur linearen Interpolation am Datensatz von 2024.

Für den Indikator I4 ist der RMSE am Testdatensatz zwischen 0.35 und 0.29, was ungefähr einer Drittel-Zustandsnote entspricht.

Beispiel an Strassenbewertungsflächen

Für die Anwendung dieser Methodik sind diese reinen RMSE-Werte der Auswertung etwas abstrakt und geben nur das durchschnittliche Abschneiden wieder. Interessant für die Interpretation wird es, wenn man die Resultate auf einer tatsächlichen Strassenbewertungsfläche anschaut.

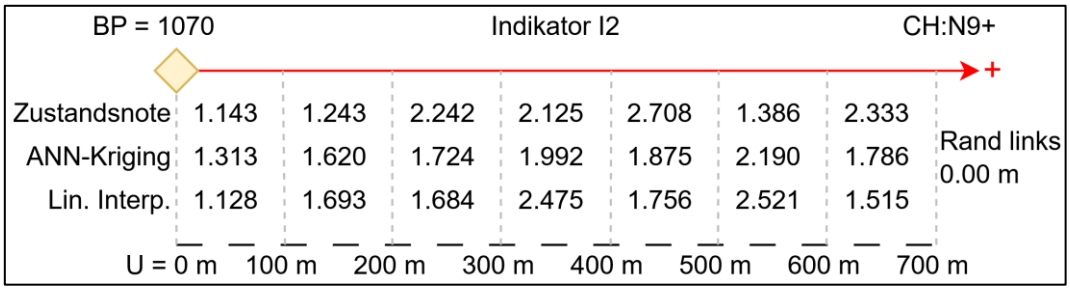


Abbildung 55: Beispiel der Abschätzung der Zustandsnote für den Indikator I2 am Datensatz des Jahres 2024 an einer Strassenbewertungsfläche.

In Abbildung 55 sind Strassenbewertungsflächen der Achse ‘CH:N9+’ ab Bezugspunkt 1070 und einem Randabstand links von 0.00 m dargestellt. In der obersten Zeile ist für

jede Bewertungsfläche die Zustandsnote aus dem Datensatz des Jahres 2024. In den unteren beiden Zeilen sind für jede Bewertungsfläche die Abschätzung mit dem ANN-Kriging-Modell mit 4 berücksichtigten Nachbarsbewertungsflächen und mit der linearen Interpolation. Bei der Bewertungsfläche von 300 m bis 400 m kann man gut erkennen, dass das ANN-Kriging mehr Nachbarn berücksichtigt als nur die beiden nächsten, welche beide höher sind. Der Abschätzwert der linearen Interpolation ist dementsprechend einiges höher.

5.2.2 Abschätzung des zukünftigen Zustands

Für eine integrierte Nutzung von Algorithmen für die Planung von Unterhaltsmassnahmen sind vorhersagen bezüglich des zukünftigen Zustands essenziell. Wie in Kapitel 6.3 ausgeführt können im bestehenden Managementsystem für das Trassee MISTRA TRA Verlaufskurven der Zustandsentwicklung angewendet werden.
In diesem Kapitel wird eine Methodik vorgestellt, welche es nicht nur erlaubt, den Zustand anhand des Alters des Deckbelags abzuschätzen, sondern auch die Informationen von durchgeführten Zustandserhebungen zu berücksichtigen und eine angepasste Vorhersage zu machen. Die angesprochene Methodik zur Abschätzung des zukünftigen Zustands ist der Extended-Kalman-Filter (EKF). Die Anwendung des EKF für diesen Zweck wurde schon ausführlich erforscht (Blumenfeld et al. (2022), Blumenfeld et al. (2021)).

Der Extended Kalman Filter (EKF) gehört zur Klasse der Bayes'schen Filterverfahren. Diese Verfahren dienen dazu, den unbekannten Zustand eines dynamischen Systems trotz Rauschen und Unsicherheiten möglichst präzise abzuschätzen. Grundlage bildet das Bayes'sche Theorem: Aus einer a priori Vorhersage des Zustands, die sich aus dem Prozessmodell und dem Prozessrauschen ergibt, wird durch Einbezug neuer Messungen und deren Unsicherheit eine a posteriori Abschätzung bestimmt.

Dieser rekursive Ablauf besteht aus zwei Schritten:
1. **Prädiktion**: Der Zustand wird mithilfe der Prozessfunktion a priori abgeschätzt.
2. **Update**: Die a priori Abschätzung wird anhand der Messung zu einer a posteriori Abschätzung korrigiert.

Die Prozessfunktion repräsentiert als mathematisches Modell die Systemdynamik und die einhergehende Unsicherheit bezüglich dieses Modells wird als Prozessrauschen bezeichnet. Der EKF kombiniert somit das Wissen über die modellierte Zustandsentwicklung mit den tatsächlich beobachteten Daten. Im Gegensatz zum klassischen Kalman Filter erlaubt der EKF auch die Behandlung nichtlinearer Zusammenhänge, indem die Modellgleichungen lokal linearisiert werden. Auf diese Weise liefert der EKF nicht nur eine Zustandsabschätzung, sondern auch eine Quantifizierung der damit verbundenen Unsicherheit. Typischerweise wird diese probabilistische Abschätzung als gaussische Normalverteilung mit einem Erwartungswert und einer Kovarianzmatrix dargestellt.
Für die spätere Verwendung der Abschätzungen in Prognosealgorithmen ist diese probabilistische Abschätzung wertvoll. Sie erlaubt es, eine abgeschätzte Wahrscheinlichkeit zu ermitteln, mit welcher sich das betrachtete Trassee-Teilstücke in einem gewissen Zustandsbereich befindet. Diese Wahrscheinlichkeiten sind die Grundlage für die

Risikoabschätzung, welche für die Priorisierung von Massnahmen betrachtet wird (mehr dazu in Kapitel 6.3.

Im Folgenden wird die Methodik des EKF zur Abschätzung des zukünftigen Zustands von Trassee-Bewertungsflächen noch detaillierter beschrieben. Anschliessend werden die Resultate der Anwendung der Methodik an der Teststrecke vorgestellt und diskutiert.

5.2.2.2 Methodik

EKF Allgemein

Der Extended Kalman Filter (EKF) ist ein rekursives Bayes'sches Abschätzverfahren für dynamische Systeme mit nichtlinearen Modellgleichungen. Ziel ist es, zu jedem diskreten Zeitschritt k den (latenten) Zustandsvektor x_k auf Basis eines nichtlinearen Systemmodells und verrauschter Messungen abzuschätzen.

Das Zustands- und Messmodell werden folgendermassen angegeben:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1} \tag{16}$$

Wobei $f(\cdot)$ die Prozessfunktion ist, $w_{k-1} \sim \mathcal{N}(0, Q_{k-1})$ das Prozessrauschen mit der Kovarianzmatrix Q_{k-1} und u_{k-1} ist ein optionaler Steuer- oder Eingangssignal-Vektor.

$$z_k = h(x_k) + v_k \tag{17}$$

Wobei $h(\cdot)$ die Messfunktion ist und $v_k \sim \mathcal{N}(0, R_k)$ das Messrauschen mit der Kovarianzmatrix R_k.

Für die EKF-Schritte wird die Notation verwendet, dass $\hat{x}_{n|m}$ die Abschätzung von x zum Zeitpunkt n angibt und die Beobachtungen bis und mit dem Zeitpunkt $m \leq n$ gegeben sind.

A-priori-Schritt (Prädiktion)

A-priori Abschätzung des Zustands:

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}) \tag{18}$$

A-priori Kovarianz der Abschätzung:

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_{k-1} \tag{19}$$

Mit der Jacobi-Matrix der linearisierten Prozessfunktion:

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial x}|_{\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}} \tag{20}$$

A-posteriori-Schritt (Update)

Kalman-Gain:

$$K_k = \frac{P_{k|k-1} H_k^T}{H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k} \tag{21}$$

A-posteriori Abschätzung nach Einbezug der Messung z_k:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \cdot \left(z_k - h\left(\hat{x}_{k|k-1}\right)\right) \quad (22)$$

A-posteriori Kovarianz der Abschätzung:

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (23)$$

Mit der Jacobi-Matrix der Messfunktion:

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x}|_{\hat{x}_{k|k-1}} \quad (24)$$

Der EKF liefert somit zu jedem Zeitschritt eine probabilistische Abschätzung in Form einer gaussischen Normalverteilung mit Erwartungswert $\hat{x}_{k|k}$ und Kovarianzmatrix $P_{k|k}$:

$x_k \sim \mathcal{N}(\hat{x}_{k|k}, P_{k|k})$

EKF Konkret

Um den EKF wunschgemäss an den Daten der Testrecke anwenden zu können, werden die Daten vorgängig aufbereitet. Der Aufbau der Zustandsdaten des Trassees wurde vorgängig in Kapitel 5.2.1 und Abbildung 14 erklärt. Da der Trasseezustand anhand von vier verschiedenen Indikatoren angegeben wird, werden die Abschätzungen auch für jeden Indikator einzeln und nacheinander gemacht. Für die Abschätzung des zukünftigen Zustands mittels EKF interessieren primär die Zustandsnoten aus unterschiedlichen Erhebungen für dieselbe Bewertungsfläche. Diese Bewertungsflächen können aber über die verschiedenen Erhebungsjahre leicht variieren, sodass sie nicht immer deckungsgleich sind. Deshalb wurden die Bewertungsflächen anhand der jüngsten Erhebung als Referenz definiert. Um die Zustände vergangener Erhebungen mit dieser Referenz zu verknüpfen, wurde die Zustandsnote jeder Bewertungsfläche einer älteren Erhebung der Referenz-Bewertungsfläche mit der besten flächenmässigen Überlappung zugeordnet. Auf dieselbe Weise wurde jeder Referenz-Bewertungsfläche das Einbaujahr des Deckbelags mit der besten flächenmässigen Überlappung zugewiesen. Das Einbaujahr des Deckbelags wird anschliessend zur Berechnung des Alters des Deckbelags während einer Zustandserhebung verwendet. Zustandserhebungen, welche vor dem Einbaujahr des Deckbelags durchgeführt wurden, wurden ignoriert. Dies erlaubt eine Darstellung der Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags. Macht man das für alle Bewertungsflächen zusammen, bekommt man eine empirische Darstellung, welche man durch eine mathematische Funktion angleichen kann. Diese angeglichene Funktion repräsentiert das Systemverhalten und wird im Zusammenhang des EKF Prozessfunktion genannt. Wie üblich für die Abschätzung von Belagszuständen wird eine Potenzfunktion als Prozessfunktion verwendet, wie sie in Formel (25) gezeigt wird (Blumenfeld et al. 2022).

$$f(t) = a \cdot t^b + c \quad (25)$$

Bei der Angleichung an die Daten wird c zwischen 0 und 5 begrenzt, damit die Vorhersagen auch bei $t = 0$ innerhalb der Skala der Zustandsnoten sind. Der Parameter b ist nur gegen unten bis 0 begrenzt, um eine Zustandsverbesserung mit zunehmendem Alter auszuschliessen. Diese Prozessfunktion (25) beschreibt den Zustand nur in Abhängigkeit von t und nicht vom vorherigen Zustand x_{k-1}, wie es sonst bei einem EKF

üblich und in Formel (16) gezeigt ist. Das macht den in dieser Methodik angewendeten EKF zu einem Spezialfall. Die Prozessfunktion ist zwar nicht linear in t, aber trivial in x, so dass die Jacobi-Matrix in Formel (20) $\frac{\partial f}{\partial x} = 0$ ist. Für die Berechnung der a priori Kovarianz (19) wird daher nicht der Standardterm $F_k P_{k-1|k-1} F_k^T$ verwendet, sondern vereinfachend direkt Formel (26), sodass sich die Kovarianz bei jedem Zeitschritt lediglich um das Prozessrauschen Q_{k-1} erhöht. Dadurch wächst die Unsicherheit mit der Zeit, solange keine neue Messung vorliegt, was realistisch ist, weil sich Prognosen mit zunehmendem Zeithorizont verschlechtern. Würde man stattdessen mit $F_k = 0$ die Formel $P_{k|k-1} = Q_{k-1}$ verwenden, bliebe die Unsicherheit nach jedem Zeitschritt oder Update konstant Q_{k-1}. Dies ist nicht sehr realistisch und würde ein ungerechtfertigt grosses Vertrauen in die Prozessfunktion bedeuten.

$$P_{k|k-1} = P_{k-1|k-1} + Q_{k-1} \tag{26}$$

Die gewählte Messfunktion in Formel (27) ist einfach der erhobene Zustandswert zum Zeitpunkt t_k.

$$h(x_k) = x_k \tag{27}$$

Bei der Anwendung des EKF bei jeder Bewertungsfläche wird das Einbaujahr des Deckbelags zur Festlegung des Zeitpunkts $t = 0$ verwendet, wo entsprechend auch die Prozessfunktion initial an angesetzt wird. Mit dieser Prozessfunktion kann für jedes Jahr die Vorhersage a priori berechnet werden und in einem Jahr mit Zustandserhebung kann die Vorhersage mit dem EKF-Update a posteriori korrigiert werden. Um nicht nur die Abschätzung, sondern gleich auch die Prozessfunktion bei einem EKF-Update neu anzusetzen, wurde die ‘Curve-Shifting’-Methode angewendet. Dabei wird am Ende des Updates der Parameter c, wie in Formel (28) gezeigt, angepasst, damit die angepasste Prozessfunktionskurve von der a priori Abschätzung zur a posteriori Abschätzung hin vertikal verschoben wird.

$$c_{neu} = c + (\hat{x}_{k|k} - \hat{x}_{k|k-1}) \tag{28}$$

Dadurch wird die Prozessfunktion bei der jüngsten Zustandserhebung ein letztes Mal verschoben und anschliessend für die Abschätzung der zukünftigen Zustände verwendet. Um die geeignete Werte für die Konstante des Prozessrauschens Q_{k-1} und die des Messrauschens R_k zu finden wurde eine Gittersuche durchgeführt. Dabei wurden für jede Kombination dieser beiden Konstanten alle Bewertungsflächen abgeschätzt und anhand der Messungen ausgewertet. Anhand der nachfolgend erklärten Metrik CRPS wurde anschliessend für jeden Indikator das beste gefundene Konstantenpaar gewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die gefundenen Konstanten nicht am Rand des Suchgitters liegen. Dies würde auf einen besseren Wert ausserhalb des Gitters hindeuten.

Metrik zur Auswertung

Zur Bemessung der zukünftigen Zustandsabschätzung gibt es verschiedene Metriken, welche in Frage kommen könnten. Will man einfach nur den Erwartungswert aus der EKF-Vorhersage auswerten, kann zu klassische Metriken gegriffen werden, welche über den ganzen Datensatz den Tatsächlichen mit dem abgeschätzten Wert vergleichen. Am gängigsten sind der 'Mean Absolute Error' (MAE), der 'Mean Squared Error' (MSE) oder der 'Root Mean Squared Error' (RMSE). Im Vergleich untereinander ist zu bemerken, dass MAE und RMSE denselben Wertebereich wie die Originaldaten besitzen, was eine direkte Interpretation der Fehlergrösse in derselben Einheit (z. B. Zustandsnote) erlaubt. Der MSE hingegen hat aufgrund der Quadrierung der Abweichungen eine andere Grössenordnung. Sowohl MSE als auch RMSE bestrafen grössere Fehler überproportional stärker als der MAE. Dies kann bei Anwendungen mit Ausreissern oder stark variierenden Werten relevant sein. Die Verwendung des RMSE verbindet die Vorteile beider Konzepte: Er bleibt interpretierbar in der ursprünglichen Einheit, gewichtet aber gleichzeitig grössere Fehler stärker. Daher wird im Folgenden der RMSE als Hauptmetrik für die Modellbewertung verwendet. Die Berechnung des RMSE ist in Formel (29) beschrieben, wobei n die Anzahl der Abschätzungen, $\hat{z}_i$ die abgeschätzte und z_i die tatsächliche Zielgrösse ist.

$$RMSE = \sqrt[2]{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{z}_i - z_i)^2} \tag{29}$$

Der Extended Kalman Filter (EKF) gibt nicht nur eine Punktabschätzung der Zielgrösse zurück, sondern auch eine Unsicherheit, welche mit dieser Vorhersage verbunden ist. Diese Unsicherheit wird als gausssche Normalverteilung beschrieben. Für die Auswertung der Resultate des EKF ist es daher sinnvoll, eine Metrik zu verwenden, die nicht nur die Genauigkeit der Punktabschätzung berücksichtigt, sondern auch die Konsistenz der vorhergesagten Unsicherheit.

Der Continuous Ranked Probability Score (CRPS) ist eine etablierte Metrik zur Bewertung probabilistischer Vorhersagen. Er vergleicht die gesamte vorhergesagte Wahrscheinlichkeitsverteilung mit dem tatsächlich eingetretenen Wert und integriert die quadratische Abweichung über alle möglichen Schwellenwerte. Im Gegensatz zu klassischen Fehlergrössen wie MSE oder MAE, die ausschliesslich Punktvorhersagen beurteilen, berücksichtigt der CRPS sowohl die Lage als auch die Streuung der Abschätzung. Für Normalverteilungen existiert eine geschlossene Form des CRPS. Bezeichnen $\hat{z}$ die abgeschätzte Zielgrösse, z die tatsächlich eingetretene Zielgrösse sowie σ die Standardabweichung der Vorhersageunsicherheit, so gilt:

$$CRPS(\hat{z}, \sigma; z) = \sigma \cdot \left[u \cdot (2\Phi(u) - 1) + 2\phi(u) - \frac{1}{\sqrt{\pi}}\right] \quad , \quad mit\ u = \frac{z - \hat{z}}{\sigma} \tag{30}$$

Dabei bezeichnet $\Phi(u)$ die Verteilungsfunktion und $\phi(u)$ die Dichtefunktion der Standardnormalverteilung. Ein kleinerer CRPS-Wert bedeutet eine bessere Übereinstimmung von Vorhersage und Realität. Damit stellt der CRPS eine umfassendere Metrik dar als rein deterministische Fehlergrössen und eignet sich besonders zur Beurteilung

der Performance probabilistischer Filter wie des EKF in dieser Anwendung. Das Fehlermass hat dieselbe Einheit wie die Zielgrösse.

Eine weiter Metrik, welche angewendet wird, ist die 2-Sigma-Deckung. Die 2-Sigma-Deckung beschreibt den Anteil der tatsächlich erhobenen Werte, die innerhalb des vom EKF geschätzten Zwei-Standardabweichungen-Intervalls (ungefähr 95 % Konfidenzbereich einer Normalverteilung) liegen. Sie dient damit als einfache Metrik, um zu beurteilen, ob die vom EKF ausgegebene Unsicherheitsabschätzung realistisch ist. Liegt der beobachtete Anteil deutlich unter oder über rund 95 %, deutet dies auf eine Unter- bzw. Überschätzung der Modellunsicherheit hin.

5.2.2.3 Resultate

Um die Resultate für die verschiedenen Indikatoren einordnen zu können, werden jeweils die angeglichenen Prozessfunktionen an den Zustandsdaten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags abgebildet (Bsp. für I0 in Abbildung 56). Die zugrundeliegenden Zustandsdaten wurden in einem Boxplot dargestellt. Die Box zeigt die Interquartilsspanne (IQR) zwischen dem 1. Quartil (25 %) und dem 3. Quartil (75 %). Zusätzlich wurden Median und, eigens ergänzt, der Mittelwert eingezeichnet. Die orange gestrichelte Linie stellt die angeglichene a-priori-Prozessfunktion dar.

Für die Auswertung der Methodik an den Daten wurde für jede Bewertungsfläche bei jedem EKF-Update die entsprechende Metrik berechnet und entsprechend notiert, wie viele Updates und somit Prozessfunktionsanpassungen stattgefunden haben, und wie gross der Vorhersagehorizont war. Diese Aufzeichnung des Abschneidens erlaubt es die Vorhersagequalität von verschiedenen Situationen bezüglich Anzahl Prozessfunktionsanpassungen und Vorhersagehorizont zu beurteilen. Diese Resultate sind in Tabelle 34 für den Indikator I0, in Tabelle 35 für I2, in Tabelle 36 für I3 und für I4 in Tabelle 37 dargestellt.

I0 – Oberflächenschäden

Für den Indikator I0 (Abbildung 56) sind die Zustandsnoten grundsätzlich sehr niedrig und steigen auch mit dem Alter kaum über die Zustandsnote 2. Die gefundene a priori Prozessfunktion über alle Bewertungsflächen abhängig vom Alter des Deckbelags ist in Formel (31) angegeben. Diese Prozessfunktion beschreibt die Zustandsentwicklung basierend auf der Zustandsnote abhängig von dem Alter. Die erhaltene Funktion ist sehr flach und beschreibt nur eine geringe Verschlechterung in 40 Jahren.

$$f(t) = 0.115 \cdot t^{0.556} + 0.000 \tag{31}$$

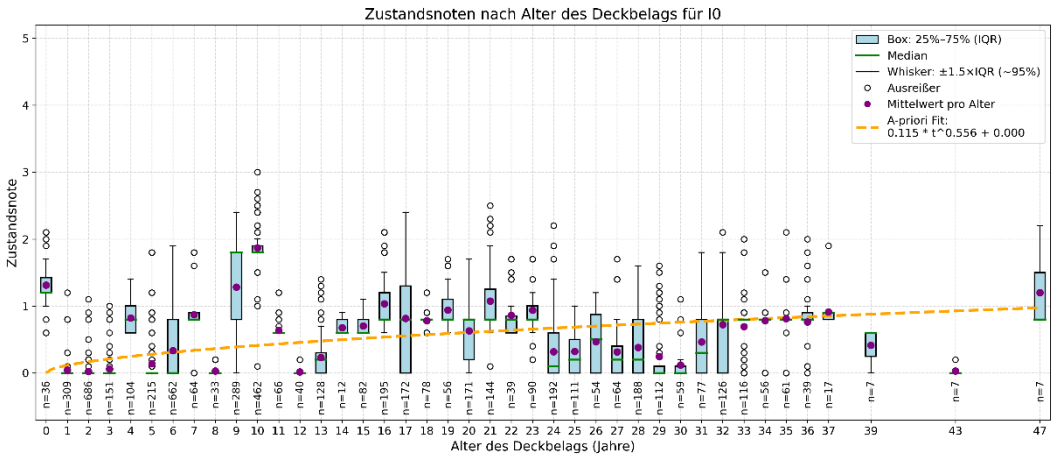


Abbildung 56: Übersicht der Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags mit der angeglichenen a priori Prozessfunktion für den Indikator I0.

Mit der Gittersuche wurden für den Indikator I0 die folgenden Werte gefunden: Für das Prozessrauschen $Q_{k-1} = 0.01$ und für das Messrauschen $R_k = 4$. Das bedeutet so viel wie, dass der dem erhobenen Wert nicht viel Vertrauen geschenkt wird und bei einem Update der Kalman-Gain eher klein bleibt und sich dadurch die a posteriori Abschätzung nur wenig von der a priori Abschätzung wegbewegt. Dies ist gut ersichtlich in den Abbildungen für zwei zufällige Beispielsbewertungsflächen in Abbildung 57 und Abbildung 58. In diesen beiden Abbildungen ist entsprechend auch gut ersichtlich, dass die erhobenen Werte kaum einen vorhersagbaren Trend abbilden, weshalb es für die Metrik günstiger ist, näher bei der Prozessfunktion zu bleiben.

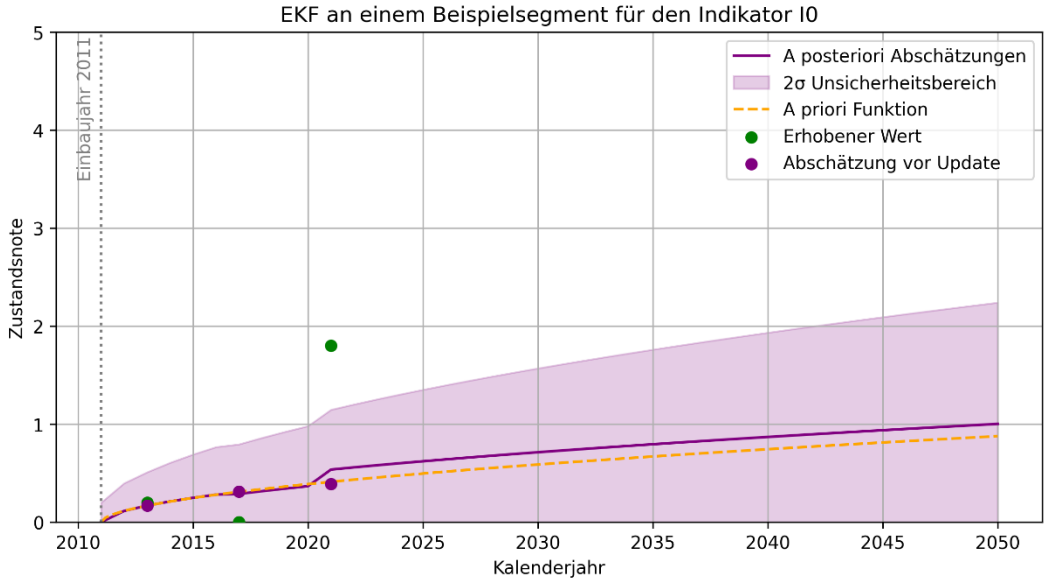


Abbildung 57: Veranschaulichung der Abschätzung für I0 an der Beispiel-Bewertungsfläche 1.

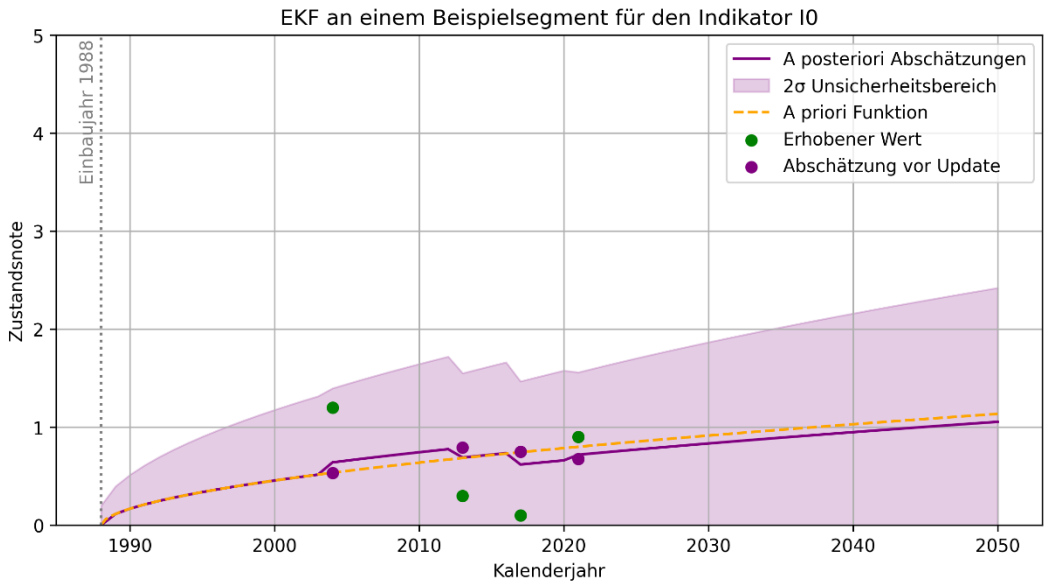


Abbildung 58: Veranschaulichung der Abschätzung für I0 an der Beispiel-Bewertungsfläche 2.

In Tabelle 34 sind die Vorhersagen nach verschiedenen Kriterien für den Indikator I0 zusammengefasst. In der ersten Zeile sind die Werte für alle möglichen Vergleiche einer Vorhersage mit dem erhobenen Wert. Über alle Daten aller Bewertungsflächen der Teststrecke sind das 12'953, wobei die durchschnittliche Anzahl Updates fast bei 1 liegt und dies über einen durchschnittlichen Vorhersagezeitraum von 10 Jahren. Betrachtet man den RMSE sind die Abschätzungen durchschnittlich 0.744 Zustandsnote daneben, wobei grössere Ausreisser stärker bestraft wurden. Betrachtet man den durchschnittlichen CRPS ist die Abschätzung unter Berücksichtigung der mitgegebenen Unsicherheit im Mittel noch 0.439 Zustandsnoten entfernt. Die 2-Sigma-Dechung zeigt, dass die tatsächlich erhobenen Werte zu 79 % innerhalb des Intervalls von zwei Standardabweichungen der Abschätzung liegen. Betrachtet man die Anzahl Updates, welche vor einer Vorhersage durchgeführt wurden, sieht man, dass 0 Updates in allen Metriken am besten abschneidet, obwohl der Vorhersagehorizont mit durchschnittlich 13.5 Jahren der längste ist im Vergleich mit einem oder zwei Updates. Nimmt man alle Vorhersagen für einen Spezifischen Vorhersagehorizont zusammen, sieht man, dass die 12-Jahres-Vorhersage mit 0.248 den besten CRPS-Wert hat, wobei angemerkt werden soll, dass die Anzahl berücksichtigter Vorhersagen einiges kleiner ist als bei der 4-Jahres-Vorhersage Gruppierung.

Auswertung Vorhersagen I0

Beschreibung Vorhersage	Anzahl	Updates (Durchschn.)	Vorhersagehorizont (Durchschn.)	RMSE	CRPS	Deckung 2Sigma
Alle Vorhersagen	12953	0.983	10.099	0.744	0.439	0.790
0 Updates	5577	0	13.574	0.661	0.371	0.822
1 Update	3775	1.	8.794	0.772	0.466	0.777
2 Updates	2238	2	6.613	0.948	0.628	0.671
4-Jahres-Vorhersagen	3227	2.059	4	0.830	0.519	0.715

8-Jahres-Vorhersagen	1684	1.801	8	1.038	0.718	0.568
12-Jahres-Vorhersa-gen	508	1.819	12	0.450	0.248	0.941
4-Jahres-Vorhersagen nach 1 Update	944	1	4	0.474	0.270	0.899
8-Jahres-Vorhersagen nach 1 Update	685	1	8	1.421	1.206	0.072
4-Jahres-Vorhersagen nach 2 Updates	1232	2	4	1.138	0.833	0.458
8-Jahres-Vorhersagen nach 2 Updates	550	2	8	0.773	0.490	0.922
4-Jahres-Vorhersagen nach 3 Updates	550	3	4	0.708	0.436	0.904
8-Jahres-Vorhersagen nach 3 Updates	416	3	8	0.484	0.257	0.882
4-Jahres-Vorhersagen nach 4 Updates	397	4	4	0.507	0.268	0.877

Tabelle 34: Abschneiden der Abschätzungen für den Indikator I0.

I2 – Ebenheit in Längsrichtung

Für den Indikator I2 (Abbildung 59) liegen die Daten der Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters auf einem konstanten Niveau. Dies schlägt sich auch in der angeglichenen Prozessfunktion in Formel (32) nieder. Mit dem gefundenen $c = 1.1$ liegt die Kurve schon von Anfang an etwas erhöht, bleibt aber relative flach.

$$f(t) = 0.057 \cdot t^{0.680} + 1.100 \tag{32}$$

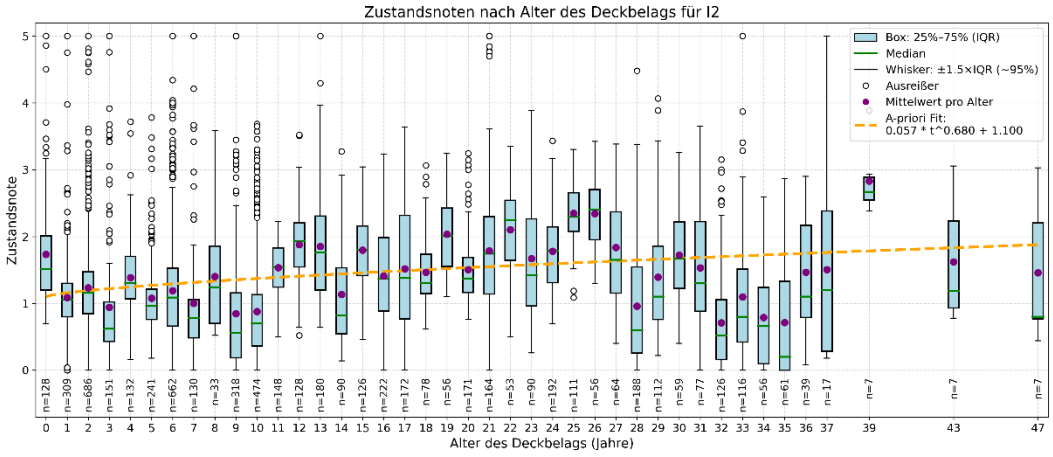


Abbildung 59: Übersicht der Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags mit der angeglichenen a priori Prozessfunktion für den Indikator I2.

Mit der Gittersuche wurden für den Indikator I2 die folgenden Werte gefunden: Für das Prozessrauschen $Q_{k-1} = 0.05$ und für das Messrauschen $R_k = 0.1$. Diese Werte deuten darauf hin, dass das sowohl das Prozessmodell der Zustandsentwicklung als auch die Erhebungswerte als relativ verlässlich eingeschätzt werden, da die Werte vergleichsweise klein sind. In den zwei zufällig gewählter Beispielbewertungsflächen

(Abbildung 60 und Abbildung 61) ist ersichtlich, dass die a posteriori Abschätzung sich relativ nahe zum erhobenen Zustandswert hin verschiebt. Interessant in den zwei Abbildungen ist ebenfalls, dass Verbesserungen der Zustandsnote stattfinden, und dies, obwohl Massnahmen durch das Alter des Deckbelags berücksichtigt sein sollten. Besonders ersichtlich ist dies beispielsweise ab einem Alter von 28 Jahren (Abbildung 59). Ohne eine fundierte Erklärung, wie es zu dieser Zustandsverbesserung kommt, kann man nur mutmassen, dass möglicherweise Massnahmen stattfanden, ohne das Einbaudatum des Deckbelags zu aktualisieren. Eine weitere mögliche Erklärung wäre eine mögliche Variabilität der erfassten Zustandswerte.

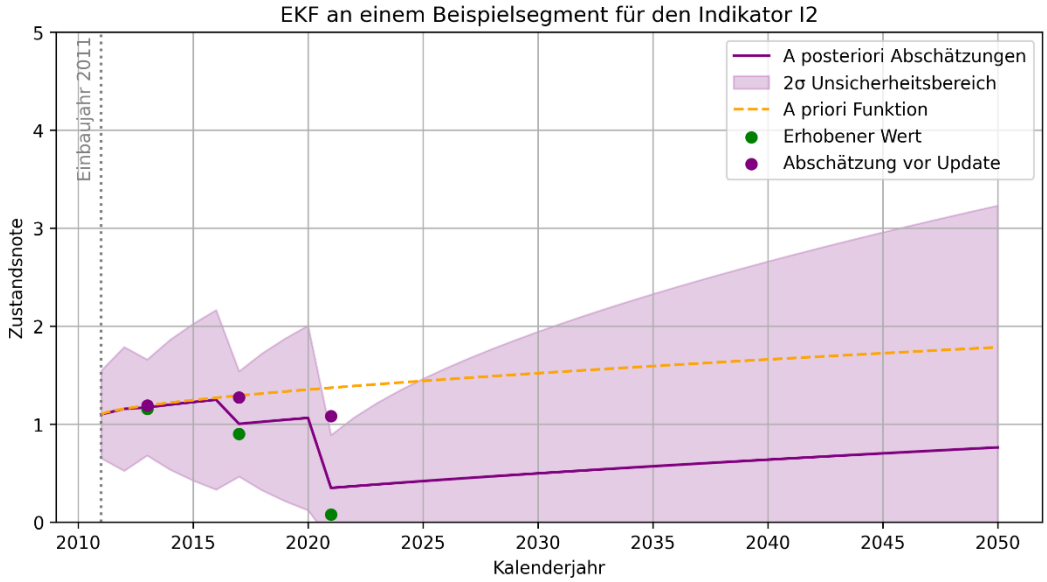


Abbildung 60: Veranschaulichung der Abschätzung für I2 an der Beispiel-Bewertungsfläche 1.

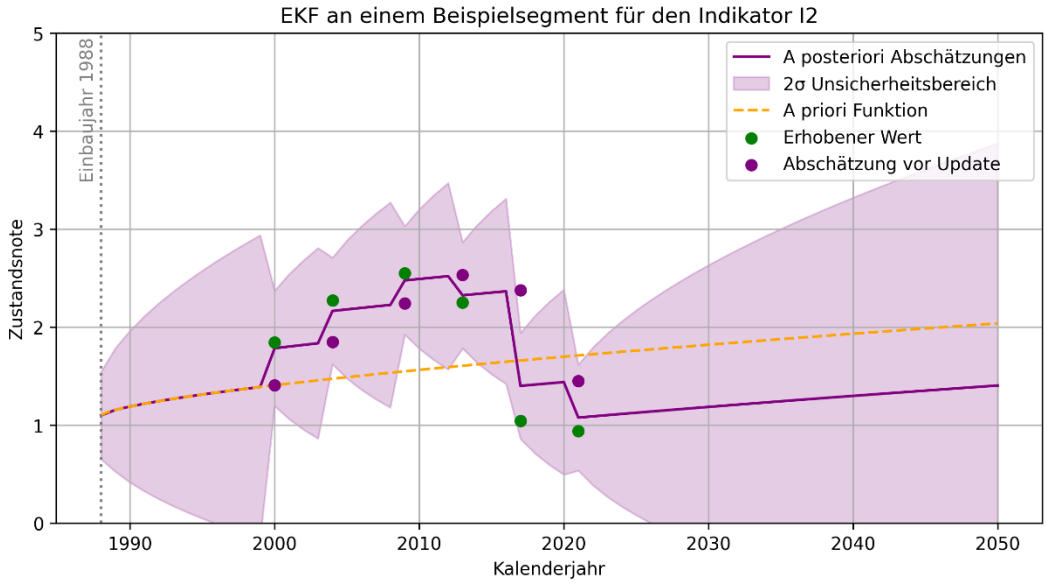


Abbildung 61: Veranschaulichung der Abschätzung für I2 an der Beispiel-Bewertungsfläche 2.

In Tabelle 35 sind die Vorhersagen nach verschiedenen Kriterien für den Indikator I2 zusammengefasst. Über alle möglichen Vergleiche zwischen den Vorhersagen und

den erhobenen Messwerten ergeben sich insgesamt 16'631 Datensätze. Im Mittel wurde dabei 1.28 Updates pro Vorhersage durchgeführt, bei einem durchschnittlichen Vorhersagehorizont von rund 10 Jahren. Der RMSE zeigt, dass die Abschätzungen im Schnitt um 0.892 Zustandsnoten vom tatsächlichen Wert abweichen, wobei grössere Abweichungen stärker gewichtet werden. Unter Einbezug der mitgeschätzten Unsicherheit beträgt der durchschnittliche CRPS lediglich 0.498 Zustandsnoten. Die 2-Sigma-Deckung verdeutlicht, dass rund 93 % der erhobenen Werte innerhalb des Intervalls von zwei Standardabweichungen der Vorhersage liegen. Betrachtet man die Anzahl an Updates, die vor einer Vorhersage durchgeführt wurden, zeigt sich, dass Vorhersagen nach 1 Update in allen Metriken die besten Ergebnisse liefern. Dies gilt, obwohl der mittlere Vorhersagehorizont 10 Jahre ist. Werden die Vorhersagen nach fixem Vorhersagehorizont gruppiert, erzielen die 4-Jahres-Vorhersagen mit einem CRPS von 0.403 den besten Wert, und dies mit der deutlich grössten Anzahl Daten im Vergleich zu den 8- und 12-Jahres-Vorhersagen.

Auswertung Vorhersagen I2

Beschreibung Vorhersage	Anzahl	Updates (Durchschn.)	Vorhersagehorizont (Durchschn.)	RMSE	CRPS	Deckung 2Sigma
Alle Vorhersagen	16631	1.280	10.419	0.892	0.498	0.931
0 Updates	6237	0	13.209	0.841	0.473	0.912
1 Update	4435	1	10.005	0.798	0.442	0.988
2 Updates	2898	2	9.083	0.900	0.498	0.968
4-Jahres-Vorhersagen	3911	2.314	4	0.730	0.403	0.937
8-Jahres-Vorhersagen	1801	2.390	8	1.077	0.640	0.887
12-Jahres-Vorhersagen	698	2.282	12	1.210	0.708	0.905
4-Jahres-Vorhersagen nach 1 Update	1486	1	4	0.498	0.283	0.986
8-Jahres-Vorhersagen nach 1 Update	686	1	8	0.870	0.528	0.996
4-Jahres-Vorhersagen nach 2 Updates	730	2	4	0.754	0.449	0.988
8-Jahres-Vorhersagen nach 2 Updates	77	2	8	0.868	0.478	0.935
4-Jahres-Vorhersagen nach 3 Updates	577	3	4	0.631	0.334	0.958
8-Jahres-Vorhersagen nach 3 Updates	555	3	8	1.033	0.594	0.894
4-Jahres-Vorhersagen nach 4 Updates	555	4	4	1.071	0.637	0.771

Tabelle 35: Abschneiden der Abschätzungen für den Indikator I2.

I3 – Ebenheit in Querrichtung

Für den Indikator I3 (Abbildung 62) zeigen die Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters ebenfalls nur eine moderat ansteigende Tendenz. Für diesen Indikator scheint aber doch eine kontinuierliche Steigung der Zustandsnoten mit zunehmendem Alter sichtbar zu sein, bis ab Altersjahr 28 die Werte wieder von neuem auf tiefem Niveau

anzusteigen beginnen. Die angenäherte Prozessfunktion in Formel (33) modelliert entsprechend der Daten auch nur eine moderate Zustandsverschlechterung. Auch für den Indikator I3, wie für I2, scheint es unerklärliche Verbesserungen des Zustands ab ca. einem Alter von 28 Jahren zu geben. Eine mögliche Erklärung wäre, dass Massnahmen stattfanden, ohne das Einbaudatum des Deckbelags zu aktualisieren.

$$f(t) = 0.231 \cdot t^{0.394} + 0.345 \tag{33}$$

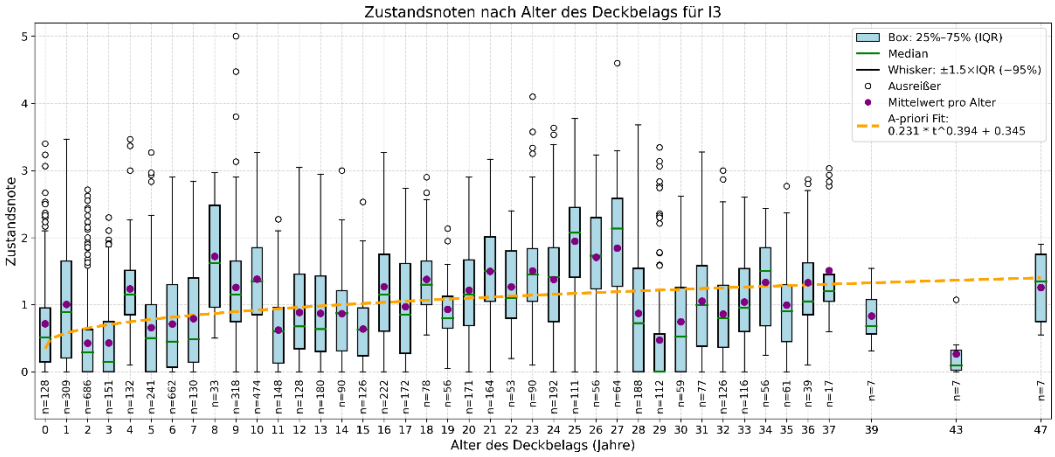


Abbildung 62: Übersicht der Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags mit der angeglichenen a priori Prozessfunktion für den Indikator I2.

Mit der Gittersuche wurden für den Indikator I3 die folgenden Werte gefunden: Für das Prozessrauschen $Q_{k-1} = 0.05$ und für das Messrauschen $R_k = 3$. Dies weist darauf hin, dass den erhobenen Einzelwerten nur eine geringe Aussagekraft beigemessen wird. Entsprechend fällt der Kalman-Gain bei einem Update relativ klein aus, so dass sich die a-posteriori-Abschätzung nur geringfügig von der a-priori-Schätzung entfernt. In den Beispielen zweier zufällig gewählter Bewertungsflächen (Abbildung 63 und Abbildung 64) ist dies deutlich zu erkennen. Die erhobenen Werte zeigen kaum einen klaren Trend, wodurch es aus Sicht der Metrik günstiger ist, näher bei der Prozessfunktion zu verbleiben.

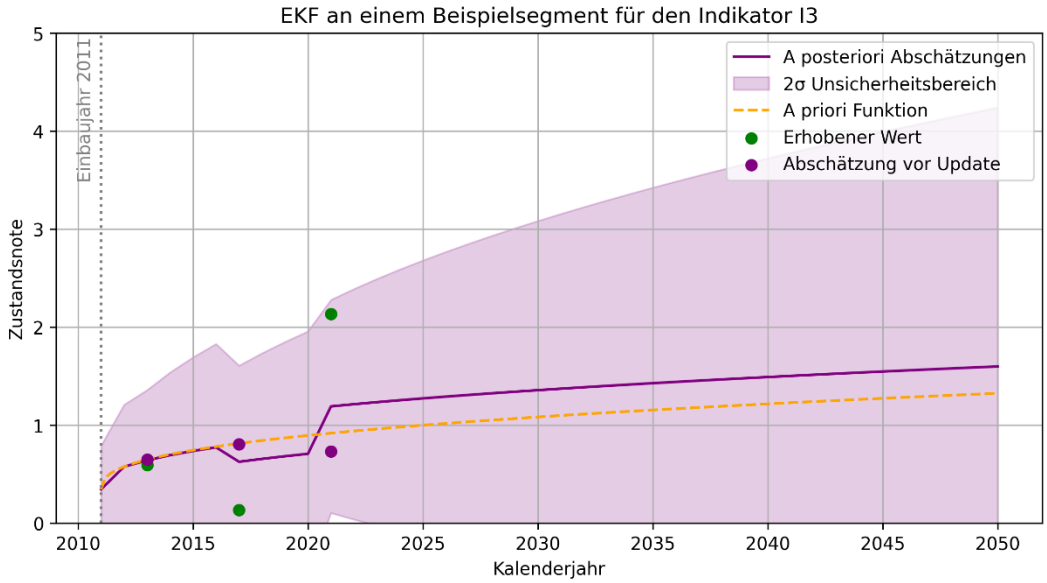


Abbildung 63: Veranschaulichung der Abschätzung für I3 an der Beispiel-Bewertungsfläche 1.

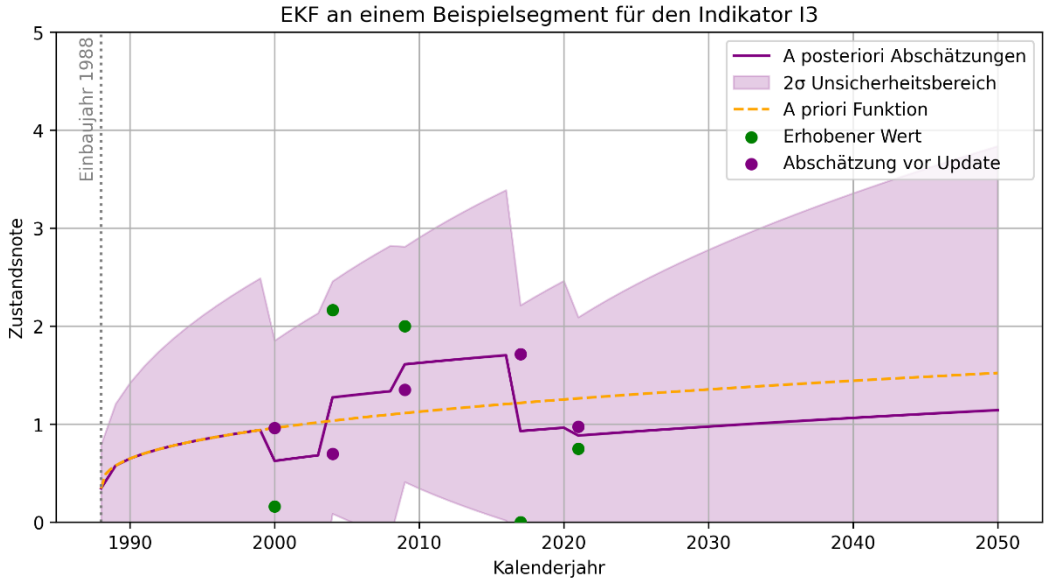


Abbildung 64: Veranschaulichung der Abschätzung für I3 an der Beispiel-Bewertungsfläche 2.

Auswertung Vorhersagen I3

Beschreibung Vorhersage	Anzahl	Updates (Durchschn.)	Vorhersagehorizont (Durchschn.)	RMSE	CRPS	Deckung 2Sigma
Alle Vorhersagen	16631	1.280	10.419	0.818	0.469	0.953
0 Updates	6237	0	13.209	0.774	0.447	0.932
1 Update	4435	1	10.005	0.789	0.452	0.962
2 Updates	2898	2	9.083	0.830	0.475	0.977
4-Jahres-Vorhersagen	3911	2.314	4	0.836	0.474	0.929
8-Jahres-Vorhersagen	1801	2.390	8	0.868	0.496	0.962

12-Jahres-Vorhersagen	698	2.282	12	0.815	0.471	0.983
4-Jahres-Vorhersagen nach 1 Update	1486	1	4	0.672	0.392	0.930
8-Jahres-Vorhersagen nach 1 Update	686	1	8	0.763	0.433	0.949
4-Jahres-Vorhersagen nach 2 Updates	730	2	4	0.792	0.453	0.941
8-Jahres-Vorhersagen nach 2 Updates	77	2	8	1.089	0.647	0.922
4-Jahres-Vorhersagen nach 3 Updates	577	3	4	0.982	0.568	0.948
8-Jahres-Vorhersagen nach 3 Updates	555	3	8	0.977	0.567	0.982
4-Jahres-Vorhersagen nach 4 Updates	555	4	4	1.167	0.696	0.876

Tabelle 36: Abschneiden der Abschätzungen für den Indikator I3.

In Tabelle 36 sind die Vorhersagen nach verschiedenen Kriterien für den Indikator I3 zusammengefasst. Über alle möglichen Vergleiche zwischen den Vorhersagen und den erhobenen Messwerten wurden insgesamt 16'631 Datensätze ausgewertet. Im Durchschnitt erfolgten 1.28 Updates pro Vorhersage bei einem mittleren Vorhersagehorizont von rund 10 Jahren. Der RMSE weist darauf hin, dass die Abschätzungen im Mittel um 0.818 Zustandsnoten vom erhobenen Wert abweichen, wobei grosse Abweichungen stärker gewichtet wurden. Unter Einbezug der prognostizierten Unsicherheit liegt der durchschnittliche CRPS-Wert bei 0.469 Zustandsnoten. Die 2-Sigma-Dekkung zeigt, dass rund 95 % der Messwerte innerhalb des Bereichs von zwei Standardabweichungen der Vorhersage, also ungefähr im 95 % Konfidenzintervall der Abschätzungen, liegen. Betrachtet man die Anzahl an Updates vor einer Vorhersage, so liefern Vorhersagen nach 0 Updates in allen Metriken die besten Resultate mit einem CRPS von 0.447, wobei die Metriken auch für Abschätzungen nach 1 oder 2 Updates sehr nahe bei den Werten von 0 Updates liegen. Werden die Vorhersagen nach festem Vorhersagehorizont gruppiert, erzielen die 4- und die 12-Jahres-Vorhersagen ähnliche CRPS-Werte um 0.47. Im Vergleich wird bei den 4-Jahres-Vorhersagen mit einer 2-Sigma-Deckung von rund 93 % die Modellunsicherheit leicht unterschätzt, während diese bei den 12-Jahres-Vorhersagen mit 98 % leicht überschätzt werden.

I4 – Griffigkeit

Für den Indikator I4 (Abbildung 65) liegen die Zustandsnoten insgesamt auf einem sehr niedrigen Niveau und steigen auch mit zunehmendem Alter des Deckbelags kaum. Insbesondere fällt ins Gewicht, dass Altersjahre mit besonders vielen Zustandsdaten (Jahr 2 und 6) fast bei 0 kleben, was die Annäherung der Prozessfunktion beeinflusst.

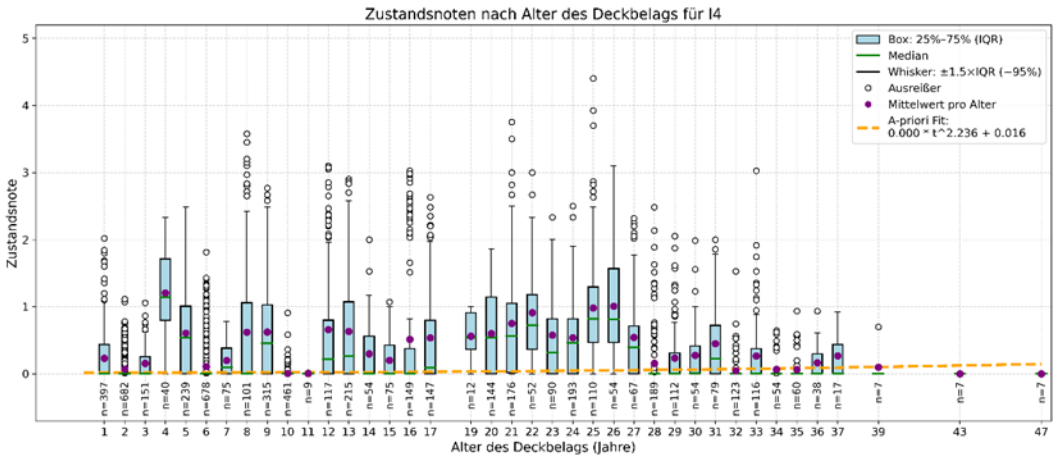


Abbildung 65: Übersicht der Zustandsnoten in Abhängigkeit des Alters des Deckbelags mit der angeglichenen a priori Prozessfunktion für den Indikator I2.

$$f(t) = 0.000 \cdot t^{2.236} + 0.016 \tag{34}$$

Die angenäherte a-priori-Prozessfunktion, welche den Zusammenhang zwischen Alter und Zustandsnote über alle Bewertungsflächen beschreibt, ist in Formel (34) dargestellt. Für den Indikator I4 haben die Daten eine speziellere Annäherungskurve ergeben. Was auffällt, ist dass die Potenz mit 2.236 grösser als 1 ist und sich die Kurve somit in die andere Richtung biegt und somit ein anderes verhalten darstellt als die vorherigen Indikatoren. Ebenfalls ist die Kurve so flach, dass der Parameter $a < 0.0005$ sein muss, damit nach der Rundung auf 3 Stellen nur Nullen angezeigt werden.

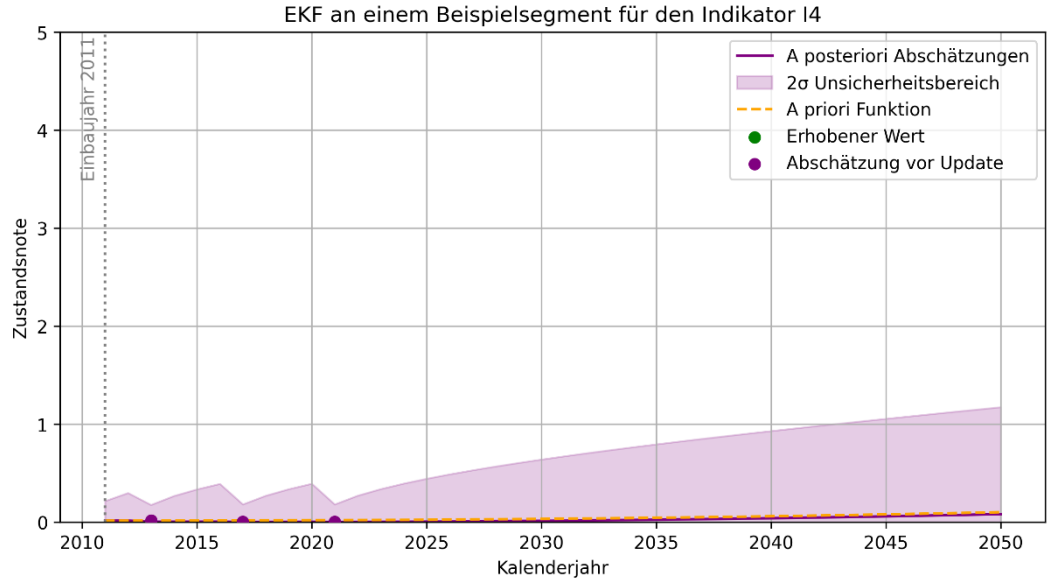


Abbildung 66: Veranschaulichung der Abschätzung für I4 an der Beispiel-Bewertungsfläche 1.

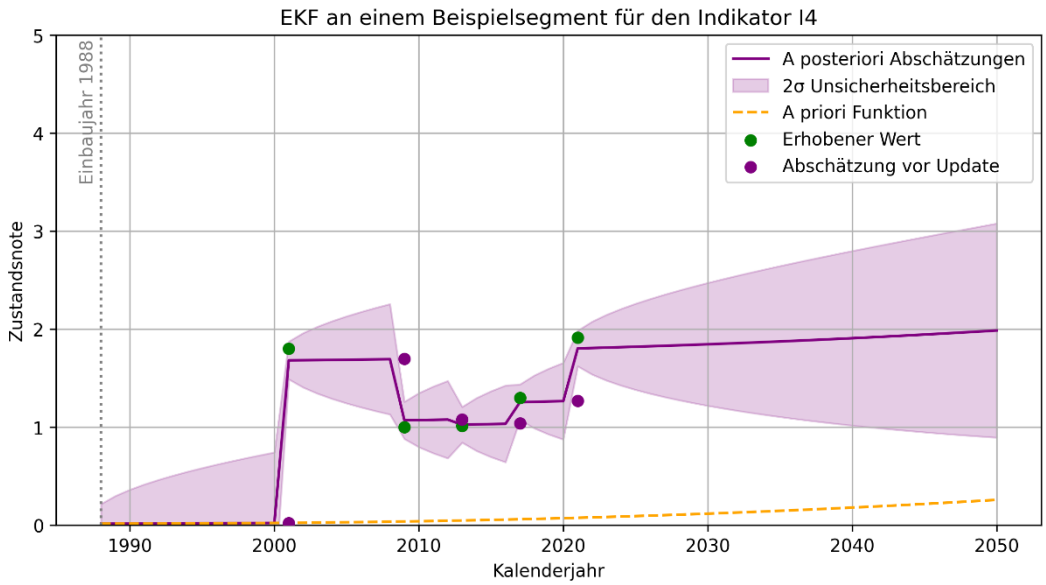


Abbildung 67: Veranschaulichung der Abschätzung für I4 an der Beispiel-Bewertungsfläche 2.

Mit der Gittersuche wurden für den Indikator I4 die folgenden Werte gefunden: Für das Prozessrauschen $Q_{k-1} = 0.01$ und für das Messrauschen $R_k = 0.01$. Diese Werte zeigen, dass sowohl das Prozessmodell der Zustandsentwicklung wie auch die erhobenen Messwerte als sehr verlässlich einzustufen sind, da beide Rauschanteile vergleichsweise klein sind. In den zwei zufällig ausgewählten Beispielbewertungsflächen (Abbildung 66 und Abbildung 67) ist gut zu erkennen, dass sich die a-posteriori Abschätzung jeweils eng an die gemessenen Zustandswerte anpasst. Mit der fast konstanten Prozessfunktion ist dieses Verhalten auch nicht erstaunlich, dass Veränderungen durch Zustandserhebungen sehr ernst genommen werden, wenn es über die Prozessfunktion kaum Veränderungen gibt.

Auswertung Vorhersagen I4

Beschreibung Vorhersage	Anzahl	Updates (Durchschn.)	Vorhersagehorizont (Durchschn.)	RMSE	CRPS	Deckung 2Sigma
Alle Vorhersagen	13325	1.003	10.350	0.631	0.310	0.830
0 Updates	5666	0	13.290	0.669	0.314	0.829
1 Update	3869	1	10.170	0.549	0.279	0.867
2 Updates	2306	2	6.734	0.605	0.305	0.840
4-Jahres-Vorhersagen	3311	2.112	4	0.500	0.242	0.840
8-Jahres-Vorhersagen	2399	1.582	8	0.715	0.379	0.779
12-Jahres-Vorhersagen	1188	1.315	12	0.853	0.482	0.763
4-Jahres-Vorhersagen nach 1 Update	1018	1	4	0.394	0.188	0.858
8-Jahres-Vorhersagen nach 1 Update	1252	1	8	0.568	0.292	0.847
4-Jahres-Vorhersagen nach 2 Updates	1221	2	4	0.356	0.175	0.921

8-Jahres-Vorhersagen nach 2 Updates	594	2	8	0.774	0.435	0.741
4-Jahres-Vorhersagen nach 3 Updates	594	3	4	0.795	0.457	0.636
8-Jahres-Vorhersagen nach 3 Updates	452	3	8	0.834	0.497	0.650
4-Jahres-Vorhersagen nach 4 Updates	438	4	4	0.388	0.187	0.904

Tabelle 37: Abschneiden der Abschätzungen für den Indikator I4.

In Tabelle 37 sind die Vorhersagen nach verschiedenen Kriterien für den Indikator I4 zusammengefasst. Über sämtliche Vergleiche zwischen den Vorhersagen und den erhobenen Messwerten wurden insgesamt 13’325 Datensätze ausgewertet. Im Durchschnitt erfolgte dabei knapp ein Update pro Vorhersage, bei einem mittleren Vorhersagehorizont von etwa 10 Jahren. Der RMSE macht deutlich, dass die Schätzungen im Mittel um 0.631 Zustandsnoten vom tatsächlichen Wert abweichen, wobei grössere Abweichungen stärker gewichtet wurden. Unter Berücksichtigung der mitgeschätzten Unsicherheit liegt der durchschnittliche CRPS bei 0.310 Zustandsnoten. Die 2-Sigma-Deckung zeigt, dass rund 83 % der erhobenen Werte innerhalb des Bereichs von zwei Standardabweichungen der Vorhersage liegen. Analysiert man die Anzahl der Updates vor einer Vorhersage, so schneiden Vorhersagen mit 1 Update in allen Metriken am besten ab. Die Differenzen in den verschiedenen Metriken sind aber nicht gross bei unterschiedlicher Anzahl Updates. Werden die Vorhersagen nach festem Vorhersagehorizont zusammengefasst, erreicht die 4-Jahres-Vorhersage mit einem CRPS von 0.242 den besten Wert.

5.3 Bemerkungen zu Tunnel

Im Hinblick auf Tunnel existiert ein detailliertes Forschungsprojekt, das sich intensiv mit dem Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln befasst. Das Projekt dient der Verbesserung und Systematisierung des Erhaltungsmanagements bergmännischer Strassentunnel zur Unterstützung stabiler und kosteneffizienter Erhaltungsentscheidungen (Hajdin et al., 2025). In besagtem Projekt, welches auf die zuvor bestehenden Lücken im Bereich der Tunnelerhaltung aufbaut, widmet sich ein Teil dem Zustand und insbesondere den spezifischen Schadensprozessen und dem Langzeitverhalten von Tunneln (Weishaupt & Beeler, 2024).

Im Projekt MINERVA werden die Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Zuständen von Tunneln basierend auf der Struktur für die Daten aller Kunstbauten aus KUBA gemacht. Daher ist die Vorgehensweise zur Abschätzung des Zustands von Tunneln in diesem Bericht somit analog zu Brücken, indem die Abschätzungen auf der Ebene der Bauwerksteile stattfindet und deren Zustand mit den vorgestellten Methoden abgeschätzt wird. Diese systematische Betrachtung von Tunnelbauwerken als Zusammensetzung von verschiedenen Bauwerksteilen stützt sich auf die bestehenden Informationen für Kunstbauten und erlaubt es für die Weiterverwendung in den Algorithmen die Zustandsabschätzungen analog zu den Brückenbauwerksteilen zu machen.

6 Prognose von Unterhalts-massnahmen

6.1 Ausgangslage

6.1.1 Ziel der Methodik

Eine zentrale Aufgabe der Erhaltungsplanung im ASTRA ist es, den Handlungsbedarf zu ermitteln und eine Mehrjahresplanung für die langfristige Investitionsplanung zu führen. Im «Handbuch Erhaltungsplanung: Arbeitsprozesse und Produkte» (ASTRA, 2016) wird beschrieben, dass die ermittelten Zustandsdaten ausgewertet und daraus Schlüsse für den zukünftige Handlungsbedarf gezogen werden. Anhand des Handlungsbedarfs wird festgelegt, welche möglichen Einzelmassnahmen und/oder Erhaltungsprojekte in der Zukunft anstehen. Der Betrachtungszeitraum dafür erstreckt sich über die nächsten 30 Jahre, kann nach Bedarf aber auch wesentlich kürzer sein.

Im vorangehenden Kapitel 2 wird der Erhaltungsplanungsprozess vorgestellt, welcher sich auf diverse interne Dokumente, aber auch auf Interviews zur Erhaltungsplanung der Filiale 1 stützt. Dieser beschreibt, dass die zeitliche Zuordnung, wann eine Einzelmassnahme oder ein Erhaltungsprojekt durchgeführt werden soll, meist aufgrund des Alters bzw. der erwarteten Nutzungsdauer (vgl. Kapitel 1.4 Terminologie) einer Anlage erfolgt oder durch die Empfehlung von Inspektoren. Das bezüglich Kunstbauten zur Verfügung stehende Hilfsmittel KUBA-MS wird nicht oder nur vereinzelt für einfache Prognosen oder Investitionsschätzungen verwendet. Für das Trassee steht kein solches Hilfsmittel zur Verfügung. Die im Kapitel 2 beschriebene, derzeit überwiegend reaktive, auf Zustandsbewertungen basierende oder qualitative, auf Erfahrungen beruhende, Vorgehensweise der Brückenmanager bei der Ermittlung des Handlungsbedarfs für zukünftige Planungsperioden ist ein zeit- und arbeitsintensiver Prozess. Es muss ermittelt werden, an welchen Anlagen im Portfolio Massnahmen durchgeführt werden sollen und um welche Art von Massnahmen es sich handelt. Für Erhaltungsplaner wäre es deswegen hilfreich, eine effiziente, konsistente und vollständige Übersicht über alle potenziell zukünftig erforderlichen Unterhaltsmassnahmen zu erhalten, um eine solide Grundlage für die Entscheidung zu haben, welche Anlagen an Ingenieurbüros für detaillierte Untersuchungen vergeben werden sollten und eine erste Idee über mögliche Massnahmen und deren Gruppierung zu erhalten.

Mit dem Trend zur zunehmenden Digitalisierung von Prozessschritten besteht auch im ASTRA die Möglichkeit, eine solche Übersicht zu erstellen. Die grosse Menge an Informationen über die Anlagen, deren Zustand und die voraussichtlichen Kosten für Massnahmen kann so ohne manuelle Arbeit in die Entscheidung einfliessen. Über lange Zeiträume ist es aber unwahrscheinlich, dass Unterhaltsmassnahmen immer genau zum optimalen Zeitpunkt ausgeführt werden können und somit gewisse Verschiebungen (früher oder später) passieren müssen. Grund dafür ist, dass Ressourcen wie Finanzmittel, Planer Kapazität, Bau Kapazität eingeschränkt sind, sowie das Bedürfnis den Verkehr so wenig wie möglich zu beeinträchtigen. Für solche Situationen

wird vorgeschlagen eine Risikoabschätzung[4] der Notwendigkeit einer Sofortmassnahme (kurz auch Sofortmassnahmenrisiko) vorzunehmen, um eine Entscheidungsstütze zu haben Unterhaltmassnahmen zu priorisieren. Eine Sofortmassnahme wird definiert als die Massnahme, welche reaktiv durchgeführt werden muss, wenn unvorhergesehen eine Betriebseinschränkung eintritt. Für die Berechnung des Sofortmassnahmenrisikos müssen deshalb die Auswirkungen auf den Betrieb sowie die Wahrscheinlichkeit für der Betriebseinschränkung bekannt sein.

Das Ziel dieser Methodik ist es somit, zu ermöglichen:
1. den Bedarf an Unterhaltsmassnahmen und vertiefte Untersuchungen[5] abzuschätzen. Informationen aus den Inspektionsberichten und Massnahmenempfehlungen werden so mit Prognosen über die Zustandsentwicklung ergänzt.
2. die Investitionsabschätzung für die Mehrjahresplanung zu berechnen. Aus den Zustandsprognosen können mögliche Unterhaltsmassnahmen und deren Kosten abgeleitet werden.
3. Anlagen zu identifizieren mittels einer standardisiert und vereinfacht Risikoanalyse, die besondere Aufmerksamkeit benötigen. Eine grobe Risikoabschätzung unterstützt Entscheidungsträger frühzeitig vertiefte Untersuchungen einzuleiten und Ressourcen gezielt einzusetzen, d.h. bei inakzeptablen hohen Risiken konzentrierte Anstrengungen zu deren Beseitigung zu unternehmen. Ausserdem hilft die Risikoabschätzung zu entscheiden, welche vertieften Untersuchungen bei Ressourcenmangel zurückgestellt werden können.

Ergänzend zur Beschreibung der Methodik wird an einem Fallbeispiel gezeigt, welche Resultate die Methodik liefern kann.

6.1.2 Prognosen von Unterhaltsmassnahmen

Der Fokus der Anwendungsmöglichkeit der Methode und die Fallbeispiel liegen auf Brücke und dem Trassee. Für das Trassee besteht zum heutigen Zeitpunkt keine konkrete Möglichkeit Prognosen zu Unterhaltsmassnahmen zu machen. Jedoch gibt es die Möglichkeit zur Abschätzung der zukünftigen Zustandsdaten aber auch nur in einem limitierten Mass. Für mehr Details wird auf das Kapitel 3.2 verwiesen sowie die Vorstellung und Anwendung der Methode im Kapitel 6.3. Für Brücken gibt es bereits die KUBA-MS Applikation, die viele Teile der formulierten Ziele schon abdeckt. KUBA-MS ist eine Applikation die im Rahmen von KUBA, «ein Instrument zur Erfassung, Bearbeitung und Auswertung von Substanz-, Zustands- und Erhaltungsdaten von Kunstbauten im Strassennetz (Brücken, Tunnel, usw.)» (ASTRA, 2023a, 2.1), zur Verfügung steht.

Die Applikation KUBA-MS ist unter KUBA 5.0 verfügbar und hat zum Ziel, die Erhaltung von Kunstbauten, insbesondere Brücken, effizienter zu gestalten. So werden in der IT-Dokumentation von KUBA-MS (ASTRA, 2021a) die Automatisierung, die Entscheidungsunterstützung und der bestmögliche Mitteleinsatz als Gründe für die Anwendung genannt. Nicht unterstützt werden u.a. die Wichtigkeit von Kunstbauten und der Einbezug von Risiken. Die Erfassten Grundlagendaten für die Applikation KUBA-MS sind

[4] Im Bericht wird Risiko oder Risikoabschätzung analog verwendet.
[5] Vertiefte Untersuchungen können von Erhaltungsplaner angeordnet werden, wenn genauere Erkenntnisse über den Zustand eines Infrastrukturobjekts benötigt werden, mehr dazu im Kapitel 2.

die in der Datenbank KUBA-DB (ASTRA, 2023a) hinterlegt. Konkret werden in KUBA-MS zur Prognose zukünftiger Unterhaltsmassnahmen an Brücken in einem Netz verschiedene Kenntnisse über deren Bauwerksteile vorausgesetzt. Dazu gehören der aktuelle Zustand, der Schadensprozess zur Prognose der Zustandsentwicklung, die Massnahmenstrategie und die Kosten einer Unterhaltsmassnahme.

Die Methodik dieses Kapitels erweitert den KUBA-MS-Algorithmus also nur, baut auf ihm auf und wird in zu Teilen auch für das Trassee angewendet.

6.1.3 Risikomanagement im ASTRA

Der Einbezug von Risiken ist ein langfristiges Ziel des ASTRA (ASTRA, 2017a) und ist eine grosse Hilfe für Erhaltungsplaner bei Entscheidungen, wenn ein «normaler» oder ein nach Massnahmenstrategie laufender Prozess nicht mehr möglich ist und damit es Warnsignale für Entscheidungsträger gibt. Risikomanagement, wie vom ASTRA in der Weisung «Integrales Risiko- und Chancenmanagement des ASTRA»[6] (ASTRA, 2017a) beschrieben, erfolgt immer nach dem allgemein anwendbaren Prozess, der in Abbildung 68 dargestellt ist: (1) Bestimmen des Kontexts, (2) Identifikation, (3) Analyse, (4) Bewertung, (5) Einschätzung ob tragbar und (6) Vorgehen (Massnahmen) mit den übergeordneten Prozessen (7) Überwachung und Nachverfolgung sowie (8) Kommunikation und Abstimmung.

Eine für die Erhaltungsplanung brauchbare Risikoberechnung sollte die Schritte 2 bis 5 abdecken. Die Entscheidungsträger würden in Schritt 6 entscheiden, wie mit diesen Ergebnissen umzugehen ist. Die Schritte 1, 7 und 8 sind übergeordnet und betreffen die Durchführung einer Risikoberechnung für den Erhaltungsplanungsprozess nicht.
Für eine Umsetzung der Risikobetrachtung innerhalb der Methodik ist es daher erforderlich, die mit einer Anlage verbundenen Risiken zu identifizieren, das Risiko zu berechnen und die Ergebnisse zu bewerten, d.h. mit Kriterien zu vergleichen, die bestimmen, ob das Risiko tragbar ist oder nicht. Welches Vorgehen sich daraus ergibt, bleibt im Rahmen der Erhaltungsplanung eine menschliche Entscheidung.

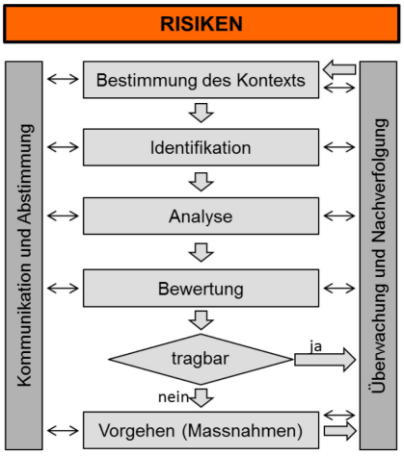


Abbildung 68: Prozess des integralen Risikomanagements beim ASTRA (ASTRA, 2017a, Abbildung 5.3).

[6] Die Weisung wurde überarbeitet. Die neue Version aus dem Jahr 2025 liegt allerdings nur in Französisch vor (ASTRA, 2025a). Der Prozess (Abbildung 68) ist derselbe wie zuvor und wurde aus Gründen der sprachlichen Konsistenz aus der alten, auf Deutsch verfassten Version der Weisung übernommen.

6.1.4 Einordnung der Methodik im Erhaltungsplanungsprozess

Die in diesem Kapitel vorgestellte Methodik soll im Prozessschritt «Inspektionsbericht bzw. Zustandserfassungs- & Bewertungsbericht und Massnahmenempfehlung» des Erhaltungsplanungsprozesses angewendet werden. Die Ergebnisse fliessen dann in die Prozessschritte «Handlungsbedarf definieren» und «Mehrjahresplanung anpassen» sowie in die Entscheidung «Vertiefte Untersuchung notwendig?» ein. Abbildung 69 zeigt wie die angedachte Methodik den Prozess ergänzt.

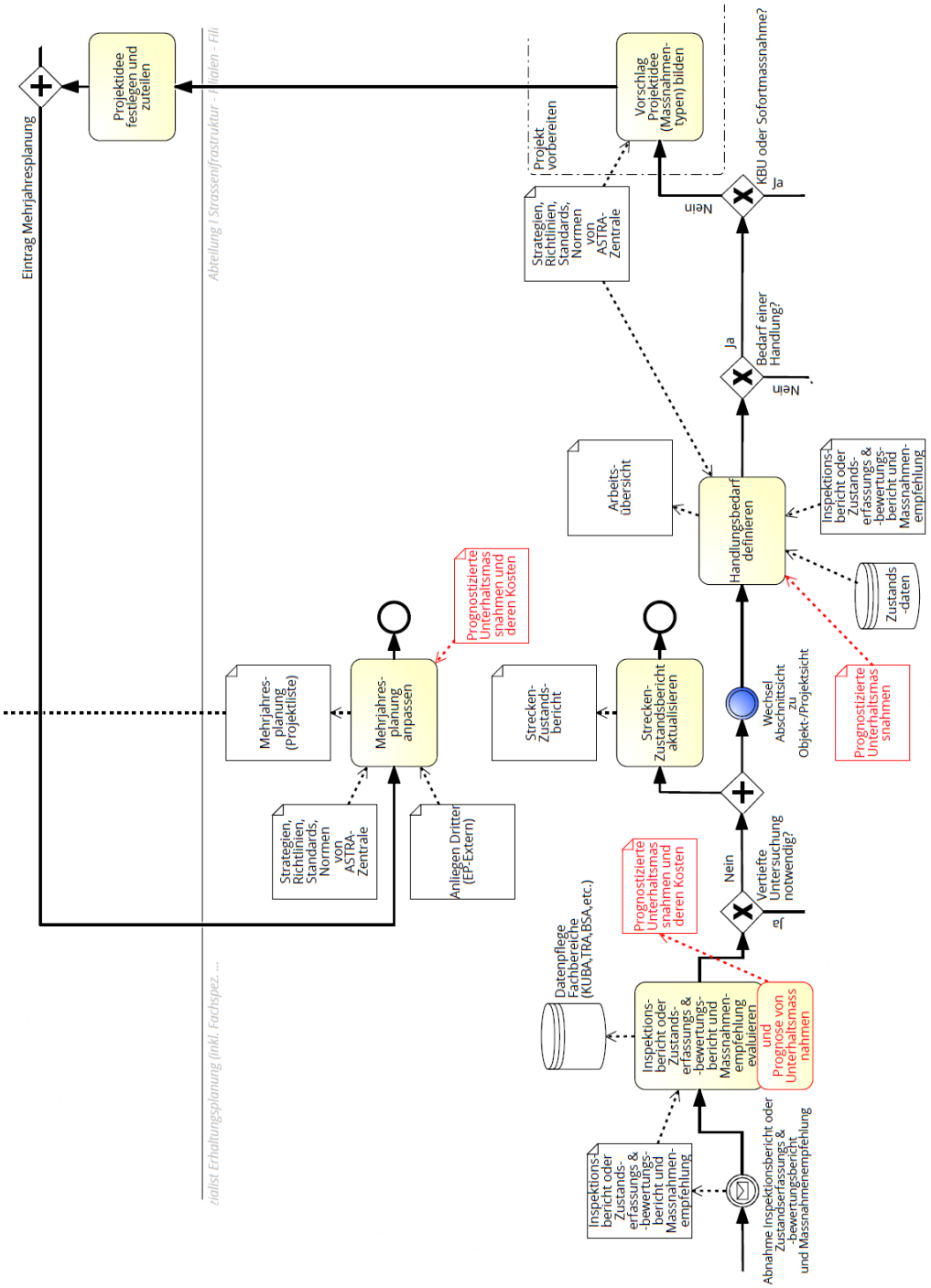


Abbildung 69: Ausschnitt des Erhaltungsplanungsprozesses aus Kapitel 2.3 ergänzt mit der Einordnung der Methodik.

6.2 Brücken

Die Erläuterung des Algorithmus erfolgt in Kapitel 6.2.1 in einer kompakten sowie einer ausführlichen Form. Die für das Verständnis erforderlichen Begriffe und Konzepte sind im Kapitel 1.4 aus ASTRA- und anderen Quellen dargelegt. Eine detaillierte Erläuterung der Risikoberechnung findet sich in Kapitel 6.2.2. Einführend ist festzuhalten, dass in diesem Algorithmus die grundlegende Funktionsweise von KUBA-MS übernommen wird und diese auch nicht in Frage stellt, da es für die benötigte Berechnungsgenauigkeit als angemessen angesehen wird.

6.2.1 Algorithmus

Im Folgenden wird der Algorithmus vorgestellt, mit dem eine konsistente, nachvollziehbare und reproduzierbare Prognose von Unterhaltsmassnahmen möglich ist. Der Algorithmus besteht aus wohldefinierten Schritten, die bei gleicher Eingabe zu gleichen Resultaten führen. Der hier präsentierte Algorithmus eignet sich für die Umsetzung als Computerprogramm. Für Betreiber, die über keine oder nur über wenig Daten verfügen, respektive die Möglichkeit computergestützter Berechnungen nicht gegeben ist, bestünde die Option, den Algorithmus in seinen Grundschritten qualitativ umzusetzen. In diesem Fall wäre jedoch das Resultat nicht immer eindeutig für eine bestimmte Eingabe, was einer Heuristik und nicht einem Algorithmus entspricht.

Der Algorithmus hat 8 Schritte, wobei die Schritte 3-7 in einem Loop sind und wiederholt werden, bis der gewählte Planungshorizont erreicht ist. Der Loop beginnt nach der Auswahl der Brücken und der Aufbereitung der dazugehörigen Daten. In diesem wird für jede Planungsperiode die Werte berechnet und ausgewertet, um Unterhaltsmassnahmen ableiten zu können. Der letzte Schritt ist die Ausgabe, in welcher die Prognosen und Berechnungen an den Benutzer des Computerprogramms zurückgegeben werden. Diese Informationen dienen als Ergänzung zu den bereits vorhandenen und unterstützen den Erhaltungsplaner bei seinen Entscheidungen.

Die Schritte des Algorithmus sind in Abbildung 70 als Prozessdiagramm dargestellt. Eine kurze Zusammenfassung ist in Tabelle 38 gegeben. Nachfolgend wird in Tabelle 39 bis Tabelle 46 jeder Schritt ausführlich beschrieben. Die detaillierte Beschreibung umfasst alle Schritte und ist jeweils in einem Tabellenformat gegeben. Es werden immer die Punkte Input, Benutzereingabe, Beschreibung, Output, Betrachtungszeitraum, Annahmen und Anmerkung angesprochen. Da die Sofortmassnamenrisikoberechnung neu ist und noch nicht Teil von KUBA-MS ist, wird dieser Schritt noch im Detail im Kapitel 6.2.2 beschrieben.

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, orientiert sich der vorgestellte Algorithmus an KUBA-MS und stellt dessen Grundform nicht in Frage. Der wichtigste Änderungsvorschlag ist die Verfallsmodellierung unter Berücksichtigung der Bauwerksteilvergangenheit. Die wesentliche Erweiterung ist die Ermittlung des Sofortmassnahmenrisikos einer Brücke.

Das Sofortmassnahmenrisiko soll die Akzeptanz und Anwendung des Algorithmus erhöhen, da es einen zusätzlichen, nützlichen Wert für die Entscheidungen der Erhaltungsplaner hinsichtlich Bestimmung der künftiger Unterhaltsmassnahmen liefert. Dieser Wert ermöglicht einen Vergleich des totalen und normalisierten Sofortmassnahmenrisikos der analysierten Brücken. Es ist nicht das Ziel, das tatsächlichen Risiko zu ermitteln, sondern einen vergleichbaren Wert zu schaffen, der als Managementwerkzeug eingesetzt werden kann. So lässt sich beispielsweise ermitteln, welche Brücken im Vergleich ein höheres Risiko aufweisen und daher besondere Beachtung erfordern. Besondere Beachtung meint, dass frühzeitig vertiefte Untersuchungen eingeleitet werden können und dass die Brücken für den Handlungsbedarf als Priorität anzusehend sind, natürlich immer als Funktion der vorhandenen Daten. Es gilt aber stets: Die Entscheidungen verbleiben bei der Erhaltungsplanung. Alle berechneten Werte dienen ausschliesslich als Unterstützung im Entscheidungsprozess.

Kurzbeschrieb des Algorithmus

Schritt	Beschreibung
1	Auswahl [Teil]netz, in dem sich die zu untersuchenden Brücken befinden. Es ist mindestens ein ganzes Filialnetz zu betrachten.[7]
2	In der Datenaufbereitung werden die vorhandenen Zustandsdaten abgerufen und die Datenlücken mit geeigneten Methoden ergänzt (vgl. Kapitel 5). Für alle Bauwerksteile wird der Ist-Zustand (t=0) prognostiziert.
3	Die Prognose des Zustands der Bauwerksteile für die nächste Periode wird mit einer Übergangsmatrix (Verfalls- und Erfolgsmatrix) berechnet. Die Periodenlänge entspricht beim ASTRA der Inspektionsperiodizität, d.h. 5 Jahre. Damit kann eine probabilistische Zustandsklassenverteilung berechnet werden.
4	Berechnung des Sofortmassnahmenrisikos der Brücken mit einem standardisiertem Fehlerbaum für jede Periode. Die prognostizierte Zustandsklassenverteilung wird mitberücksichtigt.
5	Prüfung der Wahrscheinlichkeit, dass eine Unterhaltsmassnahme gemäss der Massnahmenstrategie des Bauwerksteils durchgeführt werden sollte.
6	Kostenschätzung für das ausführen der Unterhaltsmassnahmen auf allen Brücken.
7	Priorisierung der Unterhaltsmassnahmen anhand des Risikos der Brücken.
8	Ausgabe mit Empfehlung von Unterhaltsmassnahmen und Sofortmassnahmenrisiko pro Brücke. Ausgabe der Empfehlungen von Unterhaltsmassnahmen und die Berechnungen des Sofortmassnahmenrisikos, wenn diese Massnahmen nicht durchgeführt werden.

Tabelle 38: Kurzbeschreibung der Schritte im Algorithmus zur Bestimmung von Unterhaltsmassnahmen.

[7] Bei einer engeren Auswahl würden, die aus der Gesamtschweiz errechnet Verfallsvektoren zu einer verfälschten Sicherheit in den Resultaten führen, auch würde solch ein Ansatz einer Gesamtplanung widersprechen.

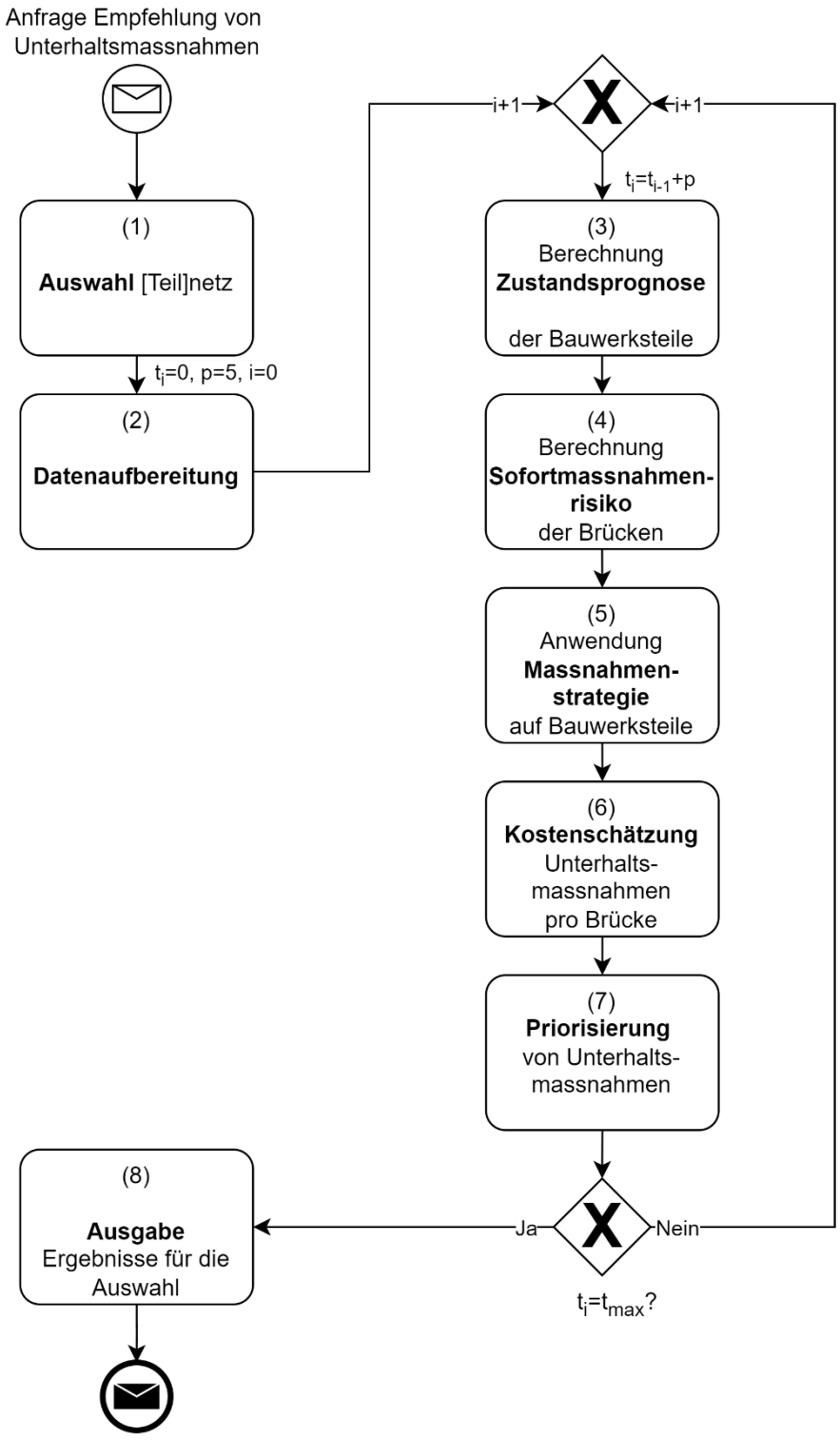


Abbildung 70: Algorithmus zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen im ASTRA für Brücken.

Schritt 1: Auswahl [Teil]netz

Input	Liste aller Brücken (Bauanlagen und Bauwerke) in KUBA.
Benutzereingabe	Auswahl, welche Brücken analysiert werden sollen und was der Betrachtete Zeitraum bzw. Planungshorizont t_{max} ist.
Beschreibung	Datensatz auf Auswahl beschränken.
Output	Ausgewählte Brücken sowie ihre Bauwerksteile mit zugehörigen Daten.
Betrachtungszeitraum	$t_0 = 0$ (Das Jahr, zum Zeitpunkt der Anwendung)
Annahmen	-
Anmerkung	Die Auswahl muss immer mit einem Teil- oder dem Gesamtnetz übereinstimmen, für das die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel bekannt sind und den bestehenden Gebietsabgrenzungen entspricht. Arbiträre Auswahlen von Brücken im Netz führen zu ungültigen Resultaten. Die Auswahl sollte daher nur wie folgt getroffen werden: • Gebietseinheit • Filialgebiet • Gesamtnetz

Tabelle 39: Schritt 1 «Auswahl [Teil]netz» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen.

Schritt 2: Datenaufbereitung

Input	Ausgewählte Brücken sowie ihre Bauwerksteile mit zugehörigen Daten.
Benutzereingabe	Ergänzung von Massnahmen die schon geplant oder in der Ausführung sind.
Beschreibung	Datenbereinigung: • Nicht kostenbestimmende Bauwerksteile aus dem Datensatz entfernen*. • Imputation von fehlenden Daten, d.h. für Bauwerksteile ohne oder nicht aktuelle Zustandsdaten diese mit einer geeigneten Methode abschätzen. Sonstige fehlende oder falsche Daten wie Bauart etc. von Hand nachführen in KUBA. Datenstandardisierung: • Zustandsklassen für t=0 der Bauwerksteile abschätzen. Damit eine einheitliche Prognose möglich ist. Kapitel 5 beschreibt das Vorgehen im Detail.
Output	Bauwerksteile mit bereinigten und standardisierten Daten. Eine Zustandsklasse für das aktuelle Jahr, also t=0, ist abgeschätzt. Verändern der i-Variabel um $+1$.
Betrachtungszeitraum	$t_i = 0, wobei\ i = 0$
Annahmen	(Siehe Kapitel 5)
Anmerkung	* Kostenbestimmende Bauwerksteile sind nach (ASTRA, 2012) all jene Bauwerksteile, die für ein Managementwerkzeug unabdingbar sind. Für die kostenbestimmenden Bauwerksteile werden die Zustandsdaten erfasst und die Datengrundlage für eine Abschätzung der Unterhaltsmassnahmenkosten existiert. Eine Ausweitung, in der alle Bauwerksteile berücksichtigt werden, macht im Kontext von KUBA keinen Sinn, weil es nicht so aufgebaut wurde, dass nicht kostenbestimmende Bauwerksteile in Verfallsprognose berücksichtig werden sollten. Jedoch berücksichtigt die Kostenberechnung die Anteile der nicht kostenbestimmenden Bauwerksteile and den Baukosten wieder.

Tabelle 40: Schritt 2 «Datenaufbereitung» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen.

Schritt 3: Zustandsprognose

Input	Bauwerksteile mit bereinigten Daten, wobei folgendes bekannt sein muss: • Zugehörigkeit zu Brückenbauwerk (und -bauanlage) • Generalisierte und normale Bauwerksteiltyp • Bauart • Zustandsklasse zum Zeitpunkt t_{i-1} • Ausmass • Primärer Schadensprozess • Alter, «Nutzungsdauer», Anzahl Verfallsratenzunahmen, Prozentuale Zunahme der Verfallsrat • Wird zum Zeitpunkt t_{i-1} eine Unterhaltsmassnahme durchgeführt? ○ Empfohlene Unterhaltsmassnahme Berechnungsgrundlagen: • Verfallsmatrix für jeden Schadensprozess • Erfolgsmatrix für jede Unterhaltsmassnahme
Benutzereingabe	-
Beschreibung	Die probabilistische Verteilung des Zustands zum Ende der nächsten Periode wird mit der Anwendung der nicht stationären Verfallsmatrix auf den Zustandsvektor eines Bauwerksteils prognostiziert. Kapitel 5 beschreibt das Vorgehen im Detail mit stationären als auch nicht stationären Verfallsmatrizen.
Output	Prognostizierte Zustandsverteilung aller Bauwerksteile zum Zeitpunkt t_i.
Betrachtungszeitraum	$t_{i-1}\ bis\ t_i = t_{i-1} + p$, wobei die Periodenlänge (p) 5 Jahre ist für Brücken beim ASTRA.
Annahmen	Die Berechnete Zustandsverteilung gilt zum Ende einer Periode.
Anmerkung	Die in KUBA-MS hinterlegten Verfallsmatrizen sind netzwerkweit anwendbar. Für Erhaltungsplanungsentscheidungen auf Filialebene und Kostenschätzungen für das gesamte Netz wird dieser Ansatz als ausreichend erachtet.

Tabelle 41: Schritt 3 «Zustandsprognose» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen.

Schritt 4: Sofortmassnahmenrisiko

Input	Für jede Brücke: • Fehlerbäume zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit das eine Sofortmassnahme notwendig ist. • Prognostizierte Zustandsverteilung aller Bauwerksteile zum Zeitpunkt t_i. Auswirkung auf die Anspruchsgruppen, welche aufgrund der Sofortmassnahmen entstehen.
Benutzereingabe	-
Beschreibung	Dieser Schritt wird in Kapitel 6.2.2 «Risikoberechnung» genauer erläutert.
Output	Berechnung des Sofortmassnahmenrisikos der betrachteten Brücken.
Betrachtungszeitraum	$t_{i-1}\ bis\ t_i = t_{i-1} + p, wobei\ p = 5$
Annahmen	Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit eine Sofortmassnahme kann approximiert werden mit einer Fehlerbaumanalyse. Die Relevanten Auswirkungen sind beschränkt auf Betreiber (Sofortmassnahmenkosten) und Nutzer (Kosten der zusätzlichen Reisezeit).
Anmerkung	-

Tabelle 42: Schritt 4 «Sofortmassnahmenrisiko» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen.

Schritt 5: Massnahmenstrategie

Input	Prognostizierte Zustandsverteilung aller Bauwerksteile zum Zeitpunkt t_i.
Benutzereingabe	Optional: • Definition einer benutzerspezifischen Massnahmenstrategie • Ändern der empfohlenen Unterhaltsmassnahme • Ändern des Grenzwertes
Beschreibung	Massnahmenstrategie eines generalisierten Bauwerkteiltyps abgleichen mit der prognostizierten Zustandsverteilung eines Bauwerkteils, um die Wahrscheinlichkeit einer Unterhaltsmassnahme zu bestimmen. Ein beliebiges Bauwerksteil: X Zustandsvektor von X: X_{ZK} Zustandsanteil in Zustand i: $X_{ZK,i}$ Deterministische Massnahmenstrategie von X: Massnahme, wenn $X_{ZK,j}$ erreicht ist. Wenn: $\sum_{i=j}^{5} X_{ZK,i} > 0.5$ Empfehlung der Massnahme, welche in Zustand i durchgeführt wird bei Überschreitung eines Grenzwertes. Für diese Arbeit ist $j = 3$ global gewählt und es wird die wahrscheinlichste Massnahme gewählt.
Output	Wahrscheinlichkeit der möglichen Unterhaltsmassnahmen zum Zeitpunkt t_i und die empfohlene Unterhaltsmassnahme für jedes Bauwerksteil.
Betrachtungszeitraum	t_i
Annahmen	Es wird davon ausgegangen, dass für jedes Bauwerksteil die zu verfolgende Massnahmenstrategie bekannt ist. Im vorliegenden Fall wird jeweils die optimale Massnahmenstrategie aus KUBA-MS übernommen. Diese ist abhängig vom Schadensprozess und dem generalisierten Bauwerksteiltyp. Da die optimalen Massnahmenstrategien aus KUBA-MS nicht für alle Zustandsklassen ≥ 3 eine Massnahme enthalten, mussten für diese Fälle Massnahmen ergänzt werden. Zudem wird ein Auslöser gewählt, um eine spezifische Unterhaltsmassnahme zu empfehlen. Das heisst, sobald ein Bauwerksteil zu 50 % oder mehr in die Zustandsklasse 3 oder eine schlechtere Klasse fällt. Da im Algorithmus mit probabilistischen Zustandsklassenverteilungen gerechnet wird, muss noch geprüft werden, welche Unterhaltsmassnahme die wahrscheinlichste ist, welche danach auch empfohlen wird. Dabei wird angenommen, dass für jeden Schadensprozess, generalisierter Bauwerksteiltyp und jede Zustandsklasse genau eine Unterhaltsmassnahme möglich ist. Dies ist eine Vereinfachung, da in KUBA-MS für einen bestimmten Zustand und Schadensprozess mehrere Massnahmen zur Verfügung stehen können und die optimalen Massnahmenstrategien nicht für alle Zustandsklassen Massnahmen vorsehen.
Anmerkung	Da in KUBA-MS nicht mit probabilistischen, sondern mit diskreten Zustandswerten gerechnet wird, stellt die Methodik in diesem Punkt eine grössere Abweichung von der ursprünglichen Funktionsweise des Algorithmus dar. In KUBA-MS besteht die Möglichkeit, die Massnahmenstrategie über eine Kostenoptimierung zu bestimmen, welche direkt zu einer Massnahmenempfehlung führt. Dies ist mit der vorgestellten Methodik nicht möglich. Die Massnahmenstrategie muss gewählt werden und wenn eine Massnahmenempfehlung gewünscht ist, muss eine Entscheidung getroffen werden, wie diese bestimmt wird. Idealerweise sollte die definitive Wahl einer Unterhaltsmassnahme durch die probabilistischen Werte unterstützt werden.

Tabelle 43: Schritt 5 «Massnahmenstrategie» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen.

Schritt 6: Kostenschätzung

Input	Wahrscheinlichkeit der möglichen Unterhaltsmassnahmen zum Zeitpunkt t_i.
Benutzereingabe	-
Beschreibung	Berechnen pro Brücke und Periode, was die erwarteten Unterhaltsmassnahmenkosten sind. Berechnungsperiode: $p \in [1, \mathrm{P}]$ Brücke: $b \in [1, \mathrm{B}]$ Brücke bestehend aus den Bauwerksteilen k: $k \in [1, n]$ Bauwerksteil k mit Zustandsvektor: $X_{k,ZK}$ Massnahmenkostenvektor pro Ausmass und ZK für k: $V_{c,k,ZK}$ Ausmass von k a_k Kostenfaktoren «nicht kostenbestimmende BWT»: $f_{NichtKstBwt}$ «Installation»: $f_{Installation}$ «Verkehrsführung, Signalisation und Markierung»: $f_{Verkehr}$ «Honorare für Projektierung und Bauleitung»: $f_{Planung}$ «Honorare für Überprüfung»: $f_{\text{Überprüfung}}$ Dann berechne sich die $Betreiberkosten_{b,p}$ für Brücke b in Periode p: $$BetreiberkostenInitial_{b,p} = \sum_k (X_{k,ZK} \circ V_{c,k,ZK}) \cdot a_k \cdot (1 + f_{NichtKstBwt})$$ $$Baukosten_{b,p} = BetreiberkostenInitial_{b,p} \cdot (1 + f_{installation})$$ $$Betreiberkosten_{b,p} = Baukosten_{b,p} \cdot (1 + f_{Verkehr} + f_{Planung} + f_{\text{Überprüfung}})$$
Output	Kostenschätzung der empfohlene Unterhaltsmassnahmen.
Betrachtungszeitraum	t_i
Annahmen	$f_{NichtKstBwt}$ wird mit 0.2 angenommen. $f_{Installation}$, $f_{Verkehr}$ und $f_{Planung}$ wird mit 0.1 angenommen. $f_{\text{Überprüfung}}$ wird mit 0.05 angenommen.
Anmerkung	Es wird das Skalarprodukt der Vektoren berechnet. In Anhang «Unterhaltsmassnahmen: Einheitskosten und Erfolgsvektor» sind die Massnahmenkosten pro Einheit des Ausmasses und ZK bzw. Unterhaltsmassnahme gegeben. Die Berechnung der Kosten wurde aus (ASTRA, 2021a) übernommen, die Kostenfaktoren sind aber eigene Annahmen. Die Berechnung der Kosten für die Unterhaltsmassnahmen basiert auf der probabilistischen Zustandsklassenverteilung, in KUBA-MS basieren diese aber auf der diskreten Zustandsklasse.

Tabelle 44: Schritt 6 «Kostenschätzung» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen.

Schritt 7: Priorisierung

Input	Die empfohlene Unterhaltsmassnahme für jedes Bauwerksteil und das Sofortmassnahmenrisiko jeder Brückenanlage.
Benutzereingabe	Möglichkeit, die Priorisierung manuell zu ändern.
Beschreibung	Priorisierung der Unterhaltsmassnahmen anhand des Sofortmassnahmenrisikos der Brückenanlage.
Output	Unterhaltsmassnahmen mit einer Priorität.
Betrachtungszeitraum	t_i
Annahmen	-
Anmerkung	-

Tabelle 45: Schritt 7 «Priorisierung» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen.

Schritt 8: Ausgabe

Input	Für ausgewählte Brücken: • Empfohlene Unterhaltsmassnahmen pro Periode mit Kosten- und Priorisierung (Risikoabschätzungen).
Benutzereingabe	-
Beschreibung	-
Output	Bericht für Weiterverwendung durch Erhaltungsplaner. Informationen in jeder Periode über: • Zustandsprognose Bauwerksteile mit und ohne Berücksichtigung von Unterhaltsmassnahmen, • Wahrscheinlichkeit einer Unterhaltsmassnahme an einem Bauwerksteil, • Kostenschätzung der Unterhaltsmassnahmen für eine Brücke und • Priorisierung der Unterhaltsmassnahmen anhand des Sofortmassnahmenrisikos einer Brücke.
Betrachtungszeitraum	$t_0 \; bis \; t_{max}$
Annahmen	-
Anmerkung	Die Ergebnisse sollen dazu dienen, Erhaltungsplaner in ihren Entscheidungen zu unterstützen: • Schnell eine Übersicht darüber zu erhalten, welche Brücken einen Unterhaltsbedarf haben und • welches die risikobehafteten Brückenanlagen sind.

Tabelle 46: Schritt 8 «Ausgabe» zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen.

6.2.2 Risikoberechnung

Das Risiko, dass eine Sofortmassnahme (SM) notwendig wird (auch als Sofortmassnahmenrisiko bezeichnet), errechnet sich aus der Eintrittswahrscheinlichkeit multipliziert mit der monetären Auswirkung, wie in Gleichung (35) dargestellt.

$$R_{SM} = P_{SM} \cdot C_{SM}, \tag{35}$$

wobei

R_{SM} das Sofortmassnahmenrisiko ist,
P_{SM} die Wahrscheinlichkeit einer Sofortmassnahme ist und
C_{SM} die Kosten einer Sofortmassnahme sind.

Von Interesse sind jene Sofortmassnahmen, die auf Ereignisse folgen, welche die Leistung des Systems (Brücke) einschränken. Eine solche Einschränkung besteht vom Start des Ereignisses bis zur Beseitigung, d.h. bis die Sofortmassnahme abgeschlossen ist. Da es eine Vielzahl von «Basisereignissen» gibt, die zu einer Sofortmassnahme führen, muss die Komplexität der Risikoberechnung angemessen vereinfacht werden, um eine näherungsweise quantitative Lösung zu bestimmen. Für die Anwendungen in der Erhaltungsplanung von Infrastrukturbauwerken wie Brücken, werden zu diesem Zweck «Top-Ereignisse» definiert. Diese geben an, wie stark die Leistung einer Brücke im Falle eines Basisereignisses eingeschränkt wird. Die Auswirkung auf die Anspruchsgruppe kann als Funktion der Sofortmassnahmenkosten (Betreiber) und der Leistungseinschränkung (Nutzer) abgeschätzt werden. Die Risikoberechnung ist in dieser Form als Entscheidungshilfe für Managementfragen geeignet, wobei die relativen Ergebnisse zwischen den Brücken von Bedeutung sind und die absoluten Ergebnisse unbedeutend. Die Definition der Top-Ereignisse ist in Tabelle 47 gezeigt.

Definition Top-Ereignisse

Bezeichnung	Erklärung	Angenommene Dauer
Kleine Leistungseinschränkung	Geschwindigkeitsreduktion in eine oder beide Fahrtrichtungen auf 60 km/h, evtl. Nachtarbeit mit Kapazitätsreduktion, jedoch ohne Einfluss auf Reisezeit.	90 Tage
Grosse Leistungseinschränkung	Reduktion um einen Fahrstreifen in beide Richtungen, zudem eine Geschwindigkeitsreduktion auf 60 km/h.	180 Tage
Totale Leistungseinschränkung	Totalsperrung in beide Fahrtrichtungen.	360 Tage

Tabelle 47: Definition der Top-Ereignisse.

Die Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungen auf die Anspruchsgruppen eines Top-Ereignisses wird in den Kapiteln 6.2.2.1 und 6.2.2.2 erläutert. Bei den Anspruchsgruppen werden nur die Auswirkungen auf den Betreiber aufgrund der Kosten der Sofortmassnahmen und auf die Nutzer aufgrund der zusätzlichen Reisezeit berechnet. In weitergehenden Arbeiten könnte diese Betrachtung ausgeweitet werden in Bezug auf den Kostentyp oder die Anspruchsgruppen der direkt und indirekt betroffene Dritten, wie definiert in (Adey et al., 2020).

6.2.2.1 Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Top-Ereignisses

Ein Fehlerbaum erlaubt es Top-Ereignisse in einem Top-Down verfahren systematisch zu analysieren. Es wird die Frage gestellt «Welche Basisereignisse unter welchen Umständen können zu dem Top-Ereignis führen». Die Basisereignisse sind die Blätter des Baums, die über logische Verknüpfungen, sogenannte Gatter, zum Stamm führen, also dem Top-Ereignis (Andrews & Lunt, 2012). Solange die Wahrscheinlichkeit oder relative Häufigkeit bekannt ist der Basisereignisse kann eine quantitative Lösung gefunden werden, also die Wahrscheinlichkeit, dass das Top-Ereignis auftritt. Hier wird der zeitlichen Rahmen gewählt als die jährliche Wahrscheinlichkeit.

Die Fehlerbäume für jedes Top-Ereignis sind so aufgebaut, dass drei Hauptursachen (Zwischenereignisse) zur Leistungsminderung führen können:

- Auffinden von **alarmierenden sichtbaren Schäden**, die graduellen Verfallsprozessen zugrunde liegen und eine Sofortmassnahme erfordern.
- Plötzlich auftretende **anthropogene und natürliche Ereignisse**, welche die Brücke beschädigen und eine Sofortmassnahme auslösen.
- **Nicht ausreichender statischer Nachweis**, wodurch die Sicherheit nicht mehr gewährleistet ist. Eine Sofortmassnahme ist erforderlich.

Die beschriebene Grundstruktur für die Fehlerbäume ist in Abbildung 71 angedeutet, sowie die verwendeten Symbole in einem Fehlerbaum. Die Berechnung der Top-Ereignisse findet über Logik Gatter von den Basisereignissen aus statt. Dabei berechnet sich die UND-Funktion und die ODER-Funktion wie in Tabelle 48 gezeigt, welche alle Symbole zusätzlich erklärt.

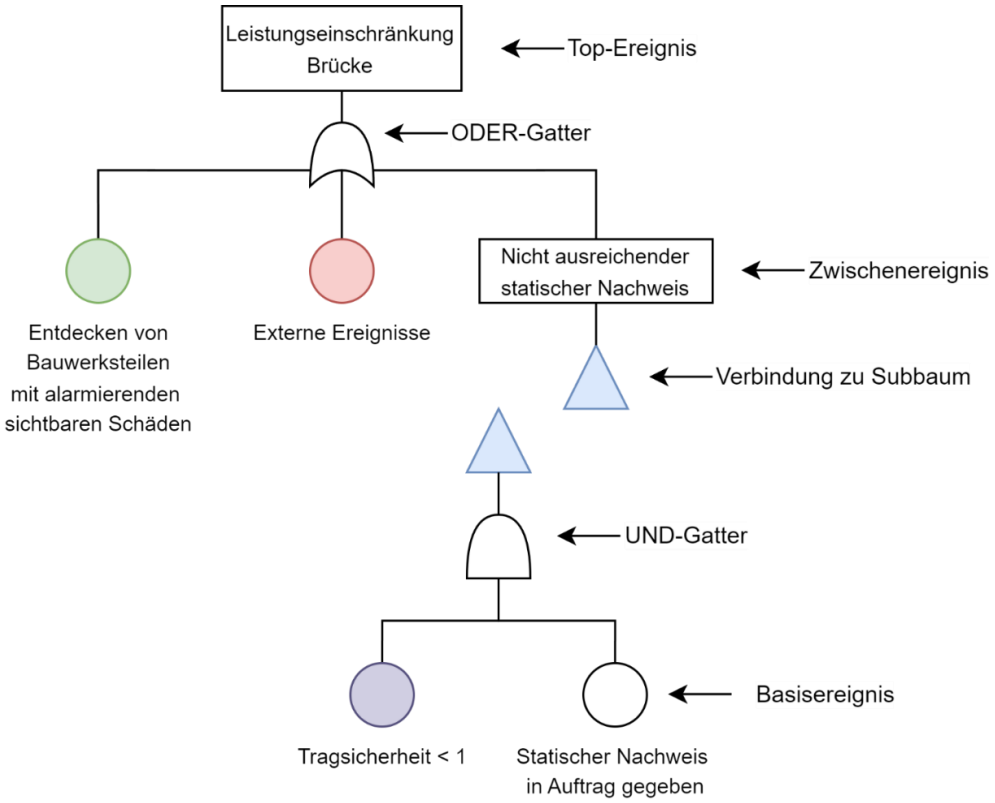


Abbildung 71: Beispiel eines Fehlerbaums.

Erklärung Symbole Fehlerbaum

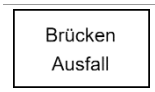
Symbol	Name	Beschreibung
	Top und Zwischenereignis	Beschreibung eines Ereignisses auf Teil- oder Systemebene.
	Basisereignis	Ereignis, für das die Wahrscheinlichkeit bekannt ist oder abgeschätzt wird.
	Verbindungselement	Verbindung zu einem Teilsystem eines Fehlerbaums. Hilft Lesbarkeit und Darstellung zu verbessern.
	UND	Logikgatter das für eine UND-Funktion steht: $P_E = \prod_i P_i \ , \ \forall i \in \ Ereignisse \ verbunden \ durch \ UND - Gatter$ und $P_i = Wahrscheinlichkeit \ von \ Ereignis \ i$
	ODER	Logikgatter das für eine ODER-Funktion steht: $P_E = 1 - \prod_i (1 - P_i) \ , \ \forall i \in \ Ereignisse \ des \ ODER - Gatters$ und $P_i = Wahrscheinlichkeit \ von \ Ereignis \ i$

Tabelle 48: Erklärung der Symbole eines Fehlerbaums (Andrews & Lunt, 2012).

Aufbau der Fehlerbäume

Die Struktur der Fehlerbäume mit den drei Hauptästen «alarmierende sichtbare Schäden», «Anthropogene und natürliche Ereignisse» und «unzureichender statischer Nachweis» wurde gewählt, um die Denkweise von Ingenieuren oder speziell von Erhaltungsplanern widerzuspiegeln.

Wie bei der Bemessung eines Tragwerks bekannt, sind die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten. Das heisst, dass das Tragwerk (bestehend aus Bauwerksteilen) den Einwirkungen während der Ausführung und der Nutzung standhalten muss (SIA, 2013). Der Ast «sichtbaren alarmierenden Schäden» repräsentiert also sinngemäss diesen Widerstand. Die Einflussgrösse auf die Wahrscheinlichkeit der Basisereignisse, die eine Sofortmassnahme auslösen können, ist der sich sukzessive verschlechternde Zustand als Indikator für die Widerstandsminderung, der bei den Inspektionen festgestellt und mit «Schritt 3: Zustandsprognose» für die Zukunft prognostiziert wird. Dabei wird abgeschätzt, wie sich die Eintrittswahrscheinlichkeit der Basisereignisse über den Prognosehorizont verändert, solange ein Zustand vorliegt, der schlechter als der optimale Zustand der Massnahmenstrategie ist. Dieser Ast sagt jedoch nicht aus, dass die Tragsicherheit zu irgendeinem Zeitpunkt nicht mehr gegeben ist, denn der Zustand dient hier nur als Indikator für den abnehmenden Widerstand und die damit verbundenen notwendigen Massnahmen gemäss Strategie.

Der Ast «Anthropogene und natürliche Ereignisse» repräsentiert die Sofortmassnahmen, die aufgrund von Basisereignissen aus Naturgefahren sowie anthropogenen Einflüssen notwendig sind.

Der Ast «unzureichender statischer Nachweis» deckt ab, dass nach einer vertieften Untersuchung auch Sofortmassnahmen eingeleitet werden können. Auslöser hierfür sind beispielsweise die Entdeckung unerwarteter Schadensbilder, unerwartete Verkehrszunahmen, Normänderungen und Wünsche des Erhaltungsplaners. Letztendlich muss aber bei der vertieften Untersuchung ein Tragsicherheitsmangel festgestellt werden.

Aufbauen auf den präsentierten Überlegungen wurden die Fehlerbäume definiert und sind dargestellt in Abbildung 72, Abbildung 73 und Abbildung 74 für jeweils die kleine, grosse und totale Leistungseinschränkung.

Die Entscheidungsbäume könnten detaillierter ausgearbeitet werden, was jedoch mehr Aufwand bedeuten kann – beispielsweise durch zusätzliche Datenerhebungen und -auswertungen. Ob dies sinnvoll ist, hängt von der benötigten Detailtiefe der Erhaltungsplaner ab.

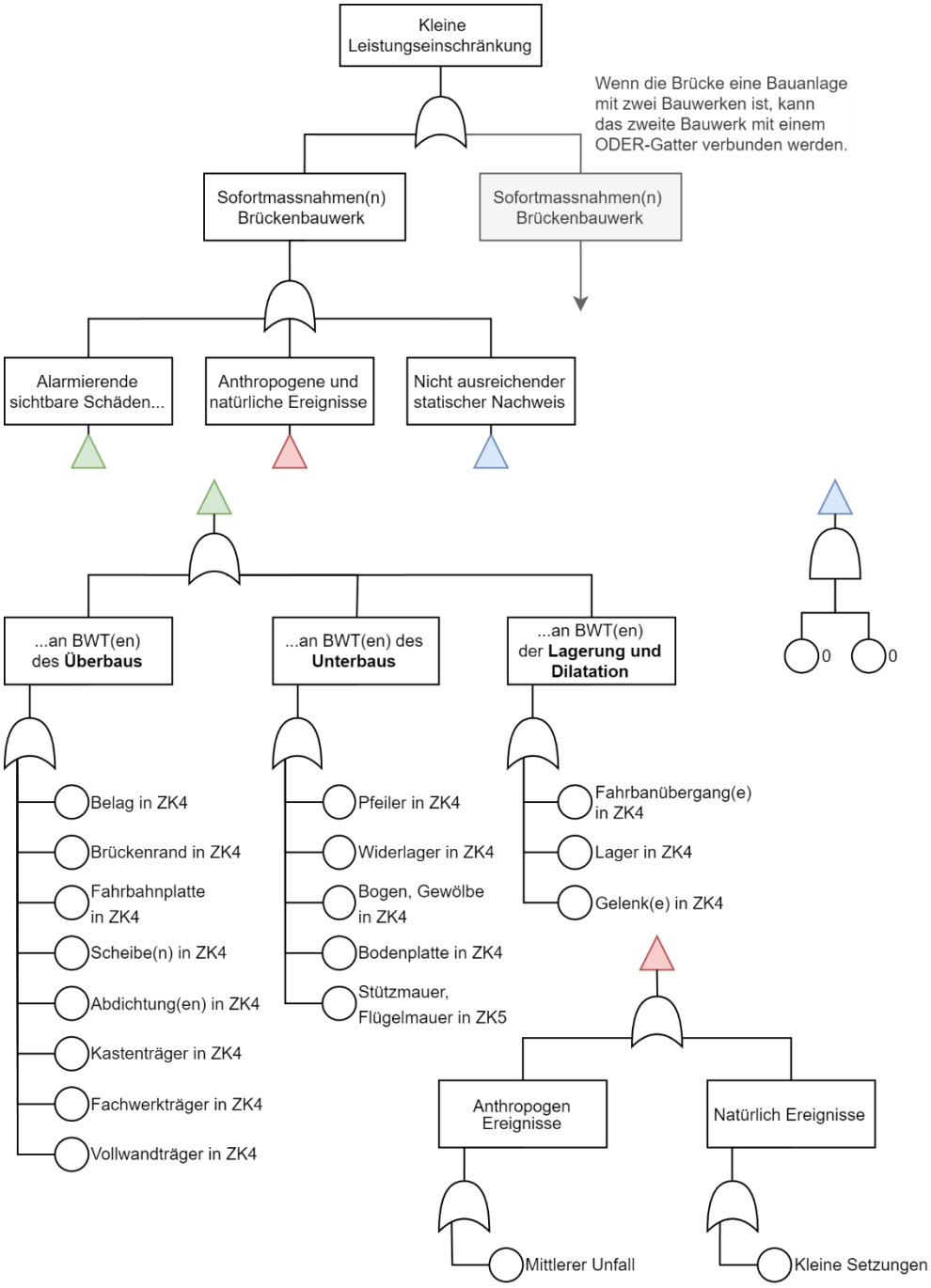


Abbildung 72: Fehlerbaum für die kleine Leistungseinschränkung.

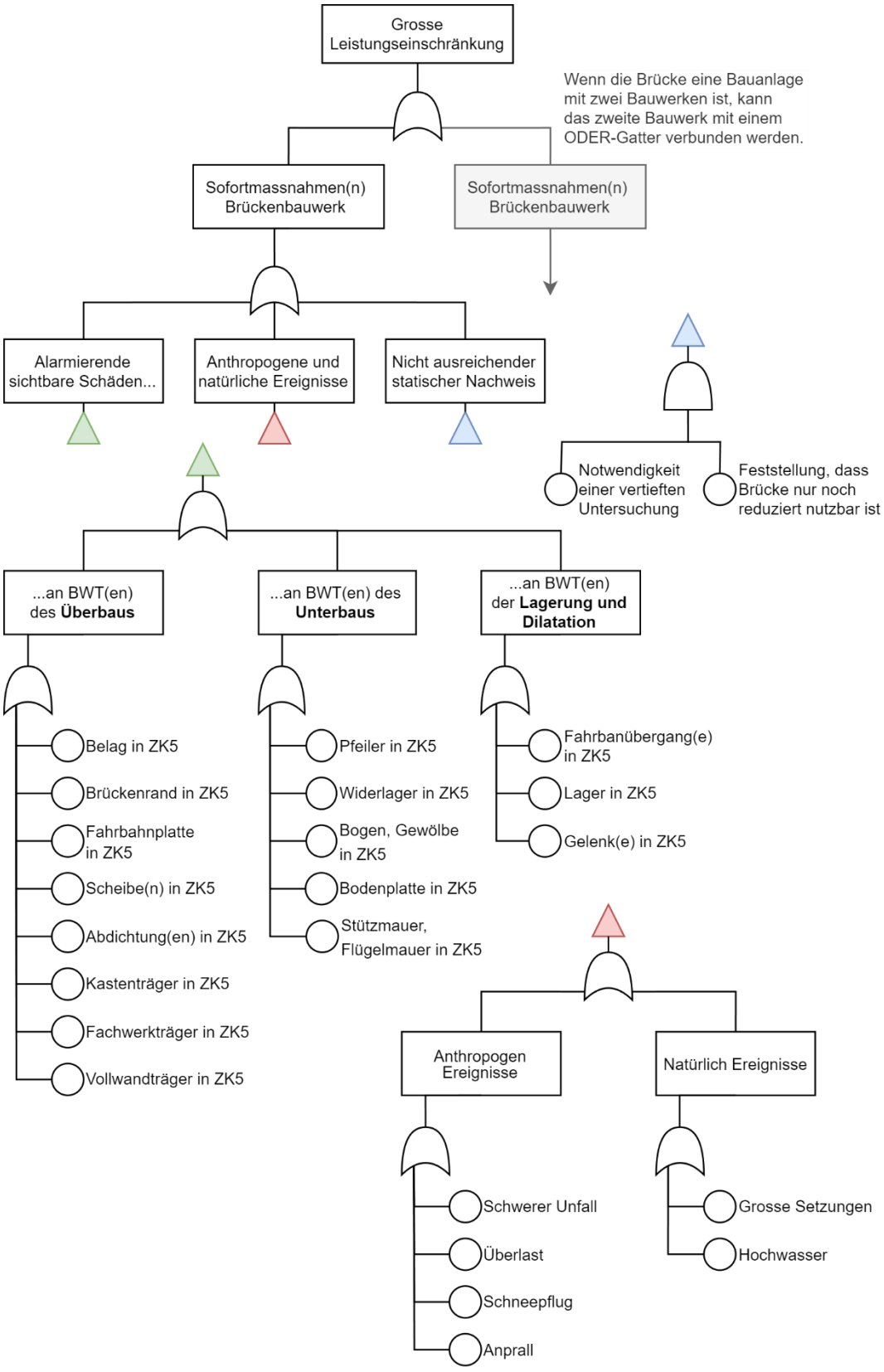


Abbildung 73: Fehlerbaum für die grosse Leistungseinschränkung.

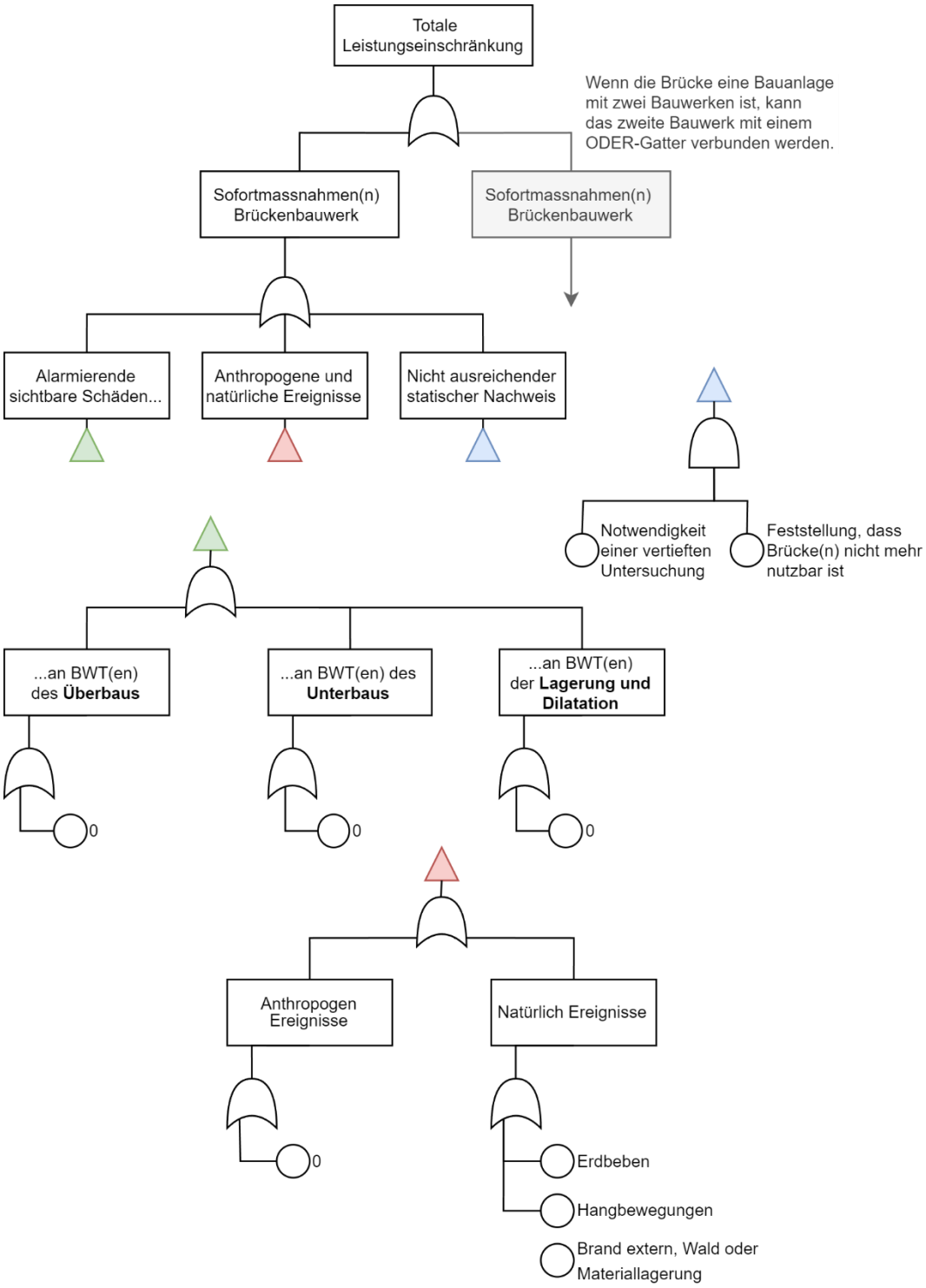


Abbildung 74: Fehlerbaum für die totale Leistungseinschränkung.

Eintrittswahrscheinlichkeit der Basisereignisse

Tabelle 50 zeigt die zu berücksichtigten Basisereignisse und was die angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeiten sind. Ereignis A tritt mit der Wahrscheinlichkeit $P(A) = \frac{Anzahl\ Fälle\ wo\ das\ Ereignis\ eintritt}{Anzahl\ Fälle\ in\ dem\ das\ Ereignis\ auftreten\ kann}$ auf. Wenn eine Quelle existiert oder eine Herleitung von einem bekannten Wert möglich ist, wird dieser verwendet. Für Ereignisse ohne Quelle und wo eine Herleitung nicht möglich ist, wird das Ereignis einem Standartwert zugeordnet, wie in Tabelle 49 definiert. Die Zuordnung erfolgt nach eigenen Einschätzungen. Es ist nicht Ziel die genauen Werte zu bestimmen, sondern die richtig abzustufen und so die berechnete Leistungseinschränkung verschiedener Brükken vergleichbar zu gestalten. Auch unterliegen all diese Werte einer Streuung und Einflussfaktoren. Es wird aber keine detaillierte Untersuchung dieser Sachverhalte vorgenommen aber an gewissen Stellen darauf hingewiesen, wie eine detailliertere Bestimmung durchgeführt werden kann. In manchen Fällen handelt es sich um bedingte Wahrscheinlichkeiten. Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten sind jedoch immer die, die für die Gefahr bestehen.

Standartwerte der Eintrittswahrscheinlichkeiten

Qualitative Wahrscheinlichkeit (Wkt.)	Quantitative Wahrscheinlichkeit
Sehr hoch	10^{-2}
Hoch	10^{-4}
Mittel	10^{-6}
Gering	10^{-8}
Sehr gering	10^{-10}

Tabelle 49: Standartwerte für die Eintrittswahrscheinlichkeit der Basisereignisse.

Angenommene Eintrittswahrscheinlichkeiten

Basisereignis	Eintrittswahrscheinlichkeit	Beschreibung und Begründung
Zustand (BWT in ZK X)	$P_{BWT\ in\ ZK\ X} \cdot P_{f\ in\ \mathrm{ZK}\ X}$	Annahme: Der Anteil des BWT in der Zustandsklasse X, multipliziert mit der Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerksteils in dieser Zustandsklasse, ergibt die Wahrscheinlichkeit des Basisereignisses, dass aufgrund eines bestimmten Zustands eine Sofortmassnahme notwendig ist. Die Zustandsklasse selbst wird somit als Gefahr betrachtet. Die Versagenswahrscheinlichkeit $P_{f\ in\ \mathrm{ZK}\ X}$ wird mit den Werten aus Tabelle 49 gewählt: • $P_{f\ in\ ZK\ 4}$ mit hoher und • $P_{f\ in\ ZK\ 5}$ mit sehr hoher Wkt.
Mittlerer Unfall	$\frac{1.6 \cdot 10^{-8}}{km} \cdot Brückenlänge\ in\ km$	Unfall ohne Feuer oder Explosion, wobei die Infrastruktur Schaden nimmt, dass Massnahmen durchgeführt werden müssen. Annahme: Jeder 10. Unfall mit Verletzten erfordert eine Sofortmassnahme. Gerundete Verletztenrate aus (VSS, 2013) von $16.32 \cdot 10^{-8}$ für 3-spurige Autobahn auf $16.00 \cdot 10^{-8}$. Für die 2-spurige Autobahn beträgt die Verletztenrate $15.74 \cdot 10^{-8}$.

		Wobei $P_{Unfall\ pro\ y} = 1 - e^{-\lambda_{Verletztenrate} \cdot 1y} \approx \lambda, für\ \lambda < 10^{-4}$ und Verletztenrate die Einheit $[\frac{Verletzte}{Fz \cdot km \cdot y}]$ hat.
Schwerer Unfall	$\frac{0.16 \cdot 10^{-8}}{km} \cdot Brückenlänge\ in\ km$	Unfall mit Feuer oder Explosion. Annahme: Jeder 100. Unfall mit Verletzten erfordert eine Sofortmassnahme. Gerundete Verletztenrate aus (VSS, 2013) von $16.32 \cdot 10^{-8}$ für 3-spurige Autobahn auf $16.00 \cdot 10^{-8}$. Für die 2-spurige Autobahn beträgt die Verletztenrate $15.74 \cdot 10^{-8}$.
Schneepflug	10^{-6}	Schneeräumung führt zu Beschädigung eines Fahrbahnübergangs Mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit. Annahme für Teststrecke: $\frac{0.1\ Vorfälle\ pro\ Jahr\ auf\ ASTRA\ Brücken}{20d\ Neuschnee\ pro\ Jahr \cdot 1440\ ASTRA\ Brücken} \approx 10^{-6}$, wobei Neuschneetage stark variieren in der Schweiz. In höheren Lagen Wkt. mit 10^{-5} wählen.
Anprall	$10^{-4}, LP\ nicht\ erfüllt\ ohne\ Sign.$ $10^{-6}, LP\ nicht\ erfüllt\ mit\ Sign.$ $10^{-8}, LP\ erfüllt$	Anprall eines Fahrzeugs an vertikal oder horizontal tragende Bauwerksteile, wie beispielsweise eine Stütze oder einen Hohlkastenträger. Annahme: Die Wahl der Eintrittswahrscheinlichkeit erfolgt anhand des Lichtraumprofils (LP) (VSS, 2019b) und ob die entsprechende vorausgehende Signalisation vorhanden ist. Dabei werden die Werte aus Tabelle 49 herangezogen. • LP nicht erfüllt und • ohne Signalisation: Hohe Wkt. • mit Signalisation: Mittlere Wkt. • LP erfüllt: Geringe Wkt.
Kleine Setzungen	$10^{-6}, für\ Setzungen < 5cm$	Setzungen, die ungeplant auftreten. Baugrundqualität wird nicht unterschieden, es wird angenommen, die nötigen Massnahmen wurden bei der Ausführung getroffen, es verbleibt eine globale Eintrittswahrscheinlichkeit angenommen mit einer mittleren Wkt. für Setzungen $< 5cm$.
Grosse Setzungen	$10^{-8}, für\ Setzungen \geq 5cm$	Setzungen, die ungeplant auftreten. Baugrundqualität wird nicht unterschieden, es wird angenommen, die nötigen Massnahmen wurden bei der Planung getroffen, es verbleibt eine globale Eintrittswahrscheinlichkeit angenommen mit einer geringen Wkt. für Setzungen $\geq 5cm$.
Erdrutsch	$10^{-4}, für\ Neigungen > 60°$ $10^{-6}, für\ Neigungen\ 45° - 60°$ $10^{-8}, für\ Neigungen\ 30° - 45°$ $10^{-10}, für\ Neigungen\ 15° - 30°$	Erdrutsch, auf das Bauwerk treffend oder Materialverlust bei Stützkonstruktion (Stützen, Widerlager): Die Annahme ist, dass die steilste Gefahrenstelle die Eintrittswahrscheinlichkeit beeinflusst. Dabei wird für Steigungen • $> 60°$ eine hohe, • $45° - 60°$ eine mittlere,

		• $30° - 45°$ eine geringe und • $15° - 30°$ eine sehr geringer Wkt. angenommen.
Überlast	10^{-6}	Überlast, die beim Schwerverkehr auftritt oder wegen Sondertransporten und Schaden verursacht, z.B. am Lager, so dass eine Sofortmassnahme notwendig ist. Annahme: Mittlere Wkt. Wenn es im Jahr ein Schwerverkehrsanteil von 70'000 LKWs gibt (eher konservativ), alle 10 Jahre ein Schaden auftritt an einer Brücke unter diesem Verkehr, dann berechnet sich die ungefähre Eintrittswahrscheinlichkeit folgendermassen: $\frac{0.1}{70000} \approx 10^{-6}$.
Schäden durch Hochwasser	$10^{-4}, Alles\ betroffen$ $10^{-6}, Nur\ Stütze(n)\ betroffen$	Schäden am Bauwerk wegen Stützmaterial Abtrag, Überflutete Fahrbahn und Geschwemmsel oder Geschiebetransport. Annahme: Unterschieden wird zwischen verschiedene Situation, für welche ein Eintrittswahrscheinlichkeitswert angenommen wird. • Stütze und Überbau wären betroffen von einem HQ 300: Hohe Wkt. • Mind. 1x Stütze von Hochwasser betroffen, sonst keine Elemente: Mittlere Wkt.
Beschädigung durch eine externe Hitzequelle	$10^{-6}, Objekte\ und\ Wald$ $10^{-8}, Objekte\ oder\ Wald$	Möglichkeit von Brand oder Explosion die zu Schädigung der Brücke führt von «ausserhalb». Beispielsweise ein Wald, Strasse mit regelmässigem Schwerverkehr, Lagerung von Gütern unterhalb der Brücke etc. Annahme: • Abstellen von Fahrzeugen, Anhängern, landwirtschaftliches Material und das Vorhandensein von Wald in unmittelbarer Nähe der Brücke: Mittlere Wkt. • Abstellen von Fahrzeugen, Anhängern, Material oder das Vorhandensein von Wald in unmittelbarer Nähe der Brücke: Geringe Wkt.
Erdbeben	$5 \cdot 10^{-5}$	Ein Erdbeben der Stärke 6 oder höher, welches Brücken schadet, sodass eine Sofortmassnahme nötig ist. Annahme: Stärke 6 Erdbeben treten alle 50 bis 150 Jahre auf und können grundsätzlich überall auftreten (SED, 2024). Wenn davon ausgegangen wird, dass die Wahrscheinlichkeit eines Erdbebens gleichmässig verteilt ist und das Ereignis etwa 0.5 % der Landesfläche betrifft, dann tritt das Ereignis mit folgender Wahrscheinlichkeit auf: $\frac{1}{100} \cdot \frac{1}{200} = 5 \cdot 10^{-5}$.
Notwendigkeit einer vertieften	10^{-4}	Durchführung einer vertieften Untersuchung wegen Normanpassung, unerwarteten Verkehrszunahme, neues Wissen in den Regeln der Baukunde oder Intuition der Erhaltungsplaner.

Untersuchung		Annahme: Hohe Wkt.
Tragsicherheitsmangel nach vertiefter Untersuchung	Brücke reduziert nutzbar: 10^{-4} Brücke nicht mehr nutzbar: 10^{-6}	Das bei einer vertieften Untersuchung gefunden wird, dass die Brücke nur noch reduziert oder gar nicht mehr benützt werden darf. Annahme: • Reduziert nutzbar mit einer hohen Wkt. • Nicht mehr nutzbar mit einer mittlere Wkt.

Tabelle 50: Auflistung aller angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeiten der Basisereignisse.

Das Basisereignis «Tragsicherheitsmangel nach vertiefter Untersuchung», das mit einem UND-Gatter mit der «Notwendigkeit einer vertieften Untersuchung» verbunden ist, sollte mit äusserster Achtsamkeit umgesetzt werden, da in diesen Ereignissen menschliche Fehler im Fokus stehen. Trotzdem ist dieses Basisereignis nicht zu vernachlässigen, da es effektiv existiert. Hajdin & Diederich (2024) gehen in ihrer wissenschaftlichen Arbeit der Frage nach, welche ASTRA-Brücken eine vertiefte Untersuchung benötigen, weil neben der Normkonformität auch das probabilistische Screening des Reliabilitätsindex nicht erfüllt wird. Ergebnisse aus solchen Arbeiten können dazu beitragen, dass auch Sofortmassnahmenrisiken ohne Veränderung des Zustands oder ohne natürliche bzw. anthropogene Ereignisse quantifiziert werden können.

6.2.2.2 Risikoberechnung im Detail

Wie in Gleichung (35) gezeigt, braucht es für die Risikoberechnung die Eintrittswahrscheinlichkeit, die im vorhergehenden Kapitel ausführlich besprochen wurde, sowie die Auswirkungen in monetärer Form. Die Auswirkung auf den Betreiber und die Nutzer ergeben sich als Resultat, wenn das Top-Ereignis eintritt. Für die Berechnung der Auswirkung auf die Nutzer wird vereinfacht nur die zusätzliche Reisezeit der Nutzer wegen der Durchführung einer Sofortmassnahme berücksichtigt. Es wird also für jedes Top-Ereignis eine Leistungseinschränkung angenommen, von welcher die Kosten der zusätzlichen Reisezeit hergeleitet werden können.

Für die Berechnung der Auswirkungen auf den Betreiber muss für jedes Top-Ereignis auch eine Annahme über die Kosten der Sofortmassnahmen getroffen werden. Leider ist nur für ein Basisereignis bekannt, wie hoch diese Kosten sind, nicht aber für das Top-Ereignis. Daher muss für jedes Top-Ereignis eine ungefähre Schätzung über die Kosten der Sofortmassnahmen getroffen werden. Da das berechnete Risiko nicht den Anspruch auf absolute Exaktheit hat, sondern die Vergleichbarkeit der Brücken ermöglichen soll, ist eine ungefähre Schätzung ausreichend. Dies bedeutet, dass auf der höchsten Ebene, auf der die Analyse durchgeführt wird, Brücken mit einer grösseren Ausmassfläche für den Betreiber teurere Sofortmassnahmen nach dem Eintreten eines Basisereignisses auslösen.

Aufbauend auf Gleichung (35) wird die Risikoberechnung für das vorgestellte Vorgehen in Gleichung (36) präzisiert.

$$R_{SM} = \mathrm{R}_{SM,Nutzer} + R_{SM,Betreiber} = \sum_{E} P_E \cdot (C_{E,Nutzer} + C_{E,Betreiber}), \tag{36}$$

wobei

E	das Top-Ereignis ist,
R_{SM}	das Sofortmassnahmenrisiko ist,
$R_{SM,Nutzer}$	das Nutzerrisiko aufgrund einer Sofortmassnahme ist,
$R_{SM,Betreiber}$	das Betreiberrisiko aufgrund einer Sofortmassnahme ist,
P_E	die Eintrittswahrscheinlichkeit des Top-Ereignisses E ist,
$C_{E,Nutzer}$	die Nutzerkosten aufgrund des Top-Ereignisses E sind und
$C_{E,Betreiber}$	die Betreiberkosten aufgrund des Top-Ereignisses E sind.

Betreiberkosten

Für die Betreiberkosten wird jeweils ein Prozentsatz der gesamten Ersatzkosten der Brücke genommen. Für die kleine, grosse und totale Leistungsreduktion wird jeweils ein Anteil von 10 %, 25 % und 50 % angenommen:

$$C_{E,BetreiberInit} = \sum_i \left(A_i \cdot uc_{i,Ersatz}\right) \cdot f_E, \tag{37}$$

$$C_{E,Baukosten} = C_{E,BetreiberInit}(1 + f_{NichtKstBwt})(1 + f_{installation}), \tag{38}$$

$$C_{E,Betreiber} = C_{E,Baukosten}\left(1 + f_{Verkehr} + f_{Planung} + f_{\text{Überprüfung}}\right), \tag{39}$$

wobei

$C_{E,BetreiberInit}$	die initiale Betreiberkosten aufgrund des Top-Ereignisses E sind,
$C_{E,Baukosten}$	die initialen Baukosten aufgrund des Top-Ereignisses E sind,
$C_{E,Betreiber}$	die Betreiberkosten aufgrund des Top-Ereignisses E sind,
$i \in I$	die kostenbestimmenden Bauwerksteile der Brücke sind,
A_i	das Gesamtausmass von Bauwerksteil i ist,
$uc_{i,Ersatz}$	die Einheitskosten für einen Ersatz von Bauwerksteil i sind,
$f_E \in \{0.1, 0.25, 0.5\}$	der Kostenminderungsfaktor der Top-Ereignisse ist,
$f_{NichtKstBwt}$	der Kostenfaktor für «nicht kostenbestimmende BWT» ist,
$f_{Installation}$	der Kostenfaktor für die «Installation» ist,
$f_{Verkehr}$	der Kostenfaktor für die «Verkehrsführung, Signalisation und Markierung» ist,
$f_{Planung}$	der Kostenfaktor für die «Honorare für Projektierung und Bauleitung» ist und
$f_{\text{Überprüfung}}$	der Kostenfaktor für die «Honorare für Überprüfung» ist.

Die Einheitskosten für die Unterhaltsmassnahme Ersatz $uc_{i,Ersatz}$ ist eine Funktion des primären Schadenprozesses und des generalisierten Bauwerkteiltyps (vgl. Anhang «Unterhaltsmassnahmen: Einheitskosten und Erfolgsvektor»). Die Kostenfaktoren werden wie in Schritt 6 des Algorithmus beschrieben übernommen. Die Wahl dieser kostenmindernden Faktoren ist sehr grob und muss bei der Umsetzung der Methodik weiter untersucht werden, oder es muss eine andere Möglichkeit gefunden werden, die Kosten des Betreibers zu berücksichtigen. Die Zahlen spiegeln lediglich die Tatsache wider, dass bei schwereren Basisereignissen auch mehr geschädigte Brückensubstanz zu erwarten ist.

Nutzerkosten

Die Berechnung der Nutzerkosten für die drei Top-Ereignisse basiert allein auf der zusätzlichen Reisezeit, die den Nutzern durch die Störung auferlegt wird.[8] Kleine Störungen wie Geschwindigkeits- oder Kapazitätsreduktion (Top-Ereignisse kleine und grosse Leistungseinschränkung) haben nach (Erath, 2011a) vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die Routenwahl. Daher können diese Störungen mit mesoskopischen und mikroskopischen Verkehrsmodellen analysiert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die vereinfachte Analyse mit Warteschlangenmodellen, bei denen nur die Geschwindigkeitsreduktion eine Rolle spielt. Wenn jedoch die ganze Brücke gesperrt wird (totale Leistungseinschränkung), führt dies zwangsläufig zu einer Routenänderung. Mithilfe einer makroskopischen Simulation, bei der das gesamte Verkehrsnetz in ein Wardrop-Gleichgewicht überführt wird, kann die daraus resultierende zusätzliche Reisezeit ermittelt werden. Die simultane Anwendung von mesoskopischen und makroskopischen Verkehrsmodellen ist nicht zu empfehlen, da die zugrunde liegenden Abstraktionsniveaus zu unterschiedlich sind und dies zu einer unnötigen Komplexität führt, die in keinem angemessenen Verhältnis zur Simplizität der Methodik steht.

In der Folge wird für die Ermittlung der Nutzerkosten auf die Dissertationsarbeit von A. Erath mit dem Titel «Vulnerability Assessment of Road Transport Infrastructure" (Erath, 2011a) zurückgegriffen. Für den Fall einer länger andauernden totalen Leistungseinschränkung wurden unter anderem die indirekten Ausfallsfolgen einer Nationalstrassenstrecke unter Berücksichtigung alternativer Verkehrsträger sowie Reisezielanpassungen berechnet. Grundlage für die Berechnung war (1) das Nationale Personenverkehrsmodel aus dem Jahr 2010, für die Reisezeitdifferenz, und (2) eine «Logsum», welche die Konsumentenrente misst im Kontext von «logit choice models». Die relevanten Ergebnisse für die Teststrecke aus der genannten Dissertation sind in Abbildung 75 gezeigt.

Aufgrund der Ergebnisse in Abbildung 75 wird die Abschätzung der Nutzerkosten pro Tag für diese Arbeit gemacht. Somit ist bekannt was die Nutzerkosten/Tag sind für die totale Leistungseinschränkung aber für die anderen Top-Ereignisse müssen annahmen getroffen werden. Dazu werden die Auswirkungskosten in Kategorien umgewandelt (in der Abbildung mit Blau beschrieben), damit diese Kategorien für alle Top-Ereignisse angewendet werden können. Damit ist der Standort der Brücke ausschlaggebend für die Auswirkungskategorie und diese gibt vor, was die anzuwendenden Nutzerkosten sind. Die Nutzerkosten für die kleine und grosse Leistungseinschränkung sind dabei immer kleiner gewählt worden, ca. 1/2 so gross wie für das nächstgrössere Top-Ereignis. Somit sind die Nutzerkosten mithilfe der Abbildung 75 und Tabelle 51 zu wählen.

[8] Bei einer Umsetzung im ASTRA wäre zu prüfen, ob andere Nutzerkosten oder Kosten für Dritte einen nennenswerten Einfluss hätten.

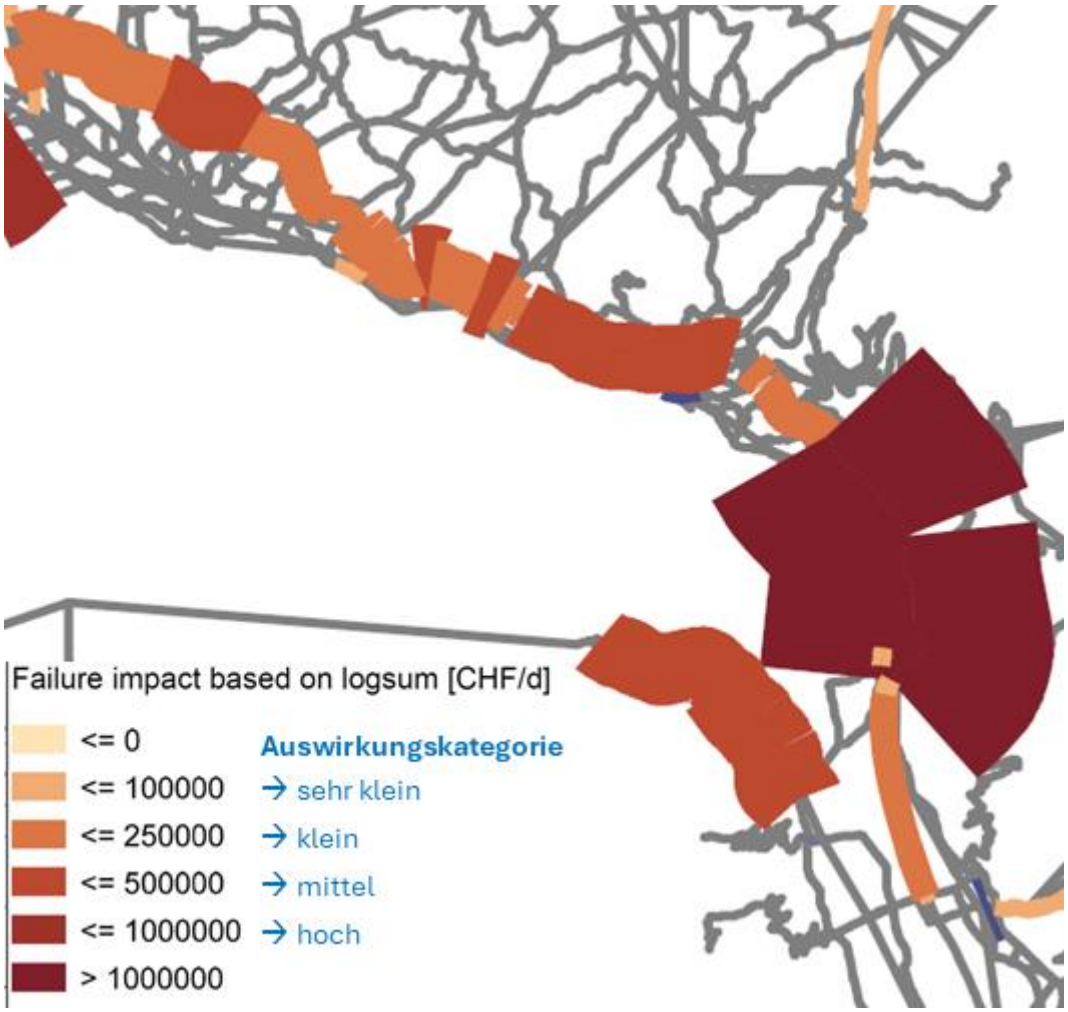


Abbildung 75: Ausschnitt aus der Abbildung zur Ausfallsauswirkung auf der Nationalstrasse (Erath, 2011a, Abbildung 7.9).

Nutzerkosten pro Tag [CHF/d]

Leistungseinschränkung	Auswirkungskategorien			
	sehr klein	**klein**	**mittel**	**hoch**
kleine	25'000	50'000	100'000	250'000
grosse	50'000	100'000	250'000	500'000
totale	100'000	250'000	500'000	1'000'000

Tabelle 51: Nutzerkosten pro Tag [CHF/d] für jede Auswirkungskategorie und Top-Ereignis.

6.2.2.3 Delta-Risiko

Da Brücken sich in der Wahrscheinlichkeit und Auswirkung einer Leistungseinschränkung, also in Bezug auf das Risiko, stark unterscheiden, ist es unzureichend, für Entscheidungen nur das totale Risiko zu berücksichtigen. Darum wird empfohlen, das Delta-Risiko zu berechnen. Dieses beschreibt das Verhältnis des totalen Risikos zu einem ungewollten Risikogrenzwert (GW). Für diesen Bericht wird der Risikogrenzwert für alle Brücken gleich berechnet, indem für alle Bauwerksteile einer Brücke angenommen wird, dass die Wahrscheinlichkeit, in der Zustandsklasse 4 bzw. 5 zu sein, jeweils 50 % beträgt. Das ist keine fundierte Annahme und muss in jedem Fall durch Experten

bestimmt werden. So kann verglichen werden, wie viel Prozent des ungewollten Risikogrenzwertes bereits erreicht sind.

$$\mathrm{R}_{Delta} = \frac{R_{SM}}{R_{GW}} \tag{40}$$

wobei
$R_{GW} = R_{kLe} + R_{gLe} + R_{tLe}$[9] und
die Zustandsvektoren der Bauwerksteile $X_{k,ZK}$ die Form
$X_{k,ZK} = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.5 \quad 0.5)$ haben.

6.2.3 Fallstudie

Die Anwendung der Methodik wird anhand einer Fallstudie demonstriert. Dafür wird die „Teststrecke" von Villars-Sainte-Croix nach Rennaz mit dem dazugehörigen Brükkenportfolio genutzt. Eine Übersicht über die Teststrecke, das Brückenportfolio und die *Pont sur La Sorge* (09P006) ist in Kapitel 3 zu finden. Die *Pont sur La Sorge* dient in der Fallstudie als Beispiel, an dem der gezeigte Algorithmus Schritt für Schritt durchlaufen wird. Es wird dargestellt, welche Erhaltungsmassnahmen im Betrachtungszeitraum als Diskussionsgrundlage vorgesehen sind und welches Risiko besteht, wenn keine Massnahmen ergriffen werden. Weiterführende Ergebnisse können dem MINERVA-Datensatz entnommen werden. Bei der Anwendung des Algorithmus wird stets davon ausgegangen, dass dieser am Stichtag, dem 01.06.2024, angewendet wurde und sich alle Ergebnisse auf diesen Stichtag beziehen.

Schritt 1: Auswahl [Teil]netz

Output nach Schritt 1, sind die Rohdaten aus KUBA. Beide Bauwerke (*droit* und *gauche*) haben die gleichen kostenbestimmenden Bauwerksteile und in Kapitel 3 sind diese mit ausgewählten Dateneinträgen aufgelistet. Diese Bauwerksteile bilden die Grundlage für die weiteren Berechnungen der *Pont sur La Sorge*.

Schritt 2 und 3: Datenaufbereitung und Zustandsprognose

Die Schritte 2 und 3, also die Datenbereinigung und die Abschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Zustands der Bauwerksteile, wurden bereits in Kapitel 5 vorgestellt. In diesem Fallbeispiel werden exemplarisch die Ergebnisse dieser beiden Methoden für die Bauwerksteile der *Pont sur La Sorge* gezeigt. Abbildung 76 und Abbildung 77 zeigen die Abschätzung der Zustände für die Planungsperioden 0 bis 4: Periode 0 (P0) zeigt den abgeschätzten gegenwärtigen Zustand im Jahr 2024, Periode 1 (P1) bis Periode 4 (P4) zeigen die abgeschätzten zukünftigen Zustände bis ins Jahr 2045 mit einer Planungsperiodenlänge p von fünf Jahren zum Ende einer Periode, d. h. in den Jahren 2030, 2035, 2040 und 2045.

Ab Schritt 3 beginnt der zyklische Teil der Methodik, in dem jeweils eine Periode betrachtet wird. Die vorhergehenden Schritte sind entweder Schritt 2 oder Schritt 7: Nach Anwendung von Schritt 7 können für die Folgeperiode Unterhaltsmassnahmen empfohlen werden. So kann die Zustandsprognose mit oder ohne Berücksichtigung dieser Unterhaltsmassnahmen berechnet werden. Hier wird nur die Zustandsprognose ohne

[9] kLe = kleine Leistungseinschränkung, gLe = grosse Leistungseinschränkung, tLe= totale Leistungseinschränkung

Berücksichtigung von Unterhaltsmassnahmen gezeigt, da diese für die Berechnung des Sofortmassnahmenrisikos wichtig ist.

Wie dem Kapitel 3 zu entnehmen, wurden für die Berechnung die Verfallsmatrizen der folgenden Schadensprozesse verwendet: 10 «Korrosion im Stahlbeton», 60 «Schäden an Fahrbahnübergängen», 70 «Schäden an Lagern», 80 «Schäden am Belag», 90 «Schäden an der Abdichtung». Da die Bauwerksteile bei der letzten Inspektion alle in die Zustandsklasse 2 eingestuft wurden, unterscheiden sich die Bauwerksteile mit demselben Schadensprozess nicht oder geringfügig in der prognostizierten Verteilung. Als Beispiele können Bauwerksteile mit Schadensprozess 10 verglichen werden. Darunter zählen die Stege «AME», die Randborden «BO», die Pfeiler «PI» usw.

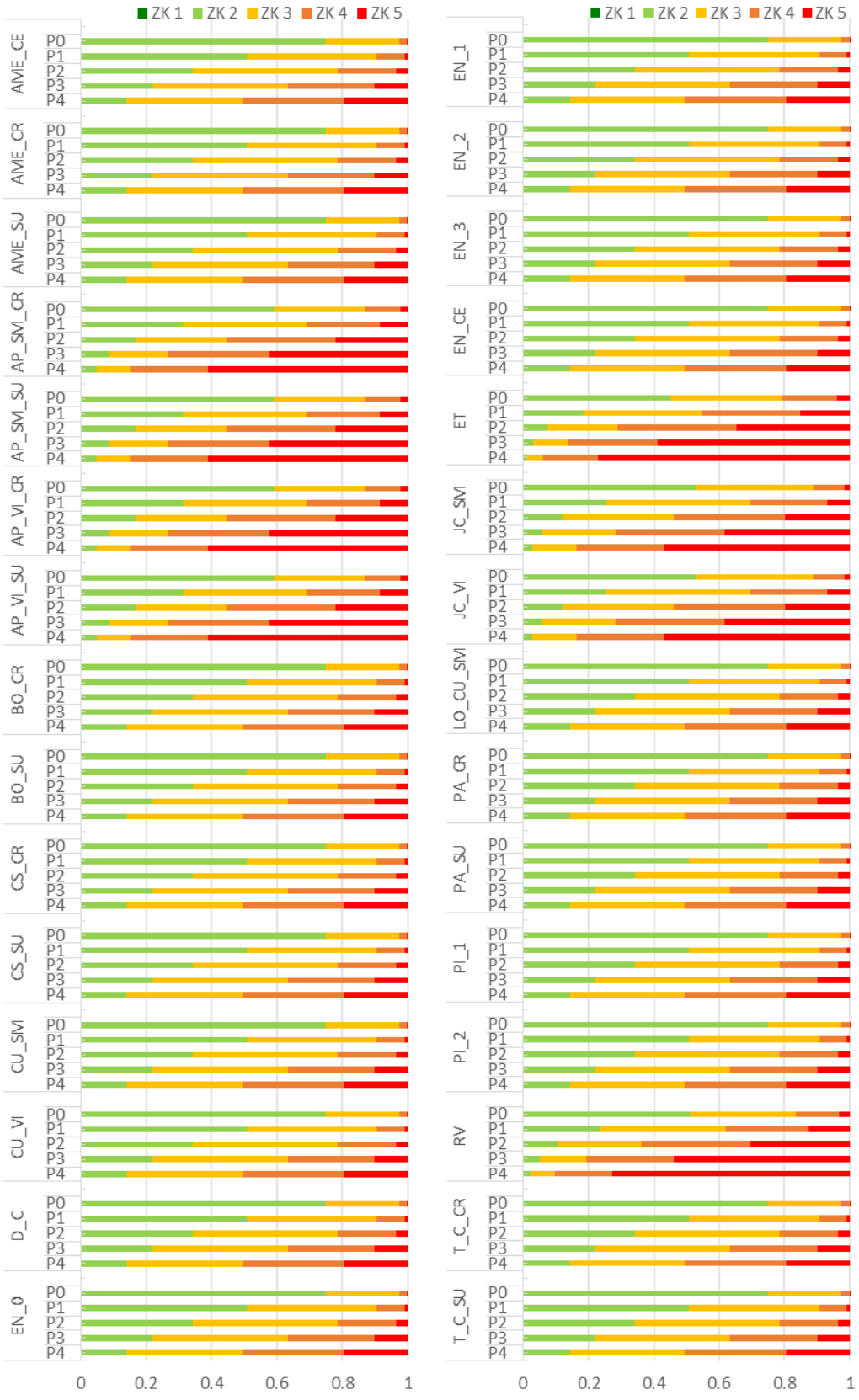


Abbildung 76: Prognostizierte Zustandsklassenverteilung *Pont sur La Sorge - gauche*, Periode 0 - 4, ohne Unterhaltsmassnahmen.

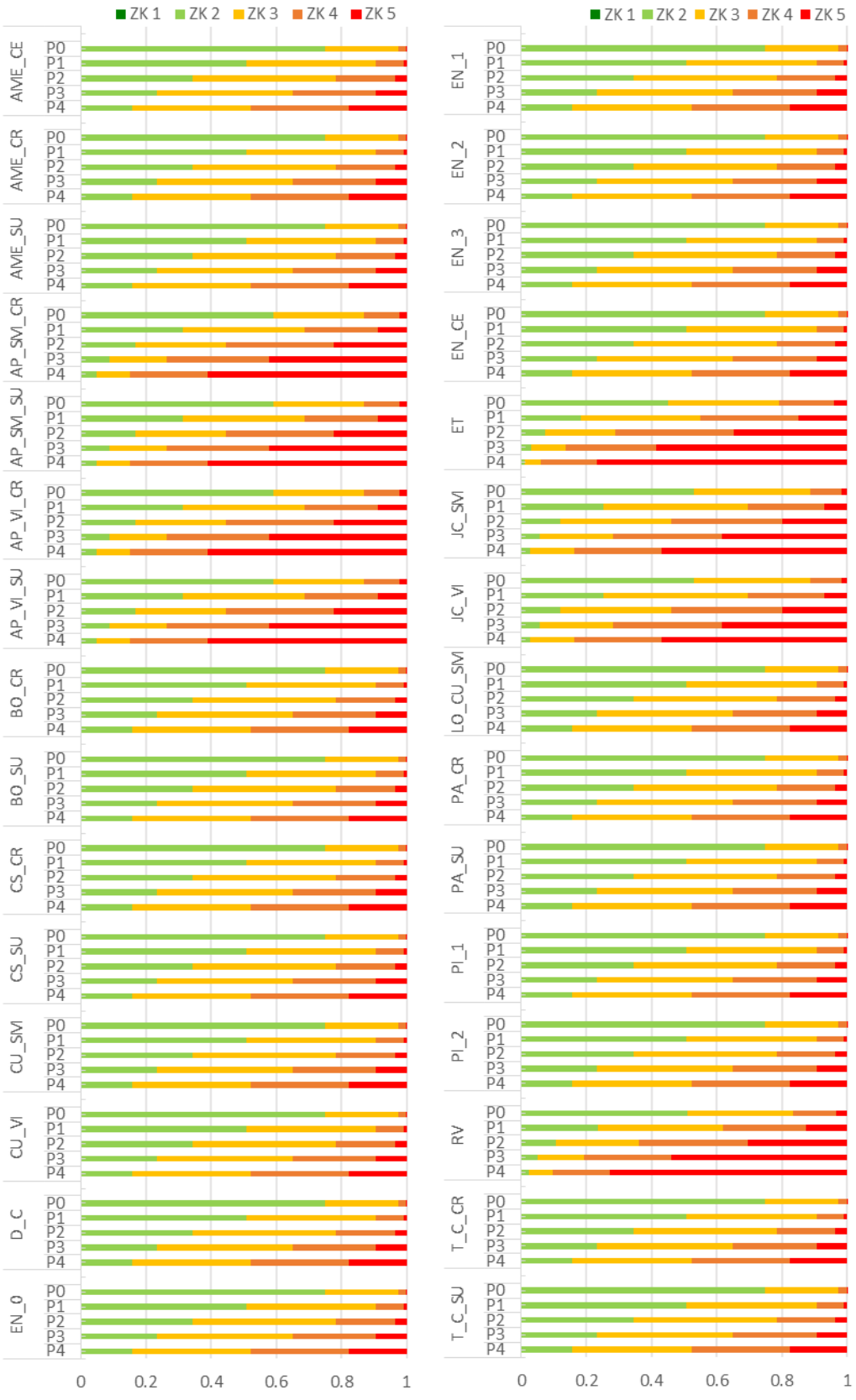


Abbildung 77: Prognostizierte Zustandsklassenverteilung *Pont sur La Sorge - droit*, Periode 0-4, ohne Unterhaltsmassnahmen.

Schritt 4: Sofortmassnahmenrisiko
Mit dem Output des vorherigen Schrittes kann nun das Risiko für den Fall berechnet werden, dass keine Massnahmen ergriffen werden. Wird dies für die gesamte Brückenauswahl durchgeführt, können die Risiken aller Brücken miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse werden für die Priorisierung im Schritt 7 benötigt, sollten aber vor allem bei den Entscheidungen eine Rolle spielen, die von der Erhaltungsplanung getroffen werden müssen, wenn es darum geht, zu planen, welche vertieften Untersuchungen in Auftrag gegeben werden sollen, oder ganz allgemein, wo Ressourcen eingesetzt werden sollen.

Das absolute Sofortmassnahmenrisiko ist in Abbildung 78 und Abbildung 79 gezeigt. Wie aus den Darstellungen ersichtlich ist, weisen die beiden Brücken 09V092 *Viaduc de Chillon* und 09V098 *Viaduc de la Plaine du Rhône* mit einem Faktor von ca. 10 ein deutlich höheres absolutes Risiko auf, weshalb diese separat dargestellt werden. Es kann also nicht nur das absolute Risiko verglichen werden, da sich die Brücken in ihrer Bauweise stark unterscheiden. Deshalb wird, wie bereits in Unterkapitel 6.2.2.3 erwähnt, auch das Delta oder gewichtete Risiko berechnet, also das Verhältnis zwischen dem absoluten Risiko und dem Risiko eines Grenzzustands der Brücke. Dieses ist in Abbildung 80 dargestellt.

Im Folgenden werden zwei Extremfälle besprochen, um die Aussagekraft der beiden Risikoberechnungen zu erläutern:
(1) Die Brücke 09P096 *Pont du Cabinet*, Baujahr 1970, mit einer Länge von 71.6 m und einem Gesamtzustand von 4 bei der letzten Inspektion weist in den Perioden 1 und 2 (mit Ausnahme der Viadukte) das höchste Risiko auf. Dies allein reicht aus, um Ressourcen für die Brücke einzusetzen, aber in welchem Umfang dies notwendig ist, zeigt Abbildung 80 mit den gewichteten Risiken. Das Delta-Risiko ist im Brückenvergleich am höchsten und übersteigt in den Perioden 3 und 4 sogar den Grenzzustand, d.h. 100%.
(2) Die Brücke 09V092 *Viaduc de Chillon*, Baujahr 1970, mit einer Länge von 2080.5m und einem Gesamtzustand von 3 bei der letzten Inspektion hat ab Periode 2 mit grossem Vorsprung das höchste Sofortmassnahmenrisiko. Das Delta-Risiko ist jedoch ähnlich wie bei den meisten Brücken über den betrachteten Zeitraum.
Wird nur das absolute Risiko des Viadukts betrachtet, kann dies zu einer Überbewertung der Dringlichkeit von Unterhaltsmassnahmen im Vergleich zum Portfolio führen.
Denn wenn das Ziel ist, die geforderte Leistung eines Netzwerks kontinuierlich aufrecht zu erhalten, sollte das gewichtete Risiko entscheidungsführend sein. Und in dem genannten Beispiel, ist das Delta-Risiko des Viadukts deutlich weniger kritisch als das der Brücke 09P096. Wenn es jedoch das Ziel ist, die Kosten für Sofortmassnahmen so gering wie möglich zu halten, sollte das absolute Risiko entscheidungsführend sein.
Um effektive und effiziente Entscheidungen in der Erhaltungsplanung treffen zu können, ist es daher notwendig, sowohl die absoluten als auch die gewichteten Risiken im Netz zu kennen.

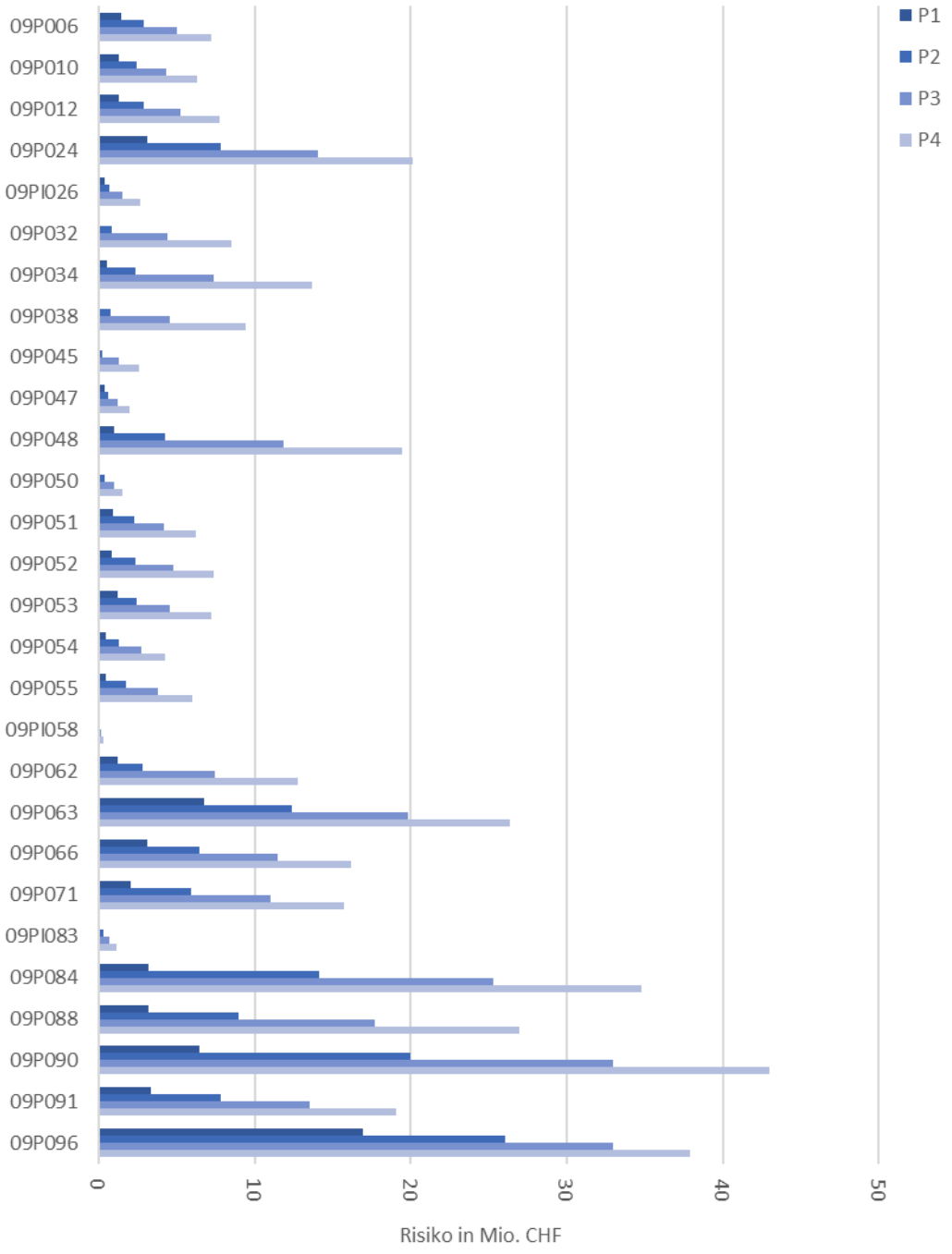


Abbildung 78: Sofortmassnahmenrisiko (absolut) - Teil 1.

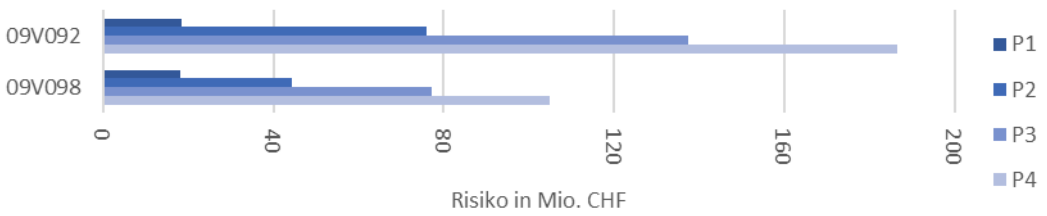


Abbildung 79: Sofortmassnahmenrisiko (absolut) - Teil 2.

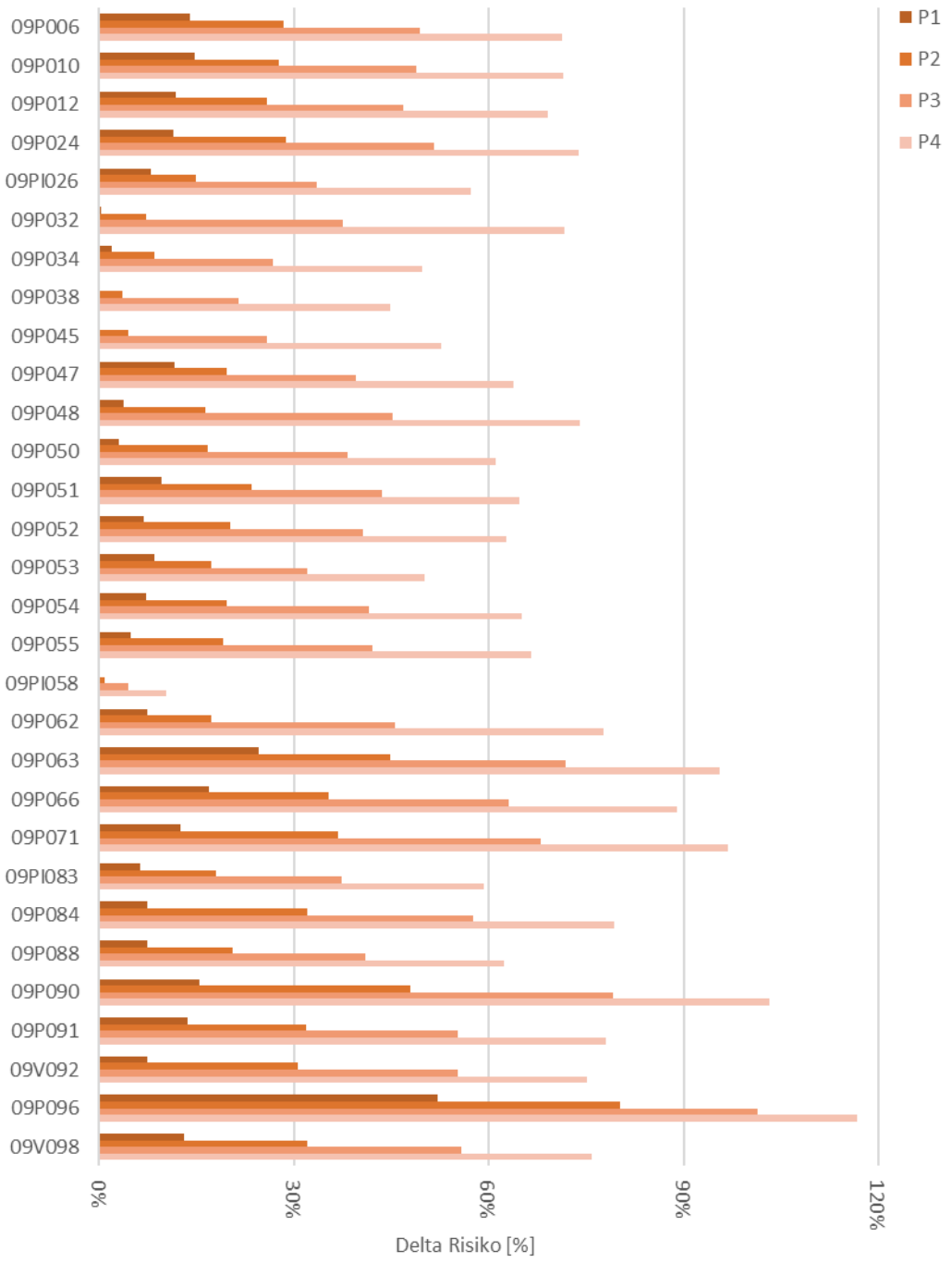


Abbildung 80: Delta-Sofortmassnahmenrisiko für alle Brücken auf der Teststrecke.

Schritt 5: Massnahmenstrategie
Die in Schritt 3 gezeigte Zustandsklassenverteilung, die für den Fall, dass keine Unterhaltsmassnahmen durchgeführt werden, ist in diesem Schritt zusammen mit der Massnahmenstrategie die Basis für die Bestimmung der empfohlenen Unterhaltsmassnahmen. Wie in der Methodik erläutert, ist den Zustandsklassen 3 bis 5 jeweils eine Massnahme zugeordnet. Die Massnahmen unterscheiden sich jedoch je nach Schadensprozess, so dass hier verallgemeinert die Massnahmen für die Zustände 3 bis 5 als Instandsetzung, Erneuerung und Ersatz bezeichnet werden. Die genauen Definitionen sind im Anhang «Unterhaltsmassnahmen: Einheitskosten und Erfolgsvektor» aufgeführt.
Die Ergebnisse für die Seite *gauche* sind in der Abbildung 81 gezeigt sowie in der Tabelle 52. Die Tabelle zeigt noch um welche Massnahme es sich konkret handelt[10] und welche Massnahmenkosten[11] (ASTRA, 2021a) erwartet werden. Für die Seite *gauche* der *Pont sur La Sorge* sind über die beiden Planungsperioden 1 und 2 für alle Bauwerksteile Unterhaltsmassnahmen prognostiziert. Die Auslösegrenze von 50% Wahrscheinlichkeit für eine Unterhaltsmassnahme wird erreicht und die wahrscheinlichste Massnahme ist dabei immer die Instandsetzung. Es ist eher selten, dass für alle Bauwerksteile der Brücke eine Massnahme in der gleichen Periode empfohlen wird. Für die Erstellung des Massnahmenprogramms ist es jedoch hilfreich, bereits einen Überblick über alle geplanten Bauwerksteilmassnahmen und deren Kosten zu haben, auch wenn diese zeitlich versetzt sind.

Schritt 6: Kostenschätzung
Da für alle Bauwerksteile die empfohlenen Unterhaltsmassnahmen aus Schritt 5 bekannt sind wird in diesem Schritt die Kostenschätzung (Betreiberkosten) für jede Periode und Brücke gemacht. Die Resultate sind in Abbildung 82 und Abbildung 83 dargestellt. Es ist an den Kosten zu erkennen, dass in den Planungsperioden P1 und P2 einen grossen Unterhaltsbedarf auf der Teststrecke besteht. Es ist davon auszugehen, dass viele Massnahmen aus der Planungsperiode P1 bereits geplant, im Bau oder ausgeführt sind, dies in der Datenbank zum Zeitpunkt des Datenbezugs jedoch noch nicht nachgeführt wurde. Die Methodik prognostiziert für die 09P006 *Pont sur La Sorge* und manch andere Brücke, Massnahmen für P1, was bei der langen Planungs- und Ausführungsdauer zeitlich gar nicht möglich ist. Spezifisch für diese Brücke wäre die Frage, ob zum Zeitpunkt der Berechnung nicht bereits Massnahmen an der Brücke geplant waren. Die Anwendung lässt zu, dass ein Erhaltungsplaner manuell Bauwerksteile oder Bauwerke aus der Analyse ausschliessen kann, damit keine Fehler dieser Art auftreten können.

Schritt 7: Priorisierung
Die Entscheidung über eine Priorisierung kann von vielen Aspekten beeinflusst werden, so dass es besser ist, diese Entscheidungen direkt den Entscheidungsträgern zu überlassen. Die Risikoabschätzung bereichert die Entscheidung als weitere Information.

Schritt 8: Ausgabe
Ausgabe all der gezeigten Resultate in einer angemessenen Form.

[10] Vgl. Massnahmen Nr. mit Anhang «Unterhaltsmassnahmen: Einheitskosten und Erfolgsvektor».
[11] Dies sind noch nicht die Betreiberkosten, sondern die initialen Betreiberkosten.

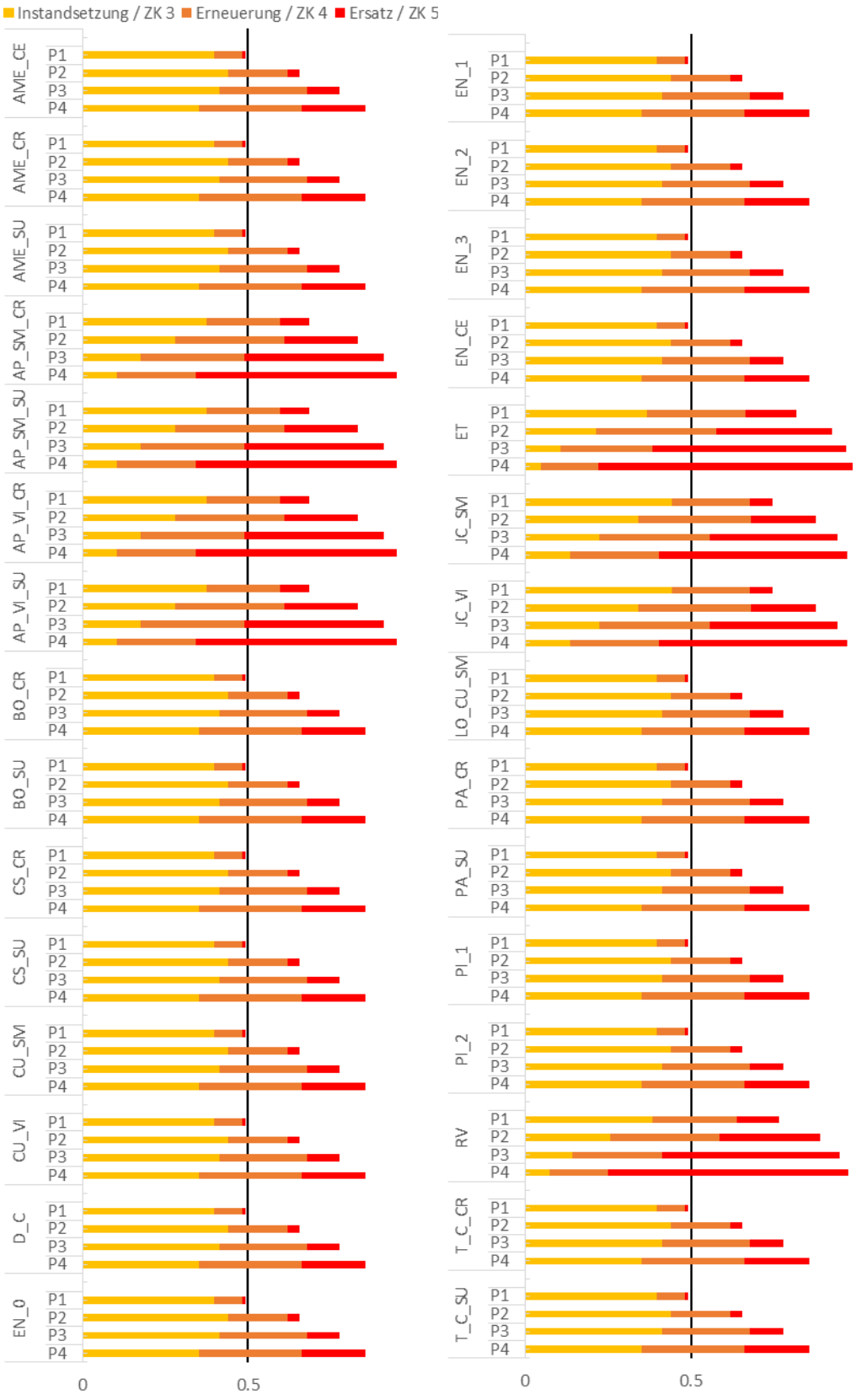


Abbildung 81: Wahrscheinlichkeit Unterhaltsmassnahmen der *Pont sur La Sorge - gauche* in den Periode 1-4.

Unterhaltsmassnahmen der *Pont sur La Sorge*

Bez.	Typ	Aus-mass	Einheit	Scha-densspro-zess	Peri-ode	UM Nr.	Kosten [CHF]
AME_CE	Steg	795	m²	10	2	308	468207
AME_CR	Steg	870	m²	10	2	308	512377
AME_SU	Steg	870	m²	10	2	308	512377
AP_SM_CR	Verformungslager	1	Stk	70	1	319	2710
AP_SM_SU	Verformungslager	1	Stk	70	1	319	2710
AP_VI_CR	Verformungslager	1	Stk	70	1	319	2710
AP_VI_SU	Verformungslager	1	Stk	70	1	319	2710
BO_CR	Randborde	220	m²	10	2	308	134613
BO_SU	Randborde	220	m²	10	2	308	134613
CS_CR	Kragplatte	422.4	m²	10	2	308	248532
CS_SU	Kragplatte	422.4	m²	10	2	308	248532
CU_SM	Widerlager	37	m²	10	2	308	56538
CU_VI	Widerlager	126	m²	10	2	308	44170
D_C	Untere Platte	2750	m²	10	2	308	1619582
EN_0	Querträger	19	m²	10	2	308	11190
EN_1	Querträger	46	m²	10	2	308	27091
EN_2	Querträger	46	m²	10	2	308	27091
EN_3	Querträger	19	m²	10	2	308	11190
EN_CE	Querträger	19	m²	10	2	308	11190
ET	Fahrbahnabdich-tung	2160	m²	90	1	234	747288
JC_SM	Verformbare Fuge	13	m	60	1	316	19359
JC_VI	Fahrbahnübergang	13	m	60	1	316	19359
LO_CU_SM	Verankerte Mauer	1	m²	10	2	308	589
PA_CR	Leitmauer	552	m²	10	2	308	115033
PA_SU	Leitmauer	552	m²	10	2	308	115033
PI_1	Einzelpfeiler	220	m²	10	2	308	140499
PI_2	Einzelpfeiler	305	m²	10	2	308	194782
RV	Deckschicht	2160	m²	80	1	321	357893
T_C_CR	Fahrbahnplatte	641	m²	10	2	308	377510
T_C_SU	Fahrbahnplatte	641	m²	10	2	308	377510

Tabelle 52: Unterhaltsmassnahmen der *Pont sur La Sorge - gauche*.

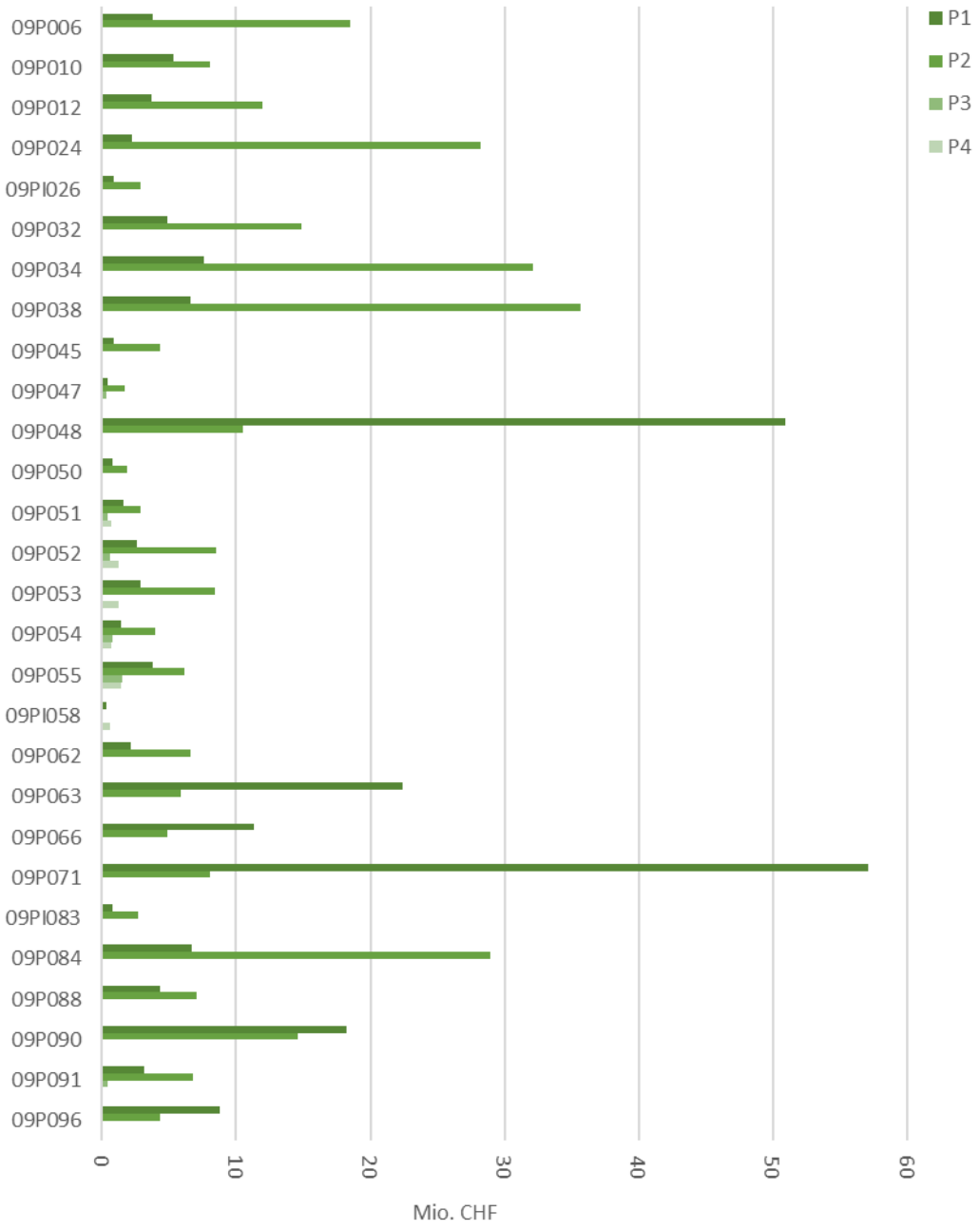


Abbildung 82: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmenkosten auf den Brücken der Teststrecke, Teil 1.

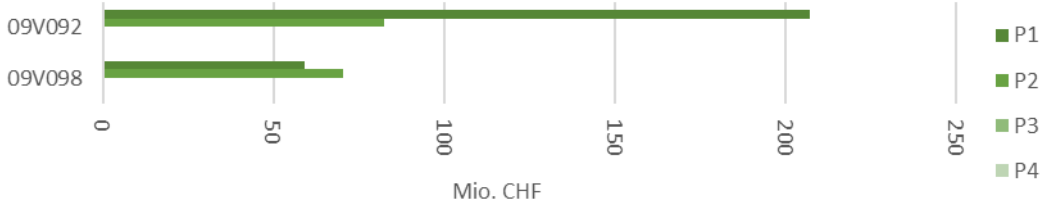


Abbildung 83: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmenkosten auf den Brücken der Teststrecke, Teil 2.

6.2.3.1 Auswertung der Algorithmus Ergebnisse

Im vorliegenden Kapitel erfolgt eine kurze Diskussion der Ergebnisse aus dem Algorithmus, um die Eignung der Methodik für den Einsatz im Rahmen des realen Erhaltungsplanungsprozesses aufzuzeigen. Die Planungsperiode 1 wird zu Demonstrationszwecken mitberücksichtigt, obgleich diese zu nahe am Ausführungsdatum liegt. In der Praxis ist bekannt, welche Unterhaltsmassnahmen in Planungsperiode 1 bereits geplant und budgetiert sind, sodass diese bei der Anwendung des Algorithmus nicht mitberücksichtigt werden. Nach der Anwendung des Algorithmus werden die Ergebnisse mit anderen Informationsquellen von der Erhaltungsplanung ausgewertet und in einem ersten Schritt muss entschieden werden (vgl. Abbildung 69), ob eine Brücke eine vertiefte Untersuchung benötigt und zum Handlungsbedarf hinzugefügt oder einfach in die Mehrjahresplanung aufgenommen wird. Dazu wird hier ein Beispiel diskutiert:
In Tabelle 53 sind alle Brücken mit der Anzahl der empfohlenen Unterhaltsmassnahmen in den jeweiligen Perioden aufgelistet. Es ist zu erkennen, dass für die Planungsperiode 1 ein grosser Unterhaltsbedarf besteht.

Unter der Annahme, dass für die meisten Brücken bereits entschieden wurde, wann die Unterhaltsmassnahmen durchgeführt werden sollen bzw. die Brücken schon Teil aktiver Projekte sind, ist für zwei Brücken, die *Pont du Cabinet* (09P096) und das *Viaduc de Chillon* (09V092), noch nicht klar, für welche Brücke früher Unterhaltsmassnahmen erforderlich sind. Die beiden Brücken unterscheiden sich deutlich in der Länge und damit auch in der Anzahl der kostenbestimmenden Bauwerksteile, wie aus Kapitel 3 ersichtlich ist. Die *Pont du Cabinet* und das *Viaduc de Chillon* sind 71,7 m bzw. 2080,5 m lang und haben 80 bzw. 315 kostenbestimmende Bauwerksteile. Als Entscheidungshilfe kann nun die zum KUBA-MS-Algorithmus ergänzte Berechnung des Sofortmassnahmenrisikos herangezogen werden. Das totale Risiko ist in der ersten Periode noch gleich für die *Pont du Cabinet* wird in den nachfolgenden Perioden aber viel kleiner abgeschätzt als das des Viaduktes. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der kostenbestimmenden Bauwerksteile ist ein Vergleich der beiden Ergebnisse schwierig, es kann jedoch festgehalten werden, dass die Unterhaltsmassnahmen am Viadukt nicht zu lange hinausgezögert werden sollten, da sonst grosse Totalrisiken entstehen. Um einen Vergleich zu ermöglichen, kann das Delta-Risiko, Abbildung 85, der Brücken verglichen werden. In allen Perioden weist die *Pont du Cabinet* ein deutlich erhöhtes Delta-Risiko auf, in P1 liegt es sogar über 50 %. Dies ist ein wichtiger Hinweis für die Erhaltungsplanung: Das selbstgesetzte akzeptable Risiko wird über die nächsten drei Planungsperioden überschritten, sodass entsprechende Handlungen erforderlich sind. Dazu gehört beispielsweise eine zeitnahe, vertiefte Untersuchung der Bauanlage. Auf Basis der Ergebnisse können zunächst temporäre Massnahmen umgesetzt werden, bevor eine Unterhaltsmassnahme erfolgt.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass zusätzliche Informationen, die nicht als Datengrundlage für den Algorithmus dienen, diese Entscheidungen ebenso beeinflussen können und sollten. Der Algorithmus und seine Ergebnisse sind nur eine Ergänzung im Prozess der Erhaltungsplanung. Die Ergebnisse sind unter anderem hilfreich, um frühzeitig Warnsignale für Bauwerke zu erhalten, die in den nächsten vier Planungsperioden besonderer Aufmerksamkeit bedürfen, wie im Beispiel gezeigt.

Brücken der Fallstudie

	Anzahl BWT mit einer Massnahme				
Name	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**	**Anzahl kostenbestimmende Bauwerksteile**
Pont sur La Sorge (09P006)	20	44	-	-	60
Pont sur La Mèbre (09P010)	25	50	-	-	75
Pont sur La Pétause (09P012)	25	65	-	-	90
Pont sur Le Flon (09P024)	31	63	-	-	94
Pont A JCT Lausanne-Vennes (09PI026)	7	15	-	-	22
Pont sur La Chandelar (09P032)	38	37	-	-	75
Pont sur la Paudèze (09P034)	28	80	-	11	119
Pont sur La Lutrive (09P038)	20	60	-	-	80
Pont des Daillettes (09P045)	20	27	-	-	47
Pont de la Criblette (09P047)	15	16	3	-	36
Pont de Bahyse (09P048)	77	38	12	-	127
Estacade En Jérusalem (09P050)	9	17	-	-	26
Pont du Rio d'Enfer (09P051)	41	29	1	14	99
Pont du Crau Coulet (09P052)	36	34	1	6	85
Estacade du Crau Coulet (09P053)	24	84	-	6	122
Estacade de la Cornallaz (09P054)	27	30	2	2	65
Pont de la Cornallaz (09P055)	36	23	2	4	69
Pont JCH Chexbres (09PI058)	2	-	-	2	31
Pont sur La Salenche (09P062)	30	40	-	-	70
Pont des Curnilles (09P063)	79	38	-	-	117
Pont du Chenaux (09P066)	51	28	-	-	79
Pont sur La Veveyse (09P071)	31	7	-	-	38
Pont JCT Montreux (09PI083)	5	14	-	-	19
Pont sur la Baye de Clarens (09P084)	36	55	-	-	91
Pont des Vuarennes (09P088)	28	87	-	-	115
Pont sur la Baye de Montreux (09P090)	71	17	-	-	88
Pont sur La Veraye (09P091)	26	29	2	-	57
Viaduc de Chillon (09V092)	145	156	3	-	315
Pont du Cabinet (09P096)	57	23	-	-	80
Viaduc de la Plaine du Rhône (09V098)	83	185	-	-	268

Tabelle 53: Anzahl Unterhaltsmassnahmen pro Periode für jede Brücke der Teststrecke.

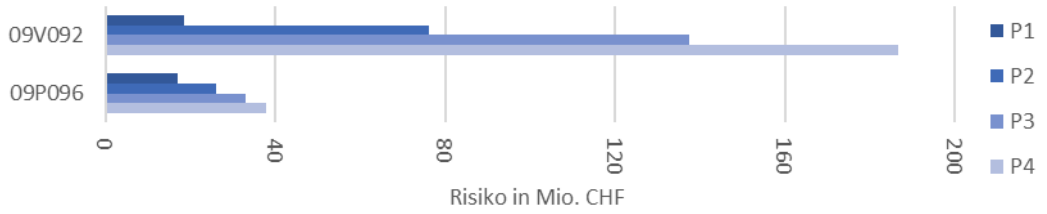


Abbildung 84: Totales Risiko der Brücken *Pont du Cabinet* und *Viaduc de Chillon*.

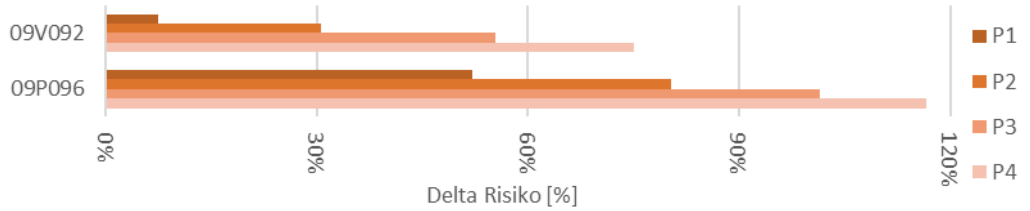


Abbildung 85: Delta-Risiko der Brücken *Pont du Cabinet* und *Viaduc de Chillon*.

6.3 Trassee

Wie auch für Brücken und Tunnel gibt es für das Trasse eine eigene Fachapplikation MISTRA Trassee (TRA), welche zur Verwaltung und Auswertung der Daten zum Strassenraum sowie zur Unterstützung des Erhaltungsmanagements der Beläge (PMS) dient (ASTRA, 2024d). Der bestehende Prozess im ASTRA zur Ermittlung von Unterhaltsmassnahmen auf dem Trassee ist weitgehend analog zu jenem für Brücken, weist jedoch gewisse Eigenheiten auf. Für die Prognose von Unterhaltsmassnahmen von dichten Belägen wurden in Kapitel 3 Trassee-Teilstücke definiert. So kann der in Abbildung 86 dargestellte Algorithmus genutzt werden, der dem für Brücken gleich ist, jedoch hier auf Trasse-Teilstücke angewendet wird. Die eingesetzte Methode zur Zustandsabschätzung ist aber anders – sowohl jene des ASTRAs wie auch die im Rahmen dieses Berichts verwendete (vgl. Kapitel 5.2). Wie bereits bei den Brücken wird zudem vorgeschlagen, den Algorithmus, um den Schritt zur Berechnung des Sofortmassnahmenrisikos zu erweitern. Im Unterschied zu Bauwerken wie Brücken, die ein Hindernis überspannen, hat das Trassee im Ereignisfall nicht dieselben direkten Auswirkungen auf die Nutzer. Es liefert jedoch wertvolle Hinweise für die Erhaltungsplaner, insbesondere zur Priorisierung von Trasse-Teilstücken, die bei knappen Ressourcen zuerst detailliert untersucht werden sollten. Darüber hinaus bilden die Risikoabschätzungen eine wichtige Grundlage für die automatische Bündelung von Massnahmen beschrieben im Kapitel 7.

6.3.1 Algorithmus

In diesem Kapitel werden die einzelnen Schritte des Algorithmus erläutert. Die Reihenfolge entspricht dem in Abbildung 88 dargestellten Prozess des vorgeschlagenen Algorithmus zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen. Die verwendeten Quellen vom ASTRA sind das «MISTRA TRASSEE – TRA Anwendungshandbuch PMS» (ASTRA, 2024c) und das «MISTRA TRASSEE – TRA Datenerfassungshandbuch» (ASTRA, 2024b), wenn nicht anders erwähnt.

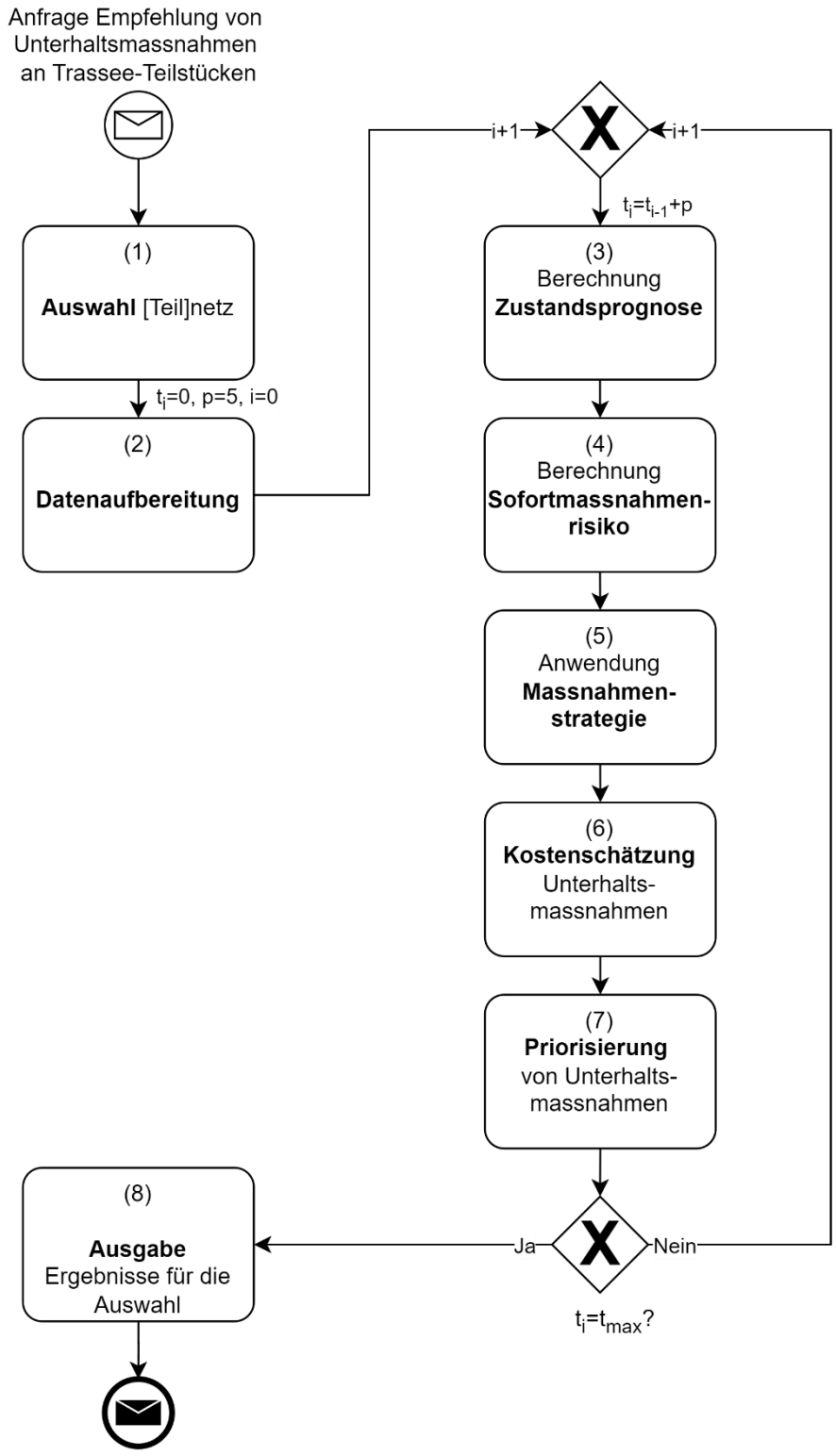


Abbildung 86: Algorithmus zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen im ASTRA für Brücken übernommen für das Trassee.

Schritt 1 und 2: Auswahl [Teil]netz und Datenaufbereitung
Innerhalb des Moduls PMS stehe die Funktionen für die Prognose von Unterhaltsmassnahmen für die Erhaltungsplaner zur verfügen, um diese bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen. Der Container dafür ist die Mehrjahresplanung, welche für ein [Teil]netz einer Filiale gemacht werden kann und sich über mehre Planungsperioden erstrecken kann. Die Aufbereitung der Datengrundlagen ist in Kapitel 3.2 besprochen.

Schritt 3: Zustandsprognose
Die Abschätzung der gegenwärtigen und zukünftigen Indexwerte der Zustandsmerkmale erfolgt mit den in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 vorgestellten Methoden. Im Fallbeispiel (vgl. Kapitel 6.3.3) werden jedoch nicht die dort ermittelten a priori-Funktionen für die Abschätzung genutzt, da diese, wie in der Diskussion besprochen, für eine Anwendung zu limitiert sind. Alternativ werden vorgegebene bzw. angenommene Verhaltenskurven verwendet werden. Denn die eigentliche Stärke dieser Methode ist, dass die Prognose aufgrund von neuen Zustandsdaten angepasst werden kann und dabei nicht nur einen Erwartungswert abschätzt, sondern auch die Varianz der abgeschätzten Verteilung zur Quantifizierung der Unsicherheit ausgibt. Die genutzten a priori-Funktionen für die verschiedenen Zustandsindizes f_{Index} in Abhängigkeit von der Zeit t (in Jahren) sind deshalb wie folgt gewählt:

- $f_{I_0}^{a\ priori} = 0.1 \cdot t$ (Annahme, erreichen von ZK 3 nach 30 Jahren)
- $f_{I_2}^{a\ priori} = 0.1 \cdot t^{0.79} + 0.8$ (ASTRA, 2024b)
- $f_{I_3}^{a\ priori} = 0.47 \cdot t^{0.44}$ (ASTRA, 2024b)
- $f_{I_4}^{a\ priori} = 0.1 \cdot t$ (Annahme, erreichen von ZK 3 nach 30 Jahren)

Für die Zustandsindizes I2 und I3 wurden die in der Fachapplikation TRA hinterlegten Verlaufskurven der Verhaltensklasse 2 angenommen. Da für I0 und I4 keine Verlaufskurven definiert sind, wurde eine lineare Verlaufskurve angenommen.

Schritt 4: Sofortmassnahmenrisiko
Das Sofortmassnahmenrisikos für das Trassee ist im Kapitel 6.3.2 besprochen.

Schritt 5 und 6: Massnahmenstrategie und Kostenschätzung
Im Modul PMS kann Erhaltungsobjekten eine Erhaltungsmassnahme zugewiesen werden. Es wird jedoch nicht automatisch eine vorgeschlagen. Diese ist durch den Erhaltungsplaner unter Verwendung der vorhandenen Grundlagendaten zu bestimmen. Zur Auswahl stehen die in Tabelle 54 aufgelisteten Erhaltungsmassnahmenarten. Eine Erhaltungsmassnahme ermöglicht eine erste Kostenschätzung und hat Zustands-Rücksetzwerte für die Indizes angegeben, wobei es entweder keine, eine absolute oder eine relative Veränderung der Zustandsnote gibt.

Erhaltungsmassnahmenarten

Name	Darstellung	Fixkosten	Flächenkosten $[CHF/m^2]$	Zustands-Rücksetzfunktionen			
				I0	I2	I3	I4
Keine Erhaltungsmassnahme	KE	0	0	-	-	-	-
Oberflächen-Aufrauhung	OBMB	0	5	-	-	-	1
Mikro-Belag	OBMB	0	15	0	-0.5	-1	1
Ersatz Deckschicht	ED	0	35	0	0.8	0	1
Ersatz Deck- und Binderschicht	EDB	0	80	0	0.8	0	1
Totaler Belagsersatz T4	TB	0	120	0	0.8	0	1
Totaler Belagsersatz T5	TB	0	140	0	0.8	0	1
Totaler Belagsersatz T6	TB	0	170	0	0.8	0	1
Totale Oberbau-Erneuerung	TOE	0	210	0	0.8	0	1

Tabelle 54: Erhaltungsmassnahmenarten im Modul PMS (ASTRA, 2024b, S. 89).

Da im PMS keine Massnahmenstrategien vorhanden sind, wird für das Fallbeispiel eine eigene Strategie entwickelt. Diese hat jedoch keinen Anspruch auf eine reale Anwendung, sondern dient ausschliesslich als Demonstrationsmittel, um aufzuzeigen, welche Auswirkungen die Entwicklung einer Massnahmenstrategie beim ASTRA auf den Entscheidungsprozess hätte. Einfachheitshalber wird die Auswahl der Erhaltungsmassnahmenarten auf «Ersatz Deckschicht» (ED), «Ersatz Deck- und Binderschicht» (EDB) und «Totaler Belagsersatz» (TB) beschränkt, da für diesen Bericht nur Daten zum Zustand und Alter der Deckschicht verwendet werden. Diese Erhaltungsmassnahmen sind in der Tabelle 54 zusätzlich grau hinterlegt. Für jedes Prognosejahr werden die Massnahmenwahrscheinlichkeiten einer Bewertungsfläche für die Trassee-Teilstücke aggregiert. Die Massnahmenstrategie wird mit Hilfe von Gnehm (2008) formuliert, welcher innerhalb des «Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen» Standardisierte Erhaltungsmassnahmen formuliert hat, sowie deren Anwendung diskutiert.

Tabelle 55 zeigt einen Ausschnitt aus dem Massnahmenkatalog entworfen von Gnehm (2008). Dabei wurde schon eine Wahl getroffen welche Massnahmen, zu denen vom ASTRA möglichst gleich sind und Informationen zu anderen Indizes wurden weggelassen. Auch gibt der Forschungsbericht von Gnehm an, was typische Anwendungsbereiche sind, bezüglich den Zustandsindizes. Für das Zustandsmerkmal «Oberflächenschaden» sind im Forschungsbericht nur Werte für I1 besprochen, wird hier aber gleich behandelt wie der vom ASTRA angegebenen Index I0, welcher die Spurrinnentiefe gegenüber I1 nicht enthält.

Erhaltungsmassnahmen Anwendungsbereich

Massnahmen			**Anwendungsbereich**			
ASTRA	Gnehm (2008)		I1	I2	I3	I4
ED	2.5.2	Deckschicht 4mm (Tiefeinbau)	3.0-4.0	2.5-3.5	>3.5	3.0-4.0
EDB	2.6.1	Deck- und Binderschicht 100mm (Tiefeinbau)	3.5-4.5	3.0-4.0	>3.5	3.0-4.0
TB	3.1.1	Deck-, Binder- und Tragschicht 200mm (Gesamt – Erneuerung)	4.0-5.0	>3.5	>3.5	-

Tabelle 55: Erhaltungsmassnahmen und deren Anwendungsbereich (Gnehm, 2008, S. 56).

Da der Anwendungsbereich innerhalb eines Indizes Überschneidungen hat und für I3 und I4 sogar immer der gleiche Wertebereich gilt, wird der Anwendungsbereich wie in Tabelle 56 für die Massnahmenstrategie abgeleitet. Die Anwendungsbereich-Überschneidungen für I1 und I2 werden belassen und für I3 und I4, wird beim Deckungsgleichen Anwendungsbereich die konservativere Massnahme gewählt.

Massnahmenstrategie Anwendungsbereich

Massnahmen	**Anwendungsbereich**			
	I0	I2	I3	I4
ED	[3.0, 4.0]	[2.5, 3.5]	-	-
EDB	[3.5, 4.5]	[3.0, 4.0]	-	[3.0, 4.0]
TB	≥4.0	≥3.5	≥3.5	≥4.0

Tabelle 56: Massnahmenstrategie Anwendungsbereich.

Tabelle 56 ist analog zu den in Kapitel 6.2 beschriebenen Massnahmenstrategien für Bauwerksteile: Sobald ein bestimmter Zustand erreicht ist, wird eine Massnahme vorgeschlagen. Es bestehen jedoch wichtige Unterschiede: Die Zustandsindizes des Trassees sind kontinuierlich, und anstelle einer einzelnen Zustandsnote werden im Fall des ASTRA vier Zustandsmerkmale berücksichtigt. Gleich bleibt hingegen, dass die vorgeschlagene Methode zur Abschätzung des zukünftigen Zustands mittels EKF erlaubt, für jeden Wertebereich eine Wahrscheinlichkeit zu berechnen. In Abbildung 87 wird gezeigt, wie eine Zustandsabschätzung mit Erwartungswert der Zustandsnote sowie Unsicherheitsangabe als Normalverteilung dargestellt werden kann. Die Anwendungsbereiche für die verschiedenen Massnahen sind sowohl oben bei der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion als auch unten bei der kumulativen Verteilungsfunktion eingezeichnet. Aus der kumulativen Verteilungsfunktion kann die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zustand im Anwendungsbereich einer Massnahme ist, ausgelesen werden. Auch wenn sich die Intervalle gewisser Massnahmen überschneiden, kann dennoch jeweils der in Tabelle 56 ausgewiesene Anwendungsbereich verwendet werden. Entsprechend dürfen die Wahrscheinlichkeit dieser Anwendungsbereiche jedoch nicht aufsummiert werden, wenn man eine Grundaussage zur Wahrscheinlichkeit irgendeiner Massnahme machen will. Diese zusätzliche Information – die Wahrscheinlichkeit einer Massnahme bei einem bestimmten Index – stellt vielmehr eine weitere Entscheidungshilfe dar. So könnte eine vom ASTRA vordefinierten Massnahmenstrategie bereits berücksichtigt werden.

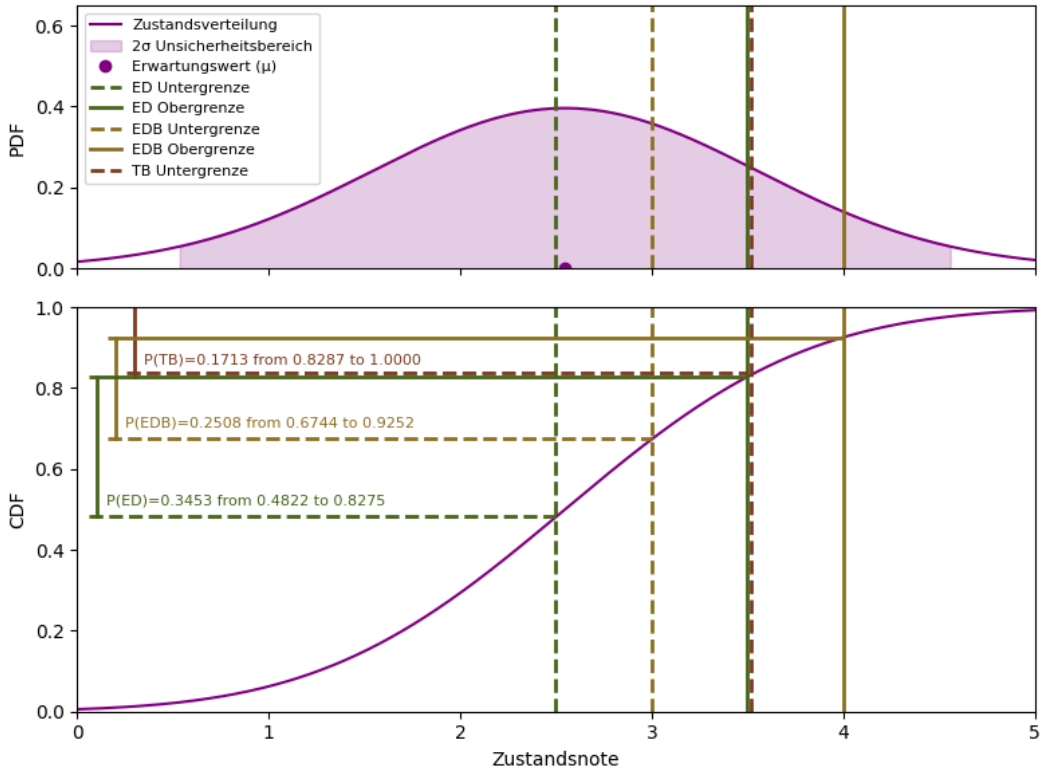


Abbildung 87: Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Massnahme an einem Beispiel mit den Anwendungsbereichen von Indikator I2.

Damit im Fallbeispiel eine konkrete Massnahme vorgeschlagen werden kann, wird für jeden Index und mögliche Massnahme ein Schwellenwert der Wahrscheinlichkeit des Zustands im entsprechenden Anwendungsbereich von 20% festgelegt. Erst wenn dieser erreicht ist, erfolgt eine Massnahmenempfehlung der wahrscheinlichsten Massnahme. Aus allen vorgeschlagenen, wahrscheinlichsten Massnahmen – pro Index höchstens eine – wird schliesslich die konservativste ausgewählt. Als Beispiel würden in Abbildung 87 die Massnahmen ED mit 34.5% und EDB mit 25.1% den Schwellenwert überschreiten. Das heisst, für den dargestellten Indikator I2 würde ED mit 34.5% vorgeschlagen werden. Für das Trassee-Teilstück wird dasselbe auch noch mit den anderen Indikatoren gemacht, wobei am Ende der konservativste Massnahmenvorschlag eines Indikators ausgewählt wird. Der Massnahmenvorschlag ist damit sehr konservativ, was auch auf die Kostenschätzung eine Auswirkung hat. Daher sind die probabilistischen Werte einer Massnahme empfohlen für die Entscheidungsunterstützung.

Zur besseren Veranschaulichung sind in Tabelle 57 fiktive Beispiele der Trassee-Teilstücke T2 und T3 dargestellt. Die berechneten Wahrscheinlichkeiten, für eine Massnahme bezüglich eines Indikators, welche den Schwellenwert von 0.20 nicht erreichen, sind im Kursiv angegeben. Wird der Schwellenwert erreicht bzw. überschritten, ist die grösste Wahrscheinlichkeit unterstrichen. In fettgedruckter Schrift ist schliesslich die konservativste Massnahme ausgewiesen. Das ist die nach der beschriebenen Massnahmenstrategie empfohlene Massnahme.

Die prognostizierte Massnahme für ein bestimmtes Jahr, kombiniert mit der Fläche des jeweiligen Trassee-Teilstücks, ermöglicht die Berechnung der Kosten. Auf diese Weise kann für einen gewählten Betrachtungszeitraum und Filialgebiet eine Prognose der Unterhaltsmassnahmen zusammen mit einer Kostenschätzung erstellt werden.

Massnahmenvorschlag

Trasse-Teilstück Nr.	Massnahmen	Wahrscheinlichkeiten			
		I1	I2	I3	I4
T2	ED	*0.11*	0.30	-	-
	EDB	*0.13*	*0.10*	-	0.45
	TB	*0.00*	*0.15*	0.25	*0.10*
T3	**ED**	0.42	0.26	-	-
	EDB	0.34	*0.13*	-	*0.10*
	TB	*0.15*	*0.14*	*0.0*	*0.15*

Tabelle 57: Massnahmenstrategie angewendet auf zwei fiktive Trasse-Teilstücke.

Schritt 7 und 8: Priorisierung und Ausgabe
Diese Schritte sind im wesentlich gleich durchzuführen, wie es auch schon für Brükken erklärt wurde, darum wird hier auf diese zurückverwiesen, vgl. Kapitel 6.2.

6.3.2 Risikoberechnung

Auch für das Trassee sind Sofortmassnahmen von Interesse, welche die ursprünglich vorgesehene akzeptable Leistung so einschränken, dass diese nicht mehr erbracht werden kann. Die Berechnung dieses Risikos wird im vorliegenden Fall als Demonstrationsmittel durchgeführt, um aufzuzeigen, welche zusätzlichen Entscheidungsgrundlagen der Erhaltungsplanung zur Verfügung stehen könnten. Die gezeigte Berechnung erhebt jedoch keinen Anspruch auf eine reale Anwendung, wird aber für die automatische Bündelung von Massnahmen im Kapitel 7 benötigt. Die Komplexität einer solchen Risikoberechnung ist hier stark vereinfacht dargestellt. Vertiefte Arbeiten – wie etwa die «Bewertung der Vulnerabilität der Strassenverkehrsinfrastruktur» von Erath (2011) – sollen als Grundlage für eine systematische Bewertung des Sofortmassnahmenrisikos im ASTRA dienen.

Die Berechnung wird and das Vorgehen in Kapitel 6.2.2 angelehnt, jedoch wird nur das Top-Ereignis «Totale Leistungseinschränkung» betrachtet mit einer angenommenen Dauer von einem Monat. Die Auswertung findet jeweils für ein Jahr statt und ein Trassee-Teilstück. Die Annahme ist, dass die Wahrscheinlichkeiten eines Ereignisses unabhängig sind für jedes Trassee-Teilstück und damit die Gesamtwahrscheinlichkeit über eine ODER-Funktion $P_E = 1 - \prod_i (1 - P_i)$ berechnet werden kann. Das Sofortmassnahmenrisiko R_{SM} wird mit Formel (35) als Multiplikation der Wahrscheinlichkeit P_{SM} und den Kosten C_{SM} berechnet.

P_{SM} ist angenommen als die Wahrscheinlichkeit aus den Ereignissen: Alarmierende Schäden und Externe Ereignisse. Die Bestimmung von diesen ist in Tabelle 58 gezeigt.

Angenommene Eintrittswahrscheinlichkeiten

Ereignis	Eintrittswahrscheinlichkeit	Beschreibung und Begründung
Alarmierende Schäden	$P_{TB} \cdot P_f$	Annahme: P_{TB} ist die Wahrscheinlichkeit einer TB-Massnahme. Da für jeden Zustandsindex eine Wahrscheinlichkeit $p_{TB,Ix}$ berechnet wird, entspricht P_{TB} dem Maximum dieser Werte: $P_{TB} = \max_{x}\{p_{TB,Ix}\}$ Das heisst, P_{TB} ist der höchste Wahrscheinlichkeitswert aus allen für die Indizes berechneten Wahrscheinlichkeiten einer TB-Massnahme. Damit aus dem schlechten Zustande eine Sofortmassnahme resultiert wird zusätzlich eine Versagenswahrscheinlichkeit P_f berücksichtigt. Versagen beschreibt dabei einen Zustand, der für die Nutzer nicht mehr tragbar ist. Gemäss Tabelle 49, welche die für diesen Bericht definierten Standartwerte der Eintrittswahrscheinlichkeit enthält, wird $P_f = 10^{-2}$ gewählt - was einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit entspricht, dass eine Sofortmassnahme erforderlich wird.
Externe Ereignisse	P_{Ext}	Annahme: P_{Ext} ist die Wahrscheinlichkeit eines externen Ereignisses, ohne dass dieses hier im Detail spezifiziert wird. Dazu zählen beispielsweise schwere Unfälle, Erdbeben, Erdrutsche oder Hochwasser. Der gewählte Wert dient daher lediglich als Beispiel. Da nicht jedes Trassee-Teilstück gleich exponiert ist, wird jedes Teilstück einer der Eintrittswahrscheinlichkeiten Gering 10^{-8}, Mittel 10^{-6} oder Hoch 10^{-4} zugeordnet.

Tabelle 58: Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ereignisse fürs Trassee.

C_{SM} sind die Kosten für das Top-Ereignis und setzt sich wie in Formel (36) beschrieben aus den Betreiber- und Nutzerkosten zusammen. Die Betreiberkosten sind die Massnahmenkosten für eine TB-Massnahme auf das ganze Trasse-Teilstück angewendet. Die Nutzerkosten pro Tag werden aufgrund Abbildung 75 und der grossen Leistungseinschränkung in Tabelle 51 jedem Trassee-Teilstück zugewiesen. Die Werte der grossen Leistungseinschränkung werden verwendet, da sich das Trasse-Teilstück nur über eine Fahrtrichtung erstreckt. Der Fall, dass an gleicher Stelle beide Fahrtrichtungen gesperrt werden, wird für Erhaltungsentscheide als vernachlässigbar angenommen.

Das Ereignis «Alarmierende Schäden» geht davon aus, dass die Massnahme «Totaler Belagsersatz» die Sofortmassnahme ist. Dies ist für die Eintrittswahrscheinlichkeit sinnvoll, da eine TB-Massnahme bei den schlechtesten Zustandswerten angewendet wird. Es werden jedoch auch gleich die Kosten einer TB-Massnahme angesetzt, was eine konservative Annahme ist. Im ASTRA müsste geprüft werden, welche Massnahmen in solchen Fällen effektiv umgesetzt werden und welche Kosten/Fläche entstehen.

Formel (41) zeigt die Berechnung des Sofortmassnahmenrisikos für ein Trassee-Teilstück.

$$R_{SM} = (C_{TB} + c_{Nutzer} \cdot d_{SM}) \cdot (1 - (1 - P_{TB} \cdot P_f) \cdot (1 - P_{Ext})) \quad (41)$$

wobei

R_{SM}	das Sofortmassnahmenrisiko für ein Trassee-Teilstück,
C_{TB}	die Kosten der TB-Massnahme auf dem Trassee-Teilstück,
c_{Nutzer}	die Nutzerkosten für eine gesperrtes Teilstück pro Tag,
d_{SM}	die Dauer der Sofortmassnahme auf dem Trassee-Teilstück gewählt mit 30 Tagen,
P_{TB}	die Wahrscheinlichkeit einer TB-Massnahme für das Trassee-Teilstück,
P_f	die Versagenswahrscheinlichkeit, wenn der Zustand eine TB-Massnahme erfordert,
P_{Ext}	die Wahrscheinlichkeit eines externen Ereignisses.

Für die Berechnung des Delta-Risiko gilt $R_\Delta = R_{SM}/R_{GW}$, wobei R_{GW} den Risikogrenzwert darstellt. Dieser wird berechnet, indem für die Wahrscheinlichkeit einer TB-Massnahme $P_{TB} = 0.5$ gesetzt wird. Der Risikogrenzwert R_{GW}, entspricht somit jenem Risiko, bei dem die Eintrittswahrscheinlichkeit einer TB-Massnahme als nicht mehr akzeptabel angesehen wird.

6.3.3 Fallstudie

Wie bereits bei den Brücken wird die Methodik anhand einer Fallstudie demonstriert – auf der definierten Teststrecke von Villars-Sainte-Croix nach Rennaz. Das Trassee-Teilstückportfolio ist in Kapitel 3.2 gezeigt.

Schritt 1, 2 und 3: Auswahl Netz, Datenaufbereitung und Zustandsprognose

Wie bei den Brücken ist der 01.06.2024 der Stichtag für die Berechnung. In Kapitel 1.5 ist das Bezugsdatum der Datengrundlagen angegeben. Die berechneten Daten zur Abschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Zustands der Indizes können im MINERVA-Datensatz eingesehen werden.

Schritt 4: Sofortmassnahmenrisiko

Gemäss der beschriebenen Methodik und den Ausgaben aus den Schritten 1-3 kann das Sofortmassnahmenrisiko ermitteln werden. In Abbildung 88 und Abbildung 89 wird das Risiko in Mio. CHF für die Perioden 1-4 dargestellt. Dies sind entsprechend die Planungsperioden 5, 10, 15 und 20 Jahre in der Zukunft. Die Ergebnisse sind jedoch aufgrund der getroffenen Annahmen sowie der Prognosen der Zustandsindizes, die in die Berechnung einfliessen, mit Vorsicht zu interpretieren.

Die orangefarbige, abgestufte Darstellung des Delta-Risikos zeigt den relativen Anstieg im Vergleich zum Risikogrenzwert: Weiss entspricht 0 %, während dunkles Orange (z. B. bei T92) für Werte von 100 % oder mehr steht. Damit lässt sich auf einen Blick erkennen, welche Trassee-Teilstücke ein erhöhtes Risiko aufweisen. Würden solche Visualisierungen in die Achs- oder Situationsansicht des Moduls TRA integriert,

könnten Entscheidungsträger kritische Abschnitte rasch identifizieren und gezielt in den Fokus nehmen. So wird unmittelbar sichtbar, wo eine vertiefte Untersuchung – etwa durch ein Ingenieurbüro – sinnvoll wäre.

Für die Teststrecke weissen die folgenden Abschnitte ein erhöhtes Risiko und Delta-Risiko auf:

- In Negative Achssegmentrichtung:
  T36-T50, T60-T92, T122-T130 und T154-T172
- Positive Achssegmentrichtung:
  T37-T51, T61-T103, T133-T139 und T165-T183

Anhand der Risikoberechnung und der zugrunde liegenden Werte kann ein Erhaltungsplaner einen Abschnitt wie T154–T172 gezielt genauer analysieren. In diesen Werten lassen sich wichtige Informationen erkennen. So wurde für diesen Abschnitt beispielsweise eine Wahrscheinlichkeit für ein externes Ereignis von 10^{-6} angesetzt, was auf die Hanglage zurückzuführen ist. In den meisten anderen Bereichen der Teststrecke ist diese Wahrscheinlichkeit kleiner angesetzt. Zudem würden bei einer präziseren Ermittlung externer Ereignisse und realistischeren Eintrittswahrscheinlichkeiten – etwa bei der Nähe zu einem Bach mit erhöhter Hochwassergefahr – Gefahren rasch sichtbar. Aufgrund der zunehmenden Häufigkeit von Starkregenereignissen könnten diese Wahrscheinlichkeiten sogar weiter steigen. Ebenso können bauliche Massnahmen, die Auswirkungen externer Ereignisse dämpfen, in der Risikoberechnung berücksichtigt werden. In diesem Abschnitt sind zudem die Nutzkosten höher geschätzt als auf dem übrigen Teil der Teststrecke, was zu dem höheren Risiko beiträgt, obwohl in der ersten Planungsperiode noch kein Delta-Risiko von 100 % erreicht wird. In den folgenden Perioden wird dieses Delta-Risiko jedoch erreicht, was sich durch die abgeschätzten Zustandsmerkmale der Trasse-Teilstücke erklären lässt.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass das berechnete Sofortmassnahmenrisiko ein geeignetes Instrument zur Unterstützung der Priorisierung in der Erhaltungsplanung darstellt. Die Berechnungen in diesem Beispiel basieren jedoch auf vielen Annahmen speziell bei der Risikoberechnung und die Abschätzung der Zustandsmerkmale für die Zukunft konnte nur mit sehr vereinfachten a priori-Funktionen vorgenommen werden.

	P1	P2	P3	P4	km
T2	1.0	1.9	2.7	3.3	
T4	2.4	2.7	3.0	3.3	
T6	0.2	0.5	0.9	1.3	
T8	2.0	3.0	3.7	4.3	
T10	0.2	0.4	0.8	1.1	
T12	1.8	2.7	3.3	3.9	
T14	0.2	0.4	0.8	1.1	
T16	0.2	0.4	0.8	1.1	
T18	0.2	0.4	0.8	1.1	
T20	0.2	0.4	0.8	1.1	
T22	0.2	0.4	0.8	1.1	
T24	0.2	0.4	0.7	1.1	
T26	0.2	0.7	1.3	2.0	
T28	0.3	0.8	1.4	2.1	
T30	1.6	2.2	2.8	3.4	
T32	0.3	0.8	1.5	2.1	
T34	0.2	0.5	0.9	1.2	
T36	0.9	2.4	3.8	4.8	
T38	1.5	4.0	6.2	7.4	
T40	1.6	4.1	6.3	7.6	
T42	1.5	3.9	6.1	7.3	10.2
T44	1.7	4.3	6.4	7.6	
T46	1.3	1.7	2.0	2.4	
T48	2.5	5.0	6.8	7.6	
T50	1.2	2.4	3.3	3.7	
T52	0.0	0.1	0.3	0.7	
T54	0.1	0.4	0.7	1.1	
T56	0.0	0.2	0.4	0.8	
T58	0.0	0.1	0.3	0.7	
T60	2.5	5.0	7.0	7.9	
T62	1.9	4.5	6.6	7.7	
T64	2.1	4.5	6.4	7.3	
T66	2.1	4.7	6.9	7.9	
T68	2.4	4.8	6.6	7.5	
T70	2.9	5.3	6.8	7.5	
T72	3.4	5.8	7.2	7.8	
T74	3.4	5.9	7.3	8.0	
T76	3.7	5.8	7.0	7.4	
T78	4.1	6.1	7.1	7.5	
T80	4.2	6.2	7.2	7.6	
T82	4.1	6.2	7.2	7.6	
T84	4.1	6.1	7.2	7.6	
T86	0.6	1.0	3.2	5.7	
T88	3.1	5.4	6.9	7.5	
T90	3.2	5.6	7.1	7.7	

	P1	P2	P3	P4	km
T92	4.8	5.5	6.8	7.4	
T94	0.2	0.6	1.2	1.9	20.5
T96	0.2	0.6	1.2	1.9	
T98	0.2	0.7	1.3	2.1	
T100	0.2	0.6	1.2	1.9	
T102	1.0	1.9	2.7	3.7	
T104	0.2	0.6	1.2	1.8	
T106	0.3	0.9	1.6	2.4	
T108	0.1	0.5	1.2	1.8	
T110	0.2	0.6	1.2	2.0	
T112	1.2	2.2	3.2	4.1	
T114	0.2	0.6	1.2	2.0	
T116	0.2	0.7	1.3	2.1	
T118	0.2	0.6	1.3	2.1	
T120	0.1	0.5	1.2	1.9	
T122	2.6	4.1	7.7	10.3	
T124	1.5	5.5	10.3	13.6	
T126	1.9	5.9	10.5	13.6	
T128	0.9	2.1	2.9	3.4	
T130	0.9	2.0	2.9	3.4	
T132	0.1	0.2	0.3	0.5	
T134	0.1	0.2	0.3	0.5	30.0
T136	0.1	0.2	0.4	0.5	
T138	0.1	0.2	0.3	0.5	
T140	6.4	9.3	11.9	21.0	
T142	0.6	1.4	2.5	3.9	
T144	0.3	1.2	2.5	4.0	
T146	1.1	1.6	2.7	4.2	
T148	2.3	4.4	6.8	9.0	
T150	0.4	1.4	2.7	4.3	
T152	0.8	1.8	3.9	10.8	
T154	1.7	3.0	11.3	22.4	
T156	10.7	13.6	15.8	17.6	
T158	5.6	6.2	6.9	7.8	
T160	6.4	7.4	8.5	9.8	
T162	5.9	10.8	15.4	20.8	
T164	12.7	21.8	27.4	29.7	
T166	12.0	20.9	26.7	29.2	
T168	11.0	20.2	26.4	29.1	
T170	5.5	6.1	10.8	20.4	40.1
T172	2.7	5.7	9.3	13.5	
T174	0.6	1.6	2.8	4.2	
T176	0.5	1.5	2.8	4.2	
T178	0.5	1.4	2.7	4.0	
T180	0.1	0.4	0.7	1.0	

Abbildung 88: Risiko in Mio. CHF für die Planungsperioden P1, P2, P3 und P4 der einzelnen Trassee-Teilstücke in negativer Achssegmentrichtung. Die orangefarbige, abgestufte Darstellung zeigt das Delta Risiko, wobei Weiss 0% und das dunkle Orange (z.B. bei T92) einen Wert von 100% oder mehr bedeutet.

	P1	P2	P3	P4	km
T3	5.0	6.5	7.3	7.6	
T5	1.0	1.6	2.1	2.6	
T7	0.2	0.5	0.9	1.3	
T9	2.4	3.3	4.0	4.5	
T11	0.2	0.5	0.8	1.2	
T13	2.8	3.7	4.3	4.8	
T15	0.2	0.4	0.8	1.1	
T17	0.2	0.4	0.8	1.2	
T19	0.2	0.4	0.8	1.2	
T21	0.2	0.4	0.8	1.1	
T23	0.2	0.5	0.8	1.2	
T25	0.2	0.5	0.8	1.2	
T27	0.3	0.9	1.5	2.2	
T29	0.3	0.8	1.4	2.1	
T31	1.9	2.7	3.7	4.7	
T33	0.6	1.3	2.1	2.9	
T35	0.3	0.7	1.1	1.5	
T37	1.1	2.5	3.9	4.9	
T39	1.7	4.2	6.4	7.5	
T41	1.7	4.3	6.5	7.6	
T43	1.7	3.9	6.1	7.3	10.2
T45	1.7	4.3	6.5	7.6	
T47	0.8	1.2	1.7	2.1	
T49	2.5	5.0	6.8	7.6	
T51	1.2	2.4	3.3	3.7	
T53	0.0	0.1	0.3	0.7	
T55	0.1	0.2	0.5	0.9	
T57	0.0	0.1	0.4	0.8	
T59	0.0	0.1	0.3	0.7	
T61	3.1	5.4	7.2	8.0	
T63	1.8	4.2	6.2	7.2	
T65	1.8	4.1	6.1	7.1	
T67	2.3	4.8	6.5	7.4	
T69	1.9	4.4	6.5	7.6	
T71	1.9	4.4	6.3	7.3	
T73	1.8	4.1	6.1	7.1	
T75	2.1	4.5	6.4	7.4	
T77	2.8	5.2	6.8	7.5	
T79	3.4	5.7	7.2	7.8	
T81	2.8	5.3	6.9	7.6	
T83	2.7	5.1	6.6	7.3	
T85	2.6	5.0	6.6	7.4	
T87	2.8	5.1	6.7	7.3	
T89	2.5	4.9	6.5	7.3	
T91	2.8	5.2	6.9	7.6	
T93	2.5	4.9	6.5	7.3	
T95	1.5	3.0	4.8	6.3	
T97	0.4	0.9	3.0	5.6	

	P1	P2	P3	P4	km
T99	2.4	4.8	6.5	7.4	
T101	2.5	4.9	6.7	7.6	
T103	5.3	5.6	6.8	7.4	
T105	0.2	0.6	1.3	2.0	20.5
T107	0.2	0.6	1.2	1.9	
T109	0.2	0.6	1.3	2.0	
T111	0.3	0.7	1.4	2.1	
T113	2.8	3.7	4.5	5.3	
T115	0.2	0.7	1.4	2.3	
T117	0.0	0.2	0.6	1.3	
T119	0.2	0.6	1.3	2.0	
T121	0.2	0.6	1.3	2.1	
T123	0.7	1.6	2.6	3.5	
T125	0.2	0.6	1.2	1.9	
T127	0.2	0.6	1.2	1.9	
T129	0.2	0.6	1.1	1.8	
T131	0.2	0.6	1.2	1.9	
T133	2.6	4.1	7.6	10.1	
T135	1.5	5.4	10.2	13.6	
T137	1.4	5.3	10.1	13.4	
T139	0.3	1.2	2.3	3.1	
T141	0.1	0.3	0.5	0.9	
T143	0.1	0.2	0.3	0.5	
T145	0.1	0.2	0.3	0.5	30.0
T147	0.1	0.2	0.4	1.1	
T149	0.1	0.2	0.3	0.5	
T151	0.8	2.4	4.3	6.3	
T153	0.9	2.1	3.6	5.1	
T155	0.7	1.8	3.1	4.6	
T157	0.8	1.9	3.4	6.0	
T159	2.7	5.5	8.2	10.5	
T161	0.8	2.0	3.5	5.0	
T163	3.6	4.9	6.3	9.9	
T165	3.0	11.6	22.0	28.1	
T167	12.0	15.2	17.4	19.1	
T169	5.0	5.8	6.5	7.5	
T171	5.0	5.6	6.4	7.4	
T173	12.1	21.3	27.1	29.5	
T175	12.4	21.6	27.3	29.6	
T177	11.6	20.8	26.7	29.2	
T179	1.2	3.3	11.2	20.4	
T181	5.9	6.8	11.9	21.4	40.1
T183	5.7	10.4	13.5	16.0	
T185	0.5	1.3	2.5	3.8	
T187	0.5	1.3	2.5	3.8	
T189	0.4	1.3	2.4	3.7	
T191	0.1	0.4	0.7	1.0	

Abbildung 89: Risiko in Mio. CHF für die Planungsperioden P1, P2, P3 und P4 der einzelnen Trassee-Teilstücke in positiver Achssegmentrichtung. Die orangefarbige, abgestufte Darstellung zeigt das Delta Risiko, wobei Weiss 0% und das dunkle Orange (z.B. bei T92) einen Wert von 100% oder mehr bedeutet.

Schritt 5, 6: Massnahmenstrategie und Kostenschätzung
Die Ergebnisse aus der Anwendung der Massnahmenstrategie und der Kostenschätzung sind im Anhang «Unterhaltsmassnahmen Trassee» für die Trassee-Teilstücke aufgelistet. Für jede Unterhaltsmassnahme (ED, EDB und TB) sind die Wahrscheinlichkeit, der auslösende Index, der Typ und die Kosten angegeben. In Abbildung 90 und Abbildung 91 ist für die Teststrecke getrennt nach Richtung die prognostizierte Unterhaltsmassnahme angegeben, ohne dass eine Zustands-Rücksetzfunktion berücksichtigt wurde, d. h., dass die Massnahme ausgeführt wird. Die Farbe gibt einen Anhaltspunkt für die Wahrscheinlichkeit der Notwendigkeit einer Unterhaltsmassnahme gemäss der in Tabelle 56 gezeigten Massnahmenstrategie. Hellgelb steht für einen Wert von 20 % (z. B. T86 in P1), dunkles Gelb für einen Wert von nahezu 100 % (z. B. T88 in P4).

Für alle Trassee-Teilstücke der Teststrecke wird über die vier Planungsperioden (ausgenommen T52) eine Unterhaltsmassnahme prognostiziert. Bei Betrachtung der Abschnitte T60–T92 bzw. T61–T103 fällt ein grosser Unterhaltsbedarf auf, der bereits in der ersten Planungsperiode beginnt. Diese Information ist insofern nützlich, als dass zwar keine Baustellen mit der Länge eines Trasse-Teilstücks gebildet werden, mithilfe der Prognose von Unterhaltsmassnahmen jedoch ein Muster identifiziert werden kann, das zeigt, wo Unterhaltsbedarf besteht. Der abgeschätzte Zustand würde ein ähnliches Bild zeigen, welcher im ASTRA zumindest für Erhaltungsobjekte in aggregierter Form zur Verfügung steht. Die Zustandsmerkmale allein geben jedoch noch keine Prognose über die Wahrscheinlichkeit, den Typ, den auslösenden Zustandsindex und die Kosten der Unterhaltsmassnahme. Das ist eine klare Verbesserung gegenüber dem heutigen Funktionsumfang des PMS des ASTRA, in dem keine Prognose von Unterhaltsmassnahmen möglich ist. Eine Erforschung geeigneter Massnahmenstrategien und a priori-Funktionen ist jedoch Voraussetzung für eine erfolgreiche Implementierung.

Schritt 7 und 8: Priorisierung und Ausgabe
Die Entscheidung über eine Priorisierung kann von vielen Aspekten beeinflusst werden, so dass es besser ist, diese Entscheidungen direkt den Entscheidungsträgern zu überlassen. Die Risikoabschätzung bereichert die Entscheidung als weitere Information.

Ausgabe all der gezeigten Resultate in einer angemessenen Form.

	P1	P2	P3	P4	km
T2	ED	ED	ED	TB	
T4	TB	TB	TB	TB	
T6			ED	ED	
T8	ED	ED	TB	TB	
T10			ED	ED	
T12	ED	ED	TB	TB	
T14			ED	ED	
T16			ED	ED	
T18			ED	ED	
T20			ED	ED	
T22			ED	ED	
T24			ED	ED	
T26			ED	ED	
T28			ED	ED	
T30				TB	
T32			ED	ED	
T34			ED	ED	
T36	ED	EDB	TB	TB	
T38	ED	EDB	TB	TB	
T40	ED	EDB	TB	TB	
T42	ED	EDB	TB	TB	10.2
T44	ED	EDB	TB	TB	
T46		ED	TB	TB	
T48	ED	TB	TB	TB	
T50	ED	TB	TB	TB	
T52					
T54			ED	ED	
T56			ED	ED	
T58				ED	
T60	ED	TB	TB	TB	
T62	ED	EDB	TB	TB	
T64	EDB	TB	TB	TB	
T66	ED	EDB	TB	TB	
T68	ED	TB	TB	TB	
T70	EDB	TB	TB	TB	
T72	EDB	TB	TB	TB	
T74	EDB	TB	TB	TB	
T76	EDB	TB	TB	TB	
T78	EDB	TB	TB	TB	
T80	EDB	TB	TB	TB	
T82	EDB	TB	TB	TB	
T84	EDB	TB	TB	TB	
T86	EDB	EDB	EDB	TB	
T88	EDB	TB	TB	TB	
T90	EDB	TB	TB	TB	

	P1	P2	P3	P4	km
T92	TB	TB	TB	TB	
T94				EDB	20.5
T96				EDB	
T98			ED	EDB	
T100				EDB	
T102	ED	ED	ED	EDB	
T104				EDB	
T106			ED	EDB	
T108				EDB	
T110				ED	
T112	ED	ED	ED	ED	
T114				ED	
T116				ED	
T118				ED	
T120				ED	
T122	ED	EDB	TB	TB	
T124	ED	EDB	TB	TB	
T126	ED	EDB	TB	TB	
T128	ED	TB	TB	TB	
T130	ED	TB	TB	TB	
T132			ED	ED	
T134			ED	ED	30.0
T136			ED	ED	
T138			ED	ED	
T140	ED	ED	TB	TB	
T142			EDB	EDB	
T144			EDB	EDB	
T146				EDB	
T148	ED	ED	ED	EDB	
T150			EDB	EDB	
T152		ED	ED	EDB	
T154	EDB	EDB	EDB	TB	
T156	ED	TB	TB	TB	
T158			TB	TB	
T160	TB	TB	TB	TB	
T162	ED	TB	TB	TB	
T164	EDB	TB	TB	TB	
T166	EDB	TB	TB	TB	
T168	EDB	TB	TB	TB	
T170	ED	ED	TB	TB	40.1
T172	ED	ED	ED	TB	
T174			ED	ED	
T176			ED	ED	
T178			ED	ED	
T180			ED	ED	

Abbildung 90: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmen des Trassees für die Planungsperioden P1-P4. Die gelbfarbige, abgestufte Darstellung zeigt die Massnahmenwahrscheinlichkeit: Hellgelb steht für 20% (z. B. T86 in P1), dunkles Gelb für einen Wert von fast 100 % (z. B. T88 in P4).

	P1	P2	P3	P4	km
T3	TB	TB	TB	TB	
T5	ED	ED	ED	TB	
T7			ED	ED	
T9	ED	TB	TB	TB	
T11			ED	ED	
T13	ED	TB	TB	TB	
T15			ED	ED	
T17			ED	ED	
T19			ED	ED	
T21			ED	ED	
T23			ED	ED	
T25			ED	ED	
T27			ED	ED	
T29			ED	ED	
T31	ED	ED	ED	TB	
T33			ED	ED	
T35			ED	ED	
T37	ED	EDB	TB	TB	
T39	ED	EDB	TB	TB	
T41	ED	EDB	TB	TB	
T43	ED	EDB	TB	TB	10.2
T45	ED	EDB	TB	TB	
T47	ED	ED	ED	TB	
T49	ED	TB	TB	TB	
T51	ED	TB	TB	TB	
T53				ED	
T55			ED	ED	
T57				ED	
T59				ED	
T61	ED	TB	TB	TB	
T63	ED	EDB	TB	TB	
T65	ED	EDB	TB	TB	
T67	ED	TB	TB	TB	
T69	ED	EDB	TB	TB	
T71	ED	EDB	TB	TB	
T73	ED	EDB	TB	TB	
T75	ED	TB	TB	TB	
T77	EDB	TB	TB	TB	
T79	EDB	TB	TB	TB	
T81	EDB	TB	TB	TB	
T83	EDB	TB	TB	TB	
T85	ED	TB	TB	TB	
T87	EDB	TB	TB	TB	
T89	ED	TB	TB	TB	
T91	EDB	TB	TB	TB	
T93	ED	TB	TB	TB	
T95	ED	ED	TB	TB	
T97	ED	ED	EDB	TB	

	P1	P2	P3	P4	km
T99	ED	TB	TB	TB	
T101	ED	TB	TB	TB	
T103	TB	TB	TB	TB	
T105				EDB	20.5
T107				ED	
T109			ED	EDB	
T111			ED	EDB	
T113	ED	TB	TB	TB	
T115		ED	ED	EDB	
T117				ED	
T119				EDB	
T121				EDB	
T123	ED	ED	ED	ED	
T125				ED	
T127				ED	
T129				EDB	
T131				EDB	
T133	ED	EDB	TB	TB	
T135	ED	EDB	TB	TB	
T137	ED	ED	TB	TB	
T139	ED	EDB	TB	TB	
T141			ED	EDB	
T143			EDB	EDB	
T145			ED	EDB	30.0
T147		EDB	EDB	EDB	
T149			EDB	EDB	
T151	ED	ED	EDB	EDB	
T153			EDB	EDB	
T155			EDB	EDB	
T157			EDB	EDB	
T159	ED	ED	EDB	TB	
T161			EDB	EDB	
T163		ED	ED	TB	
T165	EDB	EDB	TB	TB	
T167	EDB	TB	TB	TB	
T169			TB	TB	
T171			TB	TB	
T173	EDB	TB	TB	TB	
T175	EDB	TB	TB	TB	
T177	EDB	TB	TB	TB	
T179	ED	ED	EDB	TB	
T181	ED	TB	TB	TB	40.1
T183	EDB	TB	TB	TB	
T185			ED	ED	
T187			ED	ED	
T189			ED	ED	
T191			ED	ED	

Abbildung 91: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmen des Trassees für die Planungsperioden P1-P4. Die gelbfarbige, abgestufte Darstellung zeigt die Massnahmenwahrscheinlichkeit: Hellgelb steht für 20% (z. B. T59 in P4), dunkles Gelb für einen Wert von fast 100 % (z. B. T61 in P4).

7 Automatische Bündelung von Massnahmen

7.1 Ausgangslage

7.1.1 Ziel der Methodik

Nachdem der Handlungsbedarf definiert ist, kommt es im Prozessschritt «Vorschlag Projektidee (Massnahmentypen) bilden», zu ersten Bündelung von Unterhaltsmassnahmen (vgl. Kapitel 2.3.4), insbesondere für die Planungsperiode nach der aktuellen - ca. 8 bis 13 Jahre in der Zukunft. Es ist ein Schritt im Erhaltungsplanungsprozess, in dem Fachbereich übergreifend gearbeitet wird. Erhaltungsplaner verschiedener Fachbereiche kommen zusammen und besprechen, welche individuellen Massnahmen in denselben Erhaltungsprojekt[12] ausgeführt werden. Dabei spielt aber nicht nur der Zustand eine Rolle, sondern auch die Normkonformität (z.B. VSS und SIA) und der technische Standard im Bundesamt für Strassen (ASTRA, 2016).

In dieser Arbeit wird das Endprodukt, in dem Unterhaltsmassnahmen von Anlagen unterschiedlicher Art in Erhaltungsprojekten für eine Planungsperiode gebündelt sind, als Massnahmenprogramm bezeichnet. Ein Massnahmenprogramm sagt in diesem Kontext aus, wann und wo ein Erhaltungsprojekt ausgeführt wird, welche Unterhaltsmassnahmen Teil davon sind und welche Kosten zu erwarten sind. Der aktuelle qualitative Prozess zur Aufstellung des Massnahmenprogramms, der den Prozessschritt «Vorschlag Projektidee (Massnahmentypen) bilden» sowie die darauffolgenden Schritte umfasst (vgl. Kapitel 2.3), kann durch den Einsatz computergestützter Berechnungen jedoch effizienter und effektiver gestaltet werden.

In diesem Kapitel wird eine Methodik zur automatisierten, fachübergreifenden Aufstellung optimaler Massnahmenprogramme vorgestellt. Diese Massnahmenprogramme dienen als Hilfsmittel für die Sitzungen, in denen die Bedürfnisse der verschiedenen Fachbereiche koordiniert werden, und stellen sicher, dass keine Unterhaltsmassnahme vergessen geht. Sie dienen als Grundlage für eine grobe Kostenschätzung innerhalb einer Planungsperiode und unterstützen dabei, bestimmte Randbedingungen zu berücksichtigen, die sich das ASTRA setzt.

[12] Das ASTRA spricht von Erhaltungsprojekten, weil Massnahmen, die eine Wertvermehrung (Veränderung nach (VSS, 2022)) bewirken, explizit auch Projektinhalt sein können.

Das Ziel dieser Methodik ist es somit, optimale Massnahmenprogramme aufzustellen, die als Entscheidungshilfe bei der fachübergreifenden Bildung von Erhaltungsprojekten für eine Planungsperiode genutzt werden können.

Zwei abgrenzende Punkte sind dabei zu beachten:
1. Ein «optimales» Massnahmenprogramm ist im Sinne der mathematischen Optimierung zu verstehen – es maximiert die Zielfunktion und erfüllt deren Nebenbedingungen. Es handelt sich dabei um das theoretisch bestmögliche Massnahmenprogramm innerhalb des definierten Modells.
2. Der im ASTRA etablierte Begriff «Erhaltungsprojekt» wird hier ebenfalls verwendet, jedoch inhaltlich eingeschränkt: Er bezieht sich ausschliesslich auf die Bündelung von Unterhaltsmassnahmen.

Veränderungsmassnahmen werden im Rahmen dieser Methodik bewusst nicht berücksichtigt, obwohl sie gemäss ASTRA ebenfalls Teil eines Erhaltungsprojekts sein können. Teilweise treten sie ungeplant oder kurzfristig auf, etwa infolge neuer technischer Anforderungen, die zum Zeitpunkt der Projektideen noch nicht bestanden – wie beispielsweise das Installieren von Solarpanels entlang des Trassees. Teilweise sind sie jedoch auch planbar, etwa die Nachrüstung von Leitplanken oder die Anpassung von Standspuren auf Brücken aufgrund von Normänderungen. Wenn dazu Daten vorhanden sind, ist eine Berücksichtigung möglich.

7.1.2 Ausgangslage im ASTRA und der Forschung

Bei der Ausübung des baulichen Unterhalts der Nationalstrassen gelten nach Angaben vom ASTRA folgende strategische Vorgaben (Bezeichnung nach (ASTRA, 2002)): «Die Gesamterneuerung von Autobahnabschnitten erfolgt nach der übergeordneten Unterhaltsplanung des Bundes. Nach Vorgabe des Bundes sind Substanzerhaltungen und Ausbau der Nationalstrassen konzentriert in Erhaltungsprojekten von ca. 5 km Länge auszuführen. Die Distanz bis zum nächsten Abschnitt mit Baustelle muss mindestens 30 km betragen. Während den nächsten 15 Jahren nach Beendigung der Bauarbeiten darf es auf dem gleichen Teilstück keine Baustelle mit Verkehrsbehinderung mehr geben» (ASTRA, o. J. [b]).

Eine Methodik die Massnahmenprogramme aufstellt im Kontext der Schweizer Nationalstrassen ist somit daran gebunden, die anschliessend genannten strategischen Vorgaben bzw. Randbedingung einzuhalten. Ausgenommen sind dabei Massnahmen, die nur geringe oder gar keine Auswirkung auf den Verkehr haben.
- Baustellenlängen von ca. 5 km
- Baustellenabstände von mind. 30 km
- Baustellenfreie Zeitperiode von mind. 15 Jahre

Neben den strategischen Vorgaben definiert das ASTRA eine Unterhaltsphilosophie, die Einfluss auf die Aufstellung von Massnahmenprogramme hat. In der immer noch aktuelle Richtlinie «Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen» (ASTRA, 2002) werden die übergeordneten Ziele der Unterhaltsplanung der Nationalstrassen (UPlaNS) beschrieben: Weniger Baustellen und

Verkehrsbehinderungen durch die Bildung von Erhaltungsabschnitte[13], finanzielle Mittel optimiert einsetzen, langfristig funktionstüchtige Strassenverbindungen sicherstellen und die Leistungsfähigkeit der Nationalstrassen gewährleisten. Für das Aufstellung von Massnahmenprogrammen im ASTRA ist es darum wichtig:

- Eine Optimierung durchzuführen die volkswirtschaftliche Kostenüberlegungen zugrunde liegt. Die Betreiberkosten als auch die Leistungseinschränkungen (vorwiegend Nutzerkosten aufgrund zusätzlicher Reisezeit) sind damit zu minimieren.
- Erhaltungsabschnitte zur Ausführung eines Erhaltungsprojekte zu bilden, was zu weniger individuellen Baustellen und damit einhergehenden Verkehrsbehinderungen führt (ASTRA, 2002). Die Praxis ist es Erhaltungsabschnitte mit einer Länge von bis zu 15 km dynamisch oder statisch zu definieren. Der Bau wird jedoch in Bauetappen von ca. 5 km Länge («rollende Baustelle») aufgeteilt (ASTRA, 2016).
- Eine fachübergreifende Planung durchzuführen.
- Möglichst alle Unterhaltsmassnahmen auszuführen, wie sie gemäss der definierten Massnahmenstrategie vorgesehen sind, um das erwartete Leistungsniveau langfristig sicherzustellen.

7.1.2.1 Fachkonzept EMNS

Im ASTRA gab es bereits Bestrebungen, Erhaltungsprojekte fach- bzw. teilsystemübergreifend computergestützt und automatisiert zu entwickeln, um Erhaltungsplaner bei der fachübergreifenden Koordination zu unterstützen. Im Rahmen des Projekts „Erhaltungsmanagement Nationalstrassen" (EMNS) (Hajdin et al., 2013) wurde dies bis zur Stufe eines Fachkonzepts untersucht. Neben den fachlichen Grundlagen, die in einem Bericht zusammengefasst sind, wurde auch ein voll funktionsfähiger Prototyp entwickelt. Die Weiterentwicklung zu einer vollständig integrierten IT-Applikation wurde jedoch nach Erarbeitung des Fachkonzepts im Jahr 2013 nicht weiterverfolgt.

Die EMNS-Applikation dient als Instrument der Erhaltungsplanung und berechnet die Betreiber- und Nutzerkosten für einen gewählten Betrachtungsabschnitt und -zeitraum zur Bestimmung geeigneter Erhaltungsprojekte. Die Betreiberkosten der Erhaltungsmassnahmen an den jeweiligen Objekten werden direkt aus den entsprechenden Fachapplikationen übernommen. Die Nutzerkosten setzen sich aus erhöhter Reisezeit- und Unfallkosten zusammen. Ihre Berechnung erfordert eine Abschätzung der durch Baustellen verursachten zusätzlichen Reisezeiten im Netz. Zu diesem Zweck wird vorgeschlagen, Unternetzwerke mithilfe der Makrosimulation der Verkehrsflüsse (die Impedanz der Abschnitte wird mit der BPR[14]-Funktion modelliert) auszuwerten, um die zusätzliche Reisezeit zu bestimmen.

Das EMNS-Projekt war fortschrittlich und verfolgte eine ganzheitliche Vision zur fachübergreifenden Erhaltungsplanung. Es zeigte detaillierter auf, wie die Nutzerkosten berechnet werden können und wie die verschiedenen Fachapplikationen in eine Massnahmenbündelungsapplikation integriert werden können, bei welchem die Gesamtwirtschaftlichen Kosten optimiert werden. Dies wird für einen gewählten Betrachtungsabschnitt durchgeführt, indem eine Verlaufskurve der Gesamtkosten für alle möglichen Baustellenpositionen berechnet wird. So sind dem Erhaltungsplaner die

[13] In der Richtlinie von 2002 wird es noch als «Unterhaltsabschnitt» bezeichnet, doch der Begriff «Erhaltungsabschnitt» hat sich seither als Begriff etabliert. Unterhaltsabschnitte sind für den betrieblichen und nicht für den baulichen Unterhalt relevant.
[14] BPR = Bureau of Public Roads

beste Option und alternative Möglichkeiten für die Baustelleoptionen bekannt. Zu jeder Option stehen Informationen zu den Betreiber- und Nutzerkosten sowie zu deren Zustandekommen zur Verfügung.

7.1.2.2 Forschung

Da die Bildung von Erhaltungsprojekten und die Aufstellung des Massnahmenprogramms im ASTRA noch weitgehend qualitative erfolgt, wird in diesem Unterkapitel ein Blick in die Forschung geworfen, wie ein Massnahmenprogramm quantitativ entwickelt werden kann. Vereinfacht werden hier die erforschten Methoden in zwei Kategorien eingeteilt, den Bottom-up- und den Top-down-Ansatz. Beim Bottom-up-Ansatz werden die prognostizierten Unterhaltsmassnahmen in Erhaltungsprojekte gebündelt[15]. Beim Top-down-Ansatz werden die möglichen Unterhaltsabschnitte definiert, ohne spezifische Unterhaltsmassnahmen zu berücksichtigen.

Weit zurückreichende Forschung war mehrheitlich im Top-down-Ansatz angesiedelt. In der Arbeit von Chien & Schonfeld (2001) und Schonfeld & Chien (1999) ging es darum, die optimale Baustellenlänge zu bestimmen. Der Einfluss der Nutzerkosten auf die optimale Baustellenlänge stand im Fokus. Chen et al. (2005) baute auf diesen Arbeiten auf, um eine optimale Baustellenlänge zu bestimmen mit einem Algorithmus, welcher zusätzlich Verkehrsflüsse mit Simulated Annealing für eine Umleitungsmöglichkeit ermittelt. Aktueller wird auch die Baustellenanordnung untersucht auf Sicherheit und Reiszeitverlängerung, z.B. in Abdelmohsen & El-Rayes (2018). Auch die aktuelle Praxis, wie sie im «Handbuch Erhaltungsplanung» (ASTRA, 2016) beschrieben ist, sieht ein Vorgehen nach dem Top-down-Ansatz vor. Zunächst werden geeignete Erhaltungsabschnitte definiert, anschliessend werden die benötigten Unterhaltsmassnahmen gesucht, die ausgeführt werden können. Dabei gilt eine Rückkehrperiode von mehr als 15 Jahre.

Für die Bündelung von Unterhaltsmassnahmen ist der Bottom-up-Ansatz vielversprechender, weil in dem zweiten Schritt, die Abhängigkeiten untereinander berücksichtigt werden können, nachdem die Unterhaltsmassnahmen bestimmt wurden. Hajdin & Lindenmann (2007) formulierten Baustellenabschnitte als Minimierung der Langzeitkosten für Betreiber und Nutzer in einem binären linearen Optimierungsproblem, indem sie ein Netzwerkproblem formulierten. Die Nebenbedingungen erlauben die Berücksichtigung von Distanz- und Budgetlimits. Es handelt sich um eine Analyse auf Objektebene und wurde für eine Planungsperiode und einen Baustellenabschnitt demonstriert. Weitergeführt wurde diese Arbeit in Lethanh et al. (2018). Diese erlaubte es, alle Baustellenabschnitte bzw. Erhaltungsprojekte für eine Planungsperiode in einem Strassennetzwerk zu bestimmen. Basierend auf diesem Ansatz wurde in Burkhalter & Adey (2018) die Bestimmung von Massnahmenprogrammen angegangen, jedoch für Bahninfrastrukturnetzwerke. Der Nutzen wird dort als Risikoreduktion formuliert und Abhängigkeiten zwischen Objekten verschiedener Art werden berücksichtigt. Burkhalter & Adey (2021) bestreben in ihrer Arbeit eine systematische und quantitative Formulierung der Kosten-Nutzen-Analyse, da es keinen einheitlichen Ansatz dafür gibt. Diese Formulierung eignet sich für den Einsatz in Optimierungsberechnungen und ist damit geeignet für die Bestimmung von Massnahmenprogrammen von

[15] Idealerweise sind die Unterhaltsmassnahmen mit der Anwendung optimaler Massnahmenstrategien bestimmt.

Strassennetzwerken. Der Berechnungs- und Optimierungsansatz von Burkhalter & Adey wird in der hier vorgestellten Methodik (siehe Kapitel 7.2.3) verwendet.

7.1.3 Einordnung der Methodik im Erhaltungsplanungsprozess

Wie in der Zielformulierung beschrieben, soll die Methodik dabei helfen, ein optimales Massnahmenprogramm zu bestimmen, das als Entscheidungshilfe bei fachübergreifenden Koordinationssitzungen genutzt werden kann. Die Anwendung ist im Prozessschritt «Vorschlag Projektidee (Massnahmentypen) bilden» vorgesehen (siehe Kapitel 2.3.4).

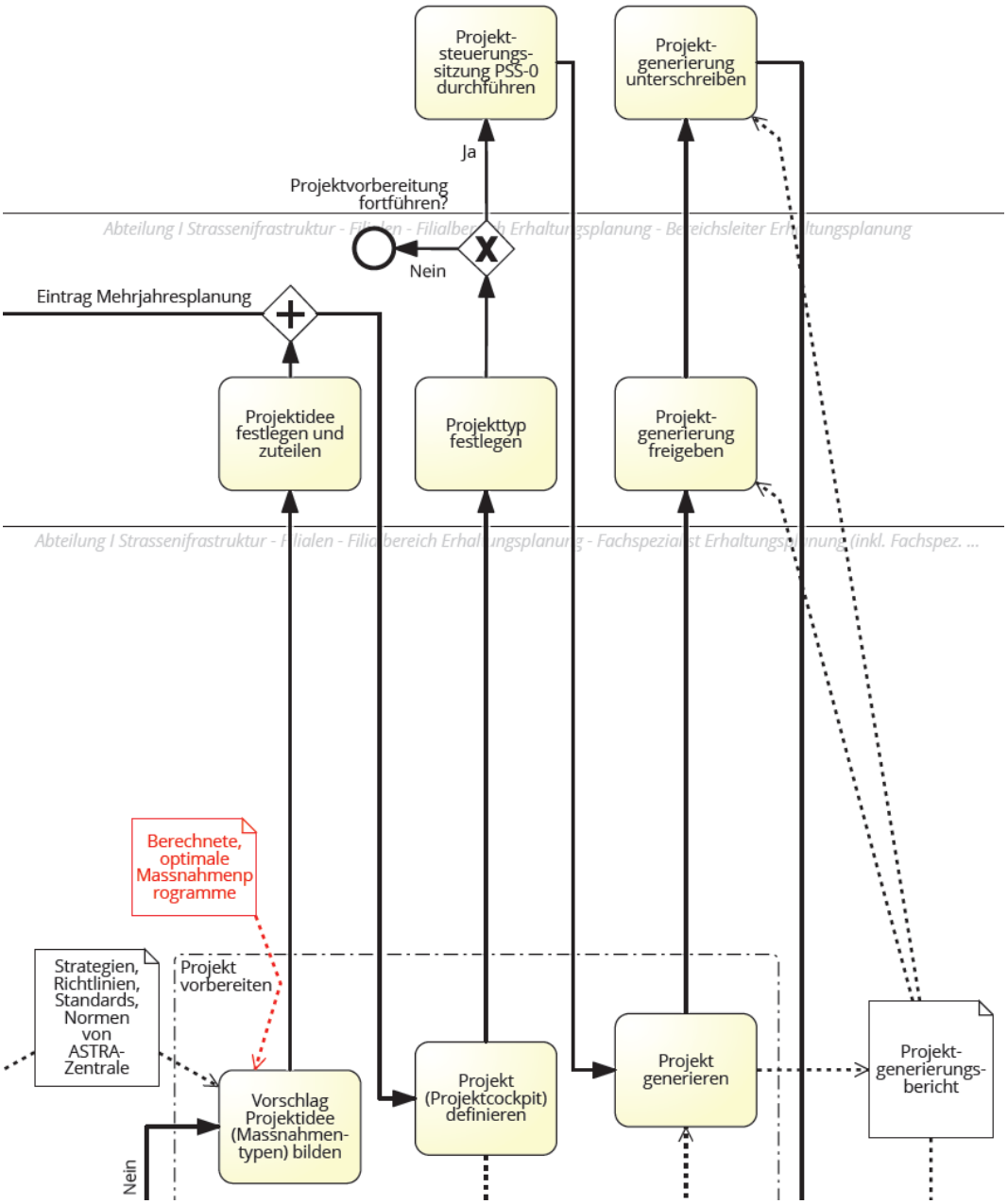


Abbildung 92: Ausschnitt aus dem Erhaltungsplanungsprozess mit der Einordnung der Methodik zur Bündelung von Massnahmen.

7.1.4 Automatisierte Aufstellung von Massnahmenprogramme

Aus den Prozessschritten «Handlungsbedarf definieren» und «Vorschlag Projektidee (Massnahmentypen) bilden» wird abgeleitet, in welchem Rahmen eine automatisierte Aufstellung von Massnahmenprogrammen die aktuelle Arbeitsweise in der Erhaltungsplanung des ASTRAs sinnvoll ergänzt. Jeder Fachbereich bestimmt vor einer fachübergreifenden Koordinationssitzung, wann eine Unterhaltsmassnahme ausgeführt werden soll. Da bei Brücken und Tunneln nicht alle Bauwerksteile gleichzeitig eine Unterhaltsmassnahme erfordern, ist es notwendig, diese zunächst auf Anlagenebene zeitlich zu gruppieren. Diese Gruppierung wird von der jeweiligen Erhaltungsplanung mithilfe von Erfahrungswerten oder Applikationen, die jetzt oder in der Zukunft zur Verfügung stehen, gemacht. Die Aufstellung eines Massnahmenprogramms kann für das ASTRA auf eine Planungsperiode von ca. 8-13 Jahren in der Zukunft beschränkt werden (vgl. Prozessschritt «Controllingsitzung durchführen»). Für diesen Zeitraum wird eine Finanzplanung gemacht und es ist bekannt, welche Unterhaltsmassnahmen ausgeführt und an das Projektmanagement übergeben werden sollten (vgl. Kapitel 2.3).

Für die Planungsperiode nach der aktuellen muss also ein Massnahmenprogramm entwickelt werden mit den Erhaltungsprojekten, die auszuführen sind. Das vereinfacht das Problem mathematisch, da implizit die Langzeitbetracht der Auswirkung (Kosten und Nutzen) einer Unterhaltsmassnahme schon vorliegt und diese bei der Gruppierung nicht mehr mit einfliessen muss. Idealerweise ist die Langzeitbetrachtung Teil der Massnahmenstrategien.

Das Problem wird wie folgt abgegrenzt und im Rahmen eines Fallbeispiels angewendet:

- **Anwendung an Anlagen unterschiedlicher Art**
  Im Fallbeispiel werden die Brücke, die Tunnel und das Trassee der Teststrecke berücksichtigt.
- **Analyse einer Planungsperiode**
  Im Fallbeispiel wird für die Planungsperiode der Zeitraum von Jahr 6 bis Jahr 10 in der Zukunft gewählt.
- **Bildung von Erhaltungsprojekten auf Anlagenebene**
  Die Kosten und Risiken einer Unterhaltsmassnahme an der Anlage sind für den Ausführungszeitpunkt nach Strategie, aber auch abweichend davon, bekannt.
- **Berücksichtigung der baustellenfreien Zeitperiode (Rückkehrperiode)**
  Im Fallbeispiel wird eine baustellenfreie Zeitperiode von 15 Jahren angenommen. Alle Massnahmen, die in den nächsten zehn Jahren ausgeführt werden sollen, werden vorgezogen.
- **Berücksichtigung der Mindestabstände zwischen Baustellen**
  Im Fallbeispiel wird ein Mindestabstand zwischen Baustellen von 10 km anstatt 30km berücksichtigt. Dies aufgrund der Länge der Teststrecke, die nur 42km ist.

7.2 Netzwerkabstraktion

Um die im Kapitel 7.2.3 vorgestellte Methodik zur Aufstellung von Massnahmenprogrammen anwenden zu können, ist eine Abstraktion des physischen Netzwerks erforderlich. Das heisst, es muss eine geeignete topologische Struktur definiert werden und es soll geklärt werden, was die verwendeten Begriffe bedeuten. Diese orientiert sich idealerweise an den bereits bestehenden Modellierungsabstraktionen des ASTRA, wird jedoch an bestimmten Stellen um zusätzliche Konzepte erweitert, um den Anforderungen der Methodik gerecht zu werden. Die in diesem Kapitel beschriebene Topologie wird exemplarisch für Brücken, Tunnel und das Trassee entwickelt, ist jedoch so konzipiert, dass sie bei Bedarf um weitere Infrastrukturanlagetypen erweitert werden kann. Weiter wird der Begriff Erhaltungsabschnitt für diese Arbeit definiert.

7.2.1 Topologische Struktur

Für die Formulierung des Optimierungsproblems muss das physische Netzwerk in einem ersten Abstraktionsschritt topologisch beschrieben werden – also, wie die einzelnen Bauanlagen und das Trassee miteinander verbunden und angeordnet sind. Nur so können computergestützte Algorithmen die Struktur und die Verknüpfungen zwischen den Anlagen korrekt verarbeiten. Zu diesem Zweck werden die Begriffe Achsen bzw. Achssegmente, Routen, Teilstücke, Anlagen und Nachbarn eingeführt:

- *Achsen* sind gegenüber der Definition im ASTRA mit einer kleinen Änderung definiert. Bei richtungsgetrennten Fahrbahnen wird zur Vereinfachung der Modellierung nur die «+»-Achse für die Netzwerkabstraktion berücksichtigt. Das Bezugssystem wird in Distanzangaben entlang des jeweiligen *Achssegments* vereinfacht.
- *Routen* beschreiben die jeweiligen Fahrtrichtungen entlang einer Achse bzw. eines Achssegments.
- *Teilstücke* sind statisch definierte Abschnitte entlang der Achse mit einer typischen Länge von ca. 500 m.
- *Anlagen* befinden sich innerhalb eines Teilstücks. Es wird zwischen Trassee-Teilstücken, Brückenanlagen und Tunnelanlagen unterschieden. Im Unterschied zu den Bauanlagen wird für beide Fahrtrichtungen bzw. Routen jeweils ein Trassee-Teilstück definiert. Der Begriff «Teilstück» wird bei Trasse-Anlagen bewusst verwendet, da diese stets entlang der Teilstückgrenzen definiert sind. Somit wird auch sprachlich die Assoziation hervorgehoben. In Tabelle 59 und Tabelle 60 sind beispielhaft Anlagen vom später gezeigten Fallbeispiel angeben. In diesen werden Trasse-Teilstücke mit «T», Brücken mit «B» und Tunnel mit «TU» abgekürzt.
- *Nachbarn* sind ausschliesslich Trassee-Teilstücke, die auf einer Route seriell aufeinanderfolgen und sind immer in die positive Achsenrichtung definiert. Nachbarn können aber nicht nur direkt aneinander liegen, sondern sind dies auch solange sie $\leq$ 1500 m Abstand haben von Endpunkt eines Trassee-Teilstückes zum anderen. Die Annahme, dass das Teilen von Fixkosten nicht nur für aufeinanderfolgende Trassee-Teilstücke möglich ist, führt zur Einführung dieser Abstandsregel.

Zur Veranschaulichung der gewählten topologischen Struktur ist in Abbildung 93 ein Luftbild mit überlagerter Darstellung der Modellierung gezeigt. Abgebildet sind die ersten Kilometer des N9-Abschnitts, der östlich des Autobahnkreuzes Villars-Sainte-Croix beginnt. Das Achssegment für die Teststrecke beginnt am Bezugspunkt 0 mit einer U-Distanz von 0 m und endet nach 41720 m am Bezugspunkt 420 mit einer U-Distanz von 500 m. Da die reale Distanz bei Teilstück 2 kürzer ist als es mit Bezugspunkt und U-Distanz zu erwarten wäre, muss für alle Teilstücke danach die Distanz vom Nullpunkt in Meter ermittelt werden, indem die Formel $Bezugspunkt \cdot 100m + UDistanz - 780m$ angewendet wird. Um diese Komplexität zu umgehen, werden Start und Ende eines Teilstücks als Positionsangabe «BP_U-Distanz» geschrieben, also 0_000 und 420_500. Das Achssegment selbst ist rot dargestellt. Die zugehörigen Routen sind durch einen Pfeil mit einem Vorzeichen (+/–) für die jeweilige Fahrtrichtung gekennzeichnet. Die N9 ist in Teilstücke unterteilt, die jeweils durch schwarze Querstriche markiert sind. Diese Teilstücke werden entlang der positiven Route nummeriert, wobei die Nummern in Blau dargestellt sind. Die drei Brückenanlagen sind mit weisser Schrift auf schwarzem Hintergrund beschriftet. Die Positionsangaben sind am oberen Bildrand dargestellt.

Weiter ist in Abbildung 94 die topologische Struktur auf einem Achsenband illustriert. Der Ausschnitt entspricht in etwa jenem in Abbildung 93. Zusätzlich wird dargestellt, welche Anlagen sich in einem Teilstück befinden. Ein Trasse-Teilstück, wie z.B. T16, setzt sich aus den Bewertungsflächen, also den vom ASTRA definierten Rechtecken der Fahrbahnoberflächen für die Zustandsangabe mit einer Grösse von ca. 3.5 m x 100 m, zusammen. Trasse-Teilstücke werden gebildet, um die Modellierung und Berechnungszeit zu vereinfachen bzw. zu verkürzen, was hier einem Modellierungsentscheid entspricht. Tabelle 59 zeigt die Anlagen tabellarisch, sowie die entsprechenden Nachbarn der Trassee-Teilstücke. Diese Modellierung erlaubt es, die Anlagen und Trasse-Teilstücke in einem Bottom-up-Ansatz zuerst einzeln zu betrachten und auf dieser Stufe Unterhaltsmassnahmen, z. B. auf Ebene der Bauwerksteile, aufeinander abzustimmen und danach als eine Unterhaltsmassnahme an der Anlage in die Netzbetrachtung einzubringen. Da die Rechenzeit gross werden kann, ist diese abgestufte Modellierung auf Anlagen- und danach auf Netzwerkebene von Vorteil.

Die Teilstücke sind stets entlang der Grenzen der Bewertungsflächen definiert[16]. Das erleichtert die Zuordnung der Zustandsindizes zu einem Trassee-Teilstück, erfasst jedoch nicht den genauen Übergang von Trasse zu einer Bauanlage. Die Auswirkung kann an einem Beispiel gezeigt werden: B1, die Brückenanlage *Pont sur la Sorge*, hat in Tabelle 59 eine Länge von 210 m angegeben, die Brücke ist in Realität aber 184.6 m lang. Die Teilstücke wurden also zuerst für die Bauanlagen, also Brücken und Tunnel, definiert und anschliessend wurden die Distanzen dazwischen in Längen von ca. 100 m bis 1000 m, meist jedoch 500 m, als Teilstücke frei modelliert. In einer Implementierung im ASTRA wird empfohlen, die modellierten Teilstücke an Merkmalen des Trasses wie Belagsaufbau, Einbaudatum, Fahrbahnübergänge, Tunnelportale und - wie heute massgebend - Zustand zu orientieren.

[16] Da die Bewertungsflächendefinition des ASTRAs über die Jahre und den Index variieren, wurde der Index I0 und das Inspektionsjahr 2021 als Ausgangslage für das Fallbeispiel genommen. Die Grenzen wurden entlang der Achse auf 10m gerundet.

Da Nachbarn nur in positiver Achsenrichtung und jeweils nur für eine Route definiert sind, ergeben sich für das Trasse-Teilstück T2 beispielsweise die Nachbarn T4, T6 und T8, die alle noch im festgelegten Abstand von maximal 1500 m liegen (vgl. Tabelle 59). Die Nachbarn werden definiert, um später erfassen zu können, welche Anlagen untereinander Fixkosten teilen können. Im Fallbeispiel wird dies nur für das Trassee berücksichtigt, obwohl potenziell auch zwischen zwei Brücken im gleichen Erhaltungsprojekt oder zwischen Trassee und Brücken im gleichen Erhaltungsprojekt Fixkosten geteilt werden könnten.

Eine Besonderheit ist, dass die Fahrbahnen auf Brücken und in Tunneln auch als Trassee-Teilstücke definiert sind, da sich der Belag auf Brücken und in manchen Fällen auch der Belag in Tunneln von dem Belag auf der freien Strecke unterscheiden. Bei der Modellierung wurde entschieden, dass es in den Daten keine Lücken im Trassee geben darf, weshalb auch für Brücken und Tunnel Trassee-Teilstücke definiert sind. Es wird jedoch sichergestellt, dass Trassee-Teilstücke auf Brücken und in Tunneln keine Unterhaltsmassnahmen erhalten. Sie sind lediglich für die topologische Struktur relevant und haben keinen Einfluss auf die Optimierung.

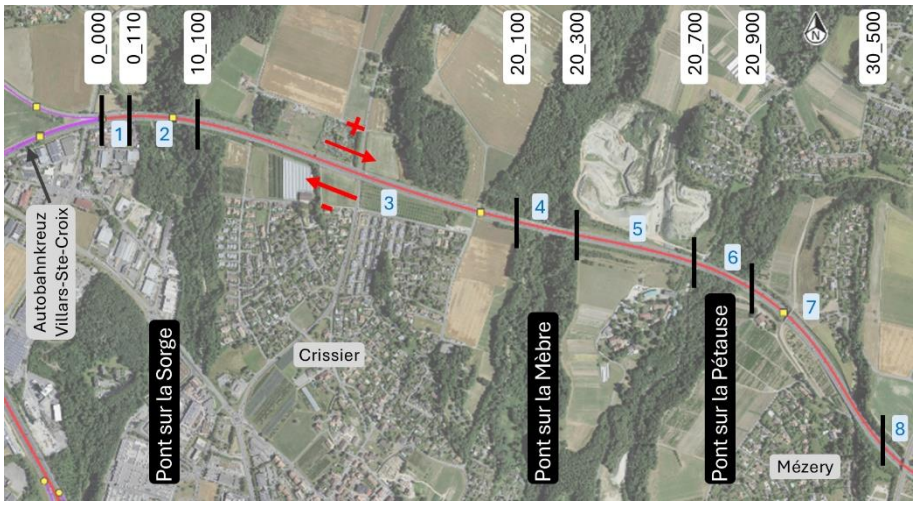


Abbildung 93: Topologische Modellierung der ersten Kilometer der Teststrecke mit einem Luftbild im Hintergrund.

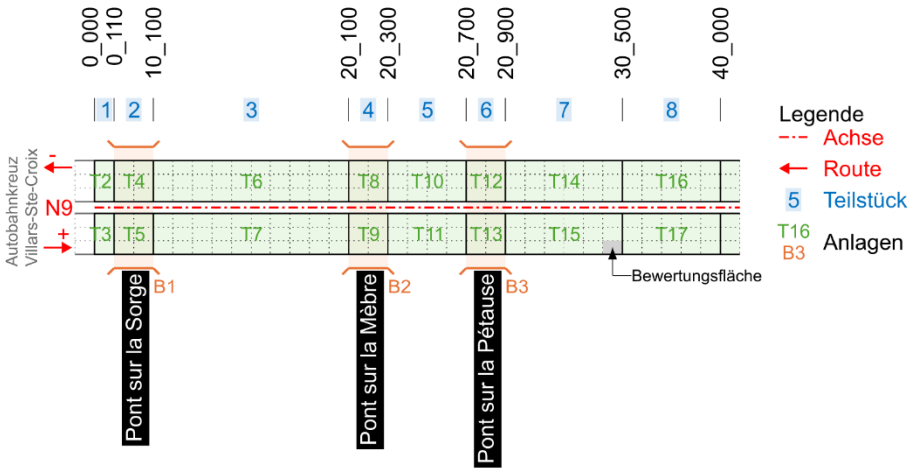


Abbildung 94: Schematische Darstellung der topologischen Modellierung der ersten Kilometer der Teststrecke.

Auszug aus der Topologie

Achse	Teil-stück Nr.	Start	Ende	Länge [m]	Anlagetyp	Route	ID	Nachbarn
N9	1	0_000	0_110	110	Trassee-Teilstück	-	T2	T4, T6, T8
						+	T3	T5, T7, T9
	2	0_110	10_100	210	Trassee-Teilstück	-	T4	T6, T8
						+	T5	T7, T9
					Brücke (Pont sur la Sorge)	+/-	B1	-
	3	10_100	20_100	1000	Trassee-Teilstück	-	T6	T8, T10, T12, T14
						+	T7	T9, T11, T13, T15
	4	20_100	20_300	200	Trassee-Teilstück	-	T8	T10, T12, T14
						+	T9	T11, T13, T15
					Brücke (Pont sur la Mèbre)	+/-	B2	-
	5	20_300	20_700	400	Trassee-Teilstück	-	T10	T12, T14, T16
						+	T11	T13, T15, T17
	6	20_700	20_900	200	Trassee-Teilstück	-	T12	T14, T16
						+	T13	T15, T17
					Brücke (Pont sur la Pé-tause)	+/-	B3	-
	7	20_900	30_500	600	Trassee-Teilstück	-	T14	T16, T18, T20
						+	T15	T17, T19, T21
	8	30_500	40_000	500	Trassee-Teilstück	-	T16	T18, T20, T22
						+	T17	T19, T21, T23

Tabelle 59: Auszug aus den Daten der topologischen Modellierung der Teststrecke mit den Teilstücken und Anlagen; der Route, der Position und den Nachbaren.

7.2.2 Erhaltungsabschnitt

Damit die Anlagen in ein Erhaltungsprojekt gebündelt werden können, muss zunächst für die Methodik definiert werden, wie sich ein solches Erhaltungsprojekt entlang der Achse ausdehnen kann. Aufgrund der erwähnten Philosophie der rollenden Baustellen beim ASTRA werden die Erhaltungsabschnitte entlang der Achse mit Längen von ca. 5, 10 oder 15 km definiert. Ein Erhaltungsabschnitt beginnt und endet dabei immer an Teilstückgrenzen, was die Kompatibilität mit der Topologie sicherstellt. In positiver Achsenrichtung kann bei jedem neuen Teilstückbeginn auch eine neue Erhaltungsabschnittsoption definiert werden, was aber aus Gründen der Berechnungszeit im Fallbeispiel nicht gemacht wird. Um die Berechnungszeit zu reduzieren, wird mindestens eine Länge von 2000 m belassen, bis eine neuer möglicher Erhaltungsabschnitt beginnen kann. Ein Erhaltungsabschnitt ist streng genommen nicht dasselbe wie ein physisch existierender Baustellenabschnitt auf der Strecke. Ein Erhaltungsabschnitt ist entlang der Teilstückgrenzen definiert. Ein Baustellenabschnitt beginnt und endet

hingegen mit der geänderten Verkehrsführung, wobei die zu unterhaltenden Anlagen dazwischen liegen. Bei längeren Erhaltungsabschnitten „rollt" die Baustelle zusätzlich entlang des Erhaltungsabschnitts. Trotz dieser Unterschiede wird die Berechnung der Nutzerkosten mit der Länge des Erhaltungsabschnitts angenähert. Idealisiert und stark vereinfacht wird davon ausgegangen, dass stets die vom ASTRA angestrebte 4+0-Verkehrsführung realisiert werden kann. In der Modellierung erlaubt diese Annahme, dass entlang derselben Route Arbeiten als gleichzeitig ausführbar angenommen werden können, wodurch der reduzierten Bauzeit Rechnung getragen wird. Abbildung 95 zeigt auf einem Achsenband, zwei Optionen eines Erhaltungsabschnitts und wie diese definiert sind, sowie die darin enthaltenen Teilstücke und Anlagen. Tabelle 60 listet eine kleine Auswahl an Erhaltungsabschnittsoptionen und die darin enthaltenen Anlagen.

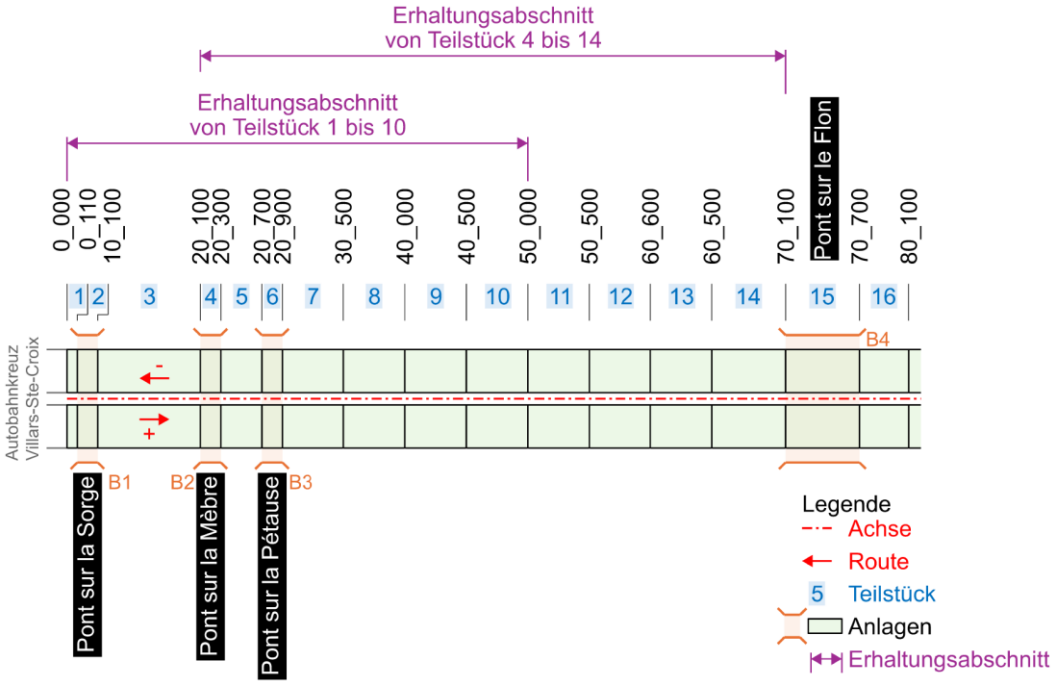


Abbildung 95: Schematische Darstellung der Erhaltungsabschnittsoptionen der ersten Kilometer der Teststrecke.

Auszug aus den Erhaltungsabschnittsoptionen

Achssegment	Teilstück Nr.	Start	Ende	Route	Anlagen
N9 von Villars-Ste-Croix	1-10	0_000	50_000	-	T2, T4, ..., T20
				+	T3, T5, …, T21
				+/-	B1, B2, B3
	1-21	0_000	100_200	-	T2, T4, ..., T42
				+	T3, T5, …, T43
				+/-	B1, B2, …, B6
	1-30	0_000	150_000	-	T2, T4, ..., T62
				+	T3, T5, …, T65 B9
				+/-	B1, B2, …, B8 TU1
	4-14	20_100	70_100	-	T8, T10, …, T28
				+	T9, T11, …, T29
				+/-	B2, B3
	4-26	20_100	120_500	-	T8, T10, …, T52
				+	T9, T11, …, T53
				+/-	B4, B5, …, B7 TU1
	4-36	20_100	170_500	-	T8, T10, …, T74
				+	T9, T11, …, T85 B9, B10, B12
				+/-	B4, B5, …, B8, B11 TU1, TU2, TU3

Tabelle 60: Auszug aus den Erhaltungsabschnittsoptionen entlang der Teststrecke für die ersten 17 Kilometer.

7.2.3 Rückkehrperiode- und Baustellenabstandsbedingung

Für die Berücksichtigung der vom ASTRA geforderten minimalen Rückkehrperioden- und Baustellenabstandsbedingung wird das in der Methodik vorgestellte Optimierungsproblem in mehrere Optimierungsszenarien unterteilt. Dies geschieht mit zwei Anpassungen:

1. Ein Szenario enthält nur Erhaltungsabschnitte, welche die Abstandsbedingung einhalten. Nicht zugelassene Baustellenabstände sind damit automatisch ausgeschlossen. Für die Teststrecke wird ein Abstand von mind. 10 km gewählt anstelle den vom ASTRA vorgeschriebenen 30 km.
2. Um die baustellenfreie Zeitperiode bzw. die minimale Rückkehrperiode für einen Erhaltungsabschnitt einzuhalten, werden Massnahmen vorgezogen. Es wird davon ausgegangen, dass alle Massnahmen, die in den nächsten zehn Jahren ausgeführt werden sollen, vorgezogen werden und spätere Massnahmen auf das nächstmögliche Zeitfenster verschoben werden. So kann die Vorgabe des ASTRA erfüllt werden, wonach eine Rückkehrperiode von mindestens 15 Jahren bestehen soll für einen Erhaltungsabschnitt.

In Tabelle 61 sind Beispiele für Szenarien zu sehen. Ein Szenario kann einen oder mehrere Erhaltungsabschnitte enthalten. Für das Fallbeispiel werden jedoch nur Szenarien mit einem oder zwei Erhaltungsabschnitten berücksichtigt. Enthält ein Szenario beispielsweise zwei Erhaltungsabschnitte, wird ein Abstand von mindestens 10 km eingehalten. Neben den in Tabelle 61 gezeigten Szenarien werden im Fallbeispiel noch ca. 100 andere ausgewertet. Zunächst wird für jedes Szenario $s \in S$ der maximale Nettonutzen Z_s durch Optimierung der szenariospezifischen Entscheidungsvariablen bestimmt. Anschliessend wird das Szenario mit dem höchsten (optimalen) Nettonutzen ausgewählt: $Z^{opt} = \max_{s \in S}\{Max\ Z_s\}$.

Erhaltungsabschnitte von Szenarien

Szenario Bsp…	Erhaltungsabschnitt mit Teilstück Nr.	Start	Ende	Länge $[m]$
1	1-10	0_000	50_000	4220
2	4-14	20_100	70_100	5000
	37-50	170_500	220_500	5000
3	10-20	40_500	90_900	5400
	51-60	220_500	270_500	5000
4	14-24	60_500	110_700	5200
	63-73	280_500	330_500	5000

Tabelle 61: Vier beispielhafte Szenarien und deren Erhaltungsabschnitte.

7.3 Methodik

7.3.1 Berechnung des Nettonutzens

Das optimale Massnahmenprogramm wird als jenes definiert, dessen Ziel die Maximierung des Nettonutzens ist. Der Nettonutzen wird als Differenz zwischen dem aufzustellenden Massnahmenprogramm und einem Referenzprogramm berechnet (Burkhalter & Adey, 2021), wie in Gleichung (42) dargestellt. Der Nutzen wird dabei als die Reduktion des Risikos zwischen den beiden genannten Massnahmenprogrammen definiert. Die Kosten entsprechen der Differenz der durch die jeweiligen Unterhaltsmassnahmen verursachten Kosten.

$$Max\ Nettonutzen = \ Nutzen - Kosten = \left(R_{MP} - R_{Ref}\right) - \left(C_{MP} - C_{Ref}\right), \quad (42)$$

wobei

R_{MP} das Risiko des aufzustellenden Massnahmenprogramms ist,

R_{Ref} das Risiko des Referenzmassnahmenprogramms ist,

C_{MP} die Kosten des aufzustellenden Massnahmenprogramms sind

und

C_{Ref} die Kosten des Referenzmassnahmenprogramms sind.

Bei der Wahl des Referenzprogramms wird der Ansatz verfolgt, dass die Unterhaltsmassnahme an jeder Anlage nach minimalen, individuell optimierten Lebenszykluskosten in einem Einzelprojekt ausgeführt wird und die Nutzerkosten wie im aufzustellenden Massnahmenprogramm berechnet werden. Dieser Ansatz beziffert den

Nettonutzen, der durch die Bündelung von Massnahmen entsteht, sowie wenn Unterhaltsmassnahmen vom individuell optimalen Massnahmenzeitpunk abweichen.

Da das Risiko für die gesamte Bauanlage ermittelt wird, muss Gleichung (42) auf Ebene der Bauanlagen und nicht auf Ebene einzelner Teile, wie beispielsweise Bauwerksteile bei Brücken oder Belagsschichten bei Fahrbahnen, berechnet werden. Dies erfordert eine zeitliche Gruppierung der Unterhaltsmassnahmen auf Ebene des Bauwerks. Wie in der Problemabgrenzung beschrieben, wird diese Gruppierung derzeit durch die Erhaltungsplanung gemacht, könnte aber auch über eine Optimierung bestimmt werden. Deshalb wird im Folgenden davon ausgegangen, dass eine zeitliche Gruppierung der Unterhaltsmassnahmen auf Bauwerks- bzw. Bauanlagenebene als Input bereits vorliegt. Zwei hilfreiche Quellen zur mathematischen Bestimmung dieser Gruppierung sind Mirzaei & Adey (2015, 2018).

Die Berechnung des Nutzens gemäss Gleichung (42) setzt die Definition des Risikos eines Massnahmenprogramms beziehungsweise zwischen zwei Programmen voraus. In der vorliegenden Methodik wird vorgeschlagen, die Risikodifferenz als **Reduktion des Risikos von Sofortmassnahmen** an den Anlagen zu berechnen, wie in Kapitel 6 vorgeschlagen. Der zugrunde liegende Gedanke ist, dass der Zustand der Infrastruktur die Wahrscheinlichkeit von Sofortmassnahmen und somit ungeplante Einschränkungen der Strassenkapazität bzw. der erbrachten Leistung beeinflusst.

Die Allgemeine Formulierung in Gleichung (42) wird verfeinert zu Gleichungen (43), die später genutzt werden, wenn das Problem mit einer Gemischt-ganzzahligen Optimierung gelöst wird.

$$\begin{aligned} Max\ Nettonutzen \\ = \left(R_{MP} - R_{Ref}\right) \\ - \left(C_{MP,Betreiber} + C_{MP,Nutzer} - C_{Ref,Betreiber} - C_{Ref,Nutzer}\right), \end{aligned} \tag{43}$$

wobei

R_{MP}	das Risiko des aufzustellenden Massnahmenprogramms ist,
R_{Ref}	das Risiko des Referenzmassnahmenprogramms ist,
$C_{MP,Betreiber}$	die Betreiberkosten des aufzustellenden Massnahmenprogramms sind,
$C_{MP,Nutzer}$	die Nutzerkosten des aufzustellenden Massnahmenprogramms sind,
$C_{Ref,Betreiber}$	die Betreiberkosten des Referenzmassnahmenprogramms sind und
$C_{Ref,Nutzer}$	die Nutzerkosten des Referenzmassnahmenprogramms sind.

Die Betreiberkosten werden als Summe der fixen und variablen Kosten berechnet (siehe Gleichung (44)). Aufgrund der Bündelung der Unterhaltsmassnahmen in Erhaltungsprojekte können gewisse Fixkosten geteilt werden. Wie dies berücksichtigt wird, ist in Kapitel 7.3.2 genauer beschrieben.

$$C_{Betreiber} = \sum_{p}^{P} c_{fix,p} + \sum_{p}^{P} \sum_{u}^{U} c_{var,p,u}, \tag{44}$$

wobei

$c_{fix,p}$ die Fixkosten für ein Erhaltungsprojekt p sind und

$c_{var,u}$ die variablen Kosten sind für die Unterhaltsmassnahme u an einer Anlage innerhalb des Erhaltungsprojekts p.

Die Kosten für die Nutzer werden als Summe der durch die Erhaltungsprojekte verursachten zusätzlichen Reisezeiten angenommen. Beeinflussungen der Baustellenabschnitte untereinander werden aufgrund der grossen Distanzen zwischen diesen vernachlässigt. Wie die Nutzerkosten am besten berücksichtigt werden und welche Einflüsse dabei eine Rolle spielen, ist ein komplexes Thema, das in dieser Arbeit nicht vertieft behandelt wird.

$$C_{Nutzer} = \sum_{p}^{P} \left(LLOS_p \cdot d_p \cdot VOT \right), \tag{45}$$

wobei

$LLOS_p$* die totale zusätzlichen Reisezeit (loss of level of service) in Stunden pro Tag aufgrund des Erhaltungsprojekts p ist,

d_p die Dauer in Tagen von Erhaltungsprojekt p ist und

VOT der Wert der Reisezeit (value of travel time) in CHF pro Stunde ist.

7.3.1.1 Bestimmung der Eingangsgrössen

Das Risiko und die Kosten eines Massnahmenprogramms sollen auf Grundlage der in den Fachapplikationen ermittelten Risiken und Kosten berechnet werden. Falls diese Informationen noch nicht vorliegen, müssen die Fachapplikationen entsprechend ergänzt werden. Die Berechnung der Eingangsgrössen für das Sofortmassnahmenrisiko und die Kosten von Unterhaltsmassnahmen wurde bereits in Kapitel 6.2 für Brücken sowie in Kapitel 6.3 für das Trassee gezeigt. Für Tunnel wird die Vorgehensweise von den Brücken angewendet, lediglich um Werte für das Fallbeispiel zu bestimmen. Wie die Prognose von Unterhaltsmassnahmen und Risikobewertung im Erhaltungsmanagement von bergmännischem Tunnel aussehen könnte wird im Forschungsprojekt «Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln - EP4 Entwicklung eines Entscheidungsmodells» (Hajdin et al., 2025) untersucht.

Die Nutzerkostenberechnung (Gleichung (45)) benötigt neben einer Abschätzung zur Ausführungsdauer eines Erhaltungsprojekts (d_p) und dem Wert der Reisezeit (VOT) auch eine Einschätzung, wie viel zusätzliche Reisezeit durch das Erhaltungsprojekt $(LLOS_p)$ – also die Verkehrsführung im Baustellenbereich – verursacht wird. Vorweg kann schon gesagt werden, dass das aufzustellende Massnahmenprogramm gleichzeitig laufende Unterhaltsmassnahmen an Anlagen von einem anderen Typ, z.B. Arbeiten am Trassee und an der Brücke, zulässt und so gegenüber dem Referenzprogramm die Ausführungsdauer eines Erhaltungsprojekts verringern kann.

Die zusätzliche Reisezeit wird mithilfe der BPR-Funktion (46) (Division, 1964; Gore et al., 2023), dem täglichen Verkehrsvolumen, dem Besetzungsgrad und der

Baustellenlänge angenähert. Die Geschwindigkeit auf einer belasteten Strecke v wird berechnet als Funktion der Geschwindigkeit auf der unbelasteten Strecke v_0, der Streckenbelastung q, der Abschnittskapazität c und den Modelparameter α, β_1, β_2, wobei die Formulierung und Werte von Vrtic et al., (2018) und VSS (2019a) übernommen werden. Die Werte wurden für die freie Strecke ermittelt und nicht für Baustellenbereiche. Dies verdeutlicht, dass die Anwendung der BPR-Funktion in diesem Kontext nicht als exakte Abbildung der Baustellensituation zu verstehen ist, sondern vielmehr dazu dient, eine Annäherung der zusätzlichen Reisezeit zu ermöglichen. Für eine Implementierung im ASTRA ist daher eine vertiefte Analyse der Reisezeitverluste in Baustellenbereichen erforderlich. Eine hilfreiche Grundlage hierfür bietet die Dissertation von Schiffmann (2014), die im Rahmen eines Forschungsauftrags für ASTRA entstanden ist.

$$v = \begin{cases} \dfrac{v_0}{\left(1 + \alpha \cdot \left(\dfrac{q}{c}\right)^{\beta_1}\right)}, wenn\ q < c \\ \dfrac{v_0}{\left(1 + \alpha \cdot \left(\dfrac{q}{c}\right)^{\beta_2}\right)}, wenn\ q \geq c \end{cases} \tag{46}$$

Modelparameter BPR-Funktion

$v_{signalisiert}$	$80\ km/h$	$100\ km/h$	$120\ km/h$
v_0	$79\ km/h$	$100\ km/h$	$117\ km/h$
α	0.31	0.23	0.27
β_1	2.7	2.2	2.6
β_2	5.0	5.3	5.9
${c_{1-Spurig}}^*$	$2000veh/h$	-	-
${c_{2-Spurig}}^*$	$4000veh/h$	$4000veh/h$	$4000veh/h$
${c_{3-Spurig}}^*$	$5800veh/h$	$5800veh/h$	$5800veh/h$

Tabelle 62: Modelparameter für die BPR-Funktion nach Vrtic et al. (2018).

Die Berechnung der totalen zusätzlichen Reisezeit pro Tag erfolgt mit Gleichung (47), also die Differenz der totalen Reisezeit pro Tag auf einem Erhaltungsabschnitt mit und ohne Geschwindigkeitsreduktion.

$$LLOS_p = \left(\frac{l_p}{v_{rand,80}} \cdot q_{rand} \cdot d_{rand} + \frac{l_p}{v_{spitze,80}} \cdot q_{spitze} \cdot d_{spitze}\right) - \left(\frac{l_p}{v_{rand,120}} \cdot q_{rand} \cdot d_{rand} + \frac{l_p}{v_{spitze,120}} \cdot q_{spitze} \cdot d_{spitze}\right) \tag{47}$$

wobei

$LLOS_p$ die totale zusätzlichen Reisezeit in Stunden pro Tag aufgrund des Erhaltungsprojekts p ist,

l_p die Erhaltungsabschnittslänge in km von Erhaltungsprojekt p ist,

$v_{rand,80}$ $v_{rand,120}$	die mit der BPR-Funktion ermittelte Geschwindigkeit im Erhaltungsabschnitt in der Randzeit des Tages mit einer Signalisierten Geschwindigkeit von $80\frac{km}{h}$ bzw. $120\frac{km}{h}$ ist,
$v_{spitze,80}$ $v_{spitze,120}$	die mit der BPR-Funktion ermittelte Geschwindigkeit im Erhaltungsabschnitt in der Spitzenzeit des Tages mit einer Signalisierten Geschwindigkeit von $80\frac{km}{h}$ bzw. $120\frac{km}{h}$ ist,
q_{rand} q_{spitze}	die Fahrzeuge pro Stunde sind in der Randzeit bzw. Spitzenzeit ist,
d_{rand} d_{spitze}	die Dauer in Stunden ist der Randzeit bzw. Spitzenzeit und $(24h - d_{rand}) = d_{spitze}$ gilt.

Die Annahmen für die Berechnung der Nutzerkosten sind im folgenden Unterkapitel 7.3.1.2 aufgelistet.

7.3.1.2 Annahmen bei der Nutzerkostenberechnung eines Erhaltungsabschnitts

Zur besseren Übersicht über die Annahmen in der Ermittlung der Nutzerkosten ist in Tabelle 63 jede Inputvariabel kommentiert.

Variablen der Nutzerkostenberechnung

Variable	Kommentar	Quelle
d_p	Die Dauer eines Erhaltungsprojekts. Abhängig von den enthaltenen Massnahmen in Tagen.	-
$VOT = 30.6\frac{CHF}{h}$	Der Wert Reisezeit pro Stunde. Angenommen mit einem Wert aus der Region Zürich.	(Schmid et al., 2021)
l_p	Die Länge des Erhaltungsabschnitts von Erhaltungsprojekt p.	Kapitel 7.2
q_{rand} q_{spitze}	Der durchschnitte tägliche Verkehr pro Stunde wird in Abhängigkeit vom DTV für zwei Zeitbereiche, die Randzeit und die Spitzenzeit definiert. Erhaltungsabschnittes sind jeweils einer Zähstelle manuell zugeordnet. Es wird angenommen, dass 65% des DTV in den Randzeiten auftritt und 35% in den Spitzenzeiten.	(ASTRA, 2023b)
d_{rand} d_{spitze}	Die Dauer der Rand- und Spitzenzeit wird jeweils mit 20h bzw. 4h angenommen.	-
$v_{rand,80}$ $v_{spitze,80}$ $v_{rand,120}$ $v_{spitze,120}$.	Die Geschwindigkeiten werden mit Gleichung (46) ermittelt. Wobei es drei- und zweispurige Abschnitte gibt. Für die Randzeit gilt für alle Erhaltungsabschnitte $q < c$ und für die Spitzenzeit $q \geq c$.	(Vrtic et al., 2018)

Tabelle 63: Die kommentierten Variablen für die Nutzerkostenberechnung.

Die Dauer eines Erhaltungsprojekts hängt von den Dauern der darin enthaltenen Unterhaltsmassnahmen ab, sowohl für das aufzustellende als auch für das Referenzmassnahmenprogramm. Da es in den öffentlich zugänglichen Dokumentationen des ASTRA für Kunstbauten und das Trassee keine Möglichkeit gibt, dies Dauern abzuschätzen, müssen dafür Annahmen getroffen werden. Die daraus resultierende Nutzerkostendifferenz zwischen den beiden Massnahmenprogrammen ist deshalb nicht aussagekräftig. Die Annahmen sind in Tabelle 64 zusammengefasst und beeinflussen

nur die Dauer der Unterhaltsmassnahmen. Die Betreiberkosten und Risikoabschätzungen sind in keiner Weise davon betroffen. Es sind drei mögliche "Massnahmendauern" UM_{Klein}, UM_{Mittel} und UM_{Gross} definiert. Für jede prognostizierte Unterhaltsmassnahme wird einer dieser Werte manuell zugeordnet.

Dauer einer Unterhaltsmassnahme

Name	Brücke	Tunnel	Trasse-Teilstück	Kommentar
UM_{Klein}	$50d$	$60d$	$6\frac{d}{km}$	Für alle Unterhaltsmassnahmen wird angenommen, dass sie zwischen einem Monat und zwei Dritteln eines Jahres dauern. Für das Trassee wurde jeweils die Dauer für 5 km als Ausgangswert genommen, die dann z. B. für UM_{Klein} mit 30 Tagen angenommen wurde. Die Werte sind frei erfunden!
UM_{Mittel}	$100d$	$120d$	$12\frac{d}{km}$	
UM_{Gross}	$200d$	$240d$	$48\frac{d}{km}$	

Tabelle 64: Annahmen über die Dauern von Unterhaltsmassnahmen.

7.3.2 Abhängigkeiten

In einem Streckennetz bestehen zahlreiche Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Bauanlagen und Trassee-Teilstücken. Erst die Gesamtheit dieser Anlagen gewährleistet die Funktionsfähigkeit der Infrastruktur. Ein Ausfall oder Unterhaltsarbeiten an einem Ort wirken sich daher auf das Infrastrukturnetzwerk aus. Diese Auswirkungen müssen bei der Erstellung eines Massnahmenprogramms – auch bei automatisch generierten Programmen – so weit wie möglich berücksichtigt werden (Burkhalter & Adey, 2018). Die in Tabelle 65 beschriebenen und in Abbildung 96 dargestellten Abhängigkeiten, d.h. die ökonomische und funktionale, werden in der Optimierung berücksichtigt. In der gewählten Netzwerkabstraktion wird die strukturelle Abhängigkeit zwischen Bauwerksteilen eines Bauwerks oder den Belagsschichten im Trassee nicht berücksichtigt. Wird ein Infrastrukturnetzwerk jedoch auf der Ebene einzelner Bauwerksteile und Belagsschichten modelliert, erlangt diese Abhängigkeit eine wesentliche Bedeutung.

Abbildung 96 zeigt beispielhaft, wie ein Trasse-Teilstück, an dem eine Massnahme durchgeführt wird (dunkelviolett hinterlegt), mit seinen benachbarten Teilstücken (hellviolett hinterlegt) ökonomisch verbunden ist. Das bedeutet, dass das betreffende Trasse-Teilstück die Fixkosten mit diesen Nachbaren teilen kann.

Die funktionale Abhängigkeit – also die Möglichkeit, Arbeiten gleichzeitig durchzuführen – wird umgesetzt, indem Trasse-Teilstücke derselben Route und desselben Erhaltungsabschnitts funktional abhängig sind von Bauanlage, an welcher eine Unterhaltsmassnahme vorgesehen ist. Auch Bauanlagen untereinander können funktional abhängig sein, solange sie sich im gleichen Erhaltungsabschnitt befinden. Eine realitätsnahe, aber komplexe Erweiterung wäre, dass zwischen allen Anlagen definiert wird, welche Unterhaltsmassnahmen mindestens zeitweise gleichzeitig durchgeführt werden können. Für das Fallbeispiel wird angenommen, dass gleichzeitige Arbeiten an Bauanlagen, während der ganzen Ausführungsdauer möglich sind. Die funktionale Abhängigkeit ist in Abbildung 96 durch die gelbe Umrandung und die dunkelgelb hinterlegte Fläche dargestellt. Durch die Arbeiten an der Brücke B3, die mit der dunkelgelben Fläche hinterlegt ist, können die gelb umrandeten Trassee-Teilstücke gleichzeitig

ausgeführt werden. «Gleichzeitig» bedeutet in diesem Fall immer «in gleiche Fahrtrichtung» bei gleicher Verkehrsführung, da die andere Fahrtrichtung für den Verkehr benötigt wird. Somit wird vereinfachend davon ausgegangen, dass in beiden Fahrtrichtungen Arbeiten an der Brücke notwendig sind, damit auch für beide Fahrtrichtungen gleichzeitige Arbeiten mit den Trassee-Teilstücke möglich sind.

In Abbildung 96 sind auch Massnahmen dargestellt, die nicht im betrachteten Erhaltungsabschnitt von Teilstücken 1 bis 10 liegen. Wie bereits beschrieben, gelten die Abhängigkeiten jedoch immer nur innerhalb eines Erhaltungsabschnitts.

Abhängigkeiten

Name	Kurzbeschrieb	Beispiel	Umsetzung
Ökonomisch	Teilen von Fixkosten bei Unterhaltsmassnahmen am gleichen Anlagentyp auf derselben Route im gleichen Erhaltungsabschnitt.	Bei Unterhaltsarbeiten können Fixkosten geteilt werden, da dieselben Geräte und Maschinen eingesetzt werden, Baustellenabschnitte nur einmal eingerichtet werden müssen und logistische Synergien genutzt werden können.	Trasse-Teilstück sind ökonomisch verbunden mit Ihren Nachbaren.
Funktional	Gleichzeitige Ausführung von Unterhaltsmassnahmen auf derselben Route im gleichen Erhaltungsabschnitt.	Wenn mehrere Arbeiten gleichzeitig durchgeführt werden, kann die Dauer der Verkehrseinschränkung reduziert und die Nutzerkosten gesenkt werden. Wird beispielsweise eine Brücke instandgesetzt, ist diese während der Arbeiten nicht oder nur teilweise nutzbar. Dadurch kann auch das zugehörige Trassee – etwa darüberliegend oder in unmittelbarer Nähe auf derselben Route – nicht oder nur eingeschränkt befahren werden.	Trasse-Teilstücke auf derselben Route im gleichen Erhaltungsabschnitt wie eine Bauanlage. Bauanlagen untereinander, solange sie im gleichen Erhaltungsabschnitt sind.

Tabelle 65: Berücksichtigte Abhängigkeiten zwischen Bauanlagen und Trassee-Teilstücken.

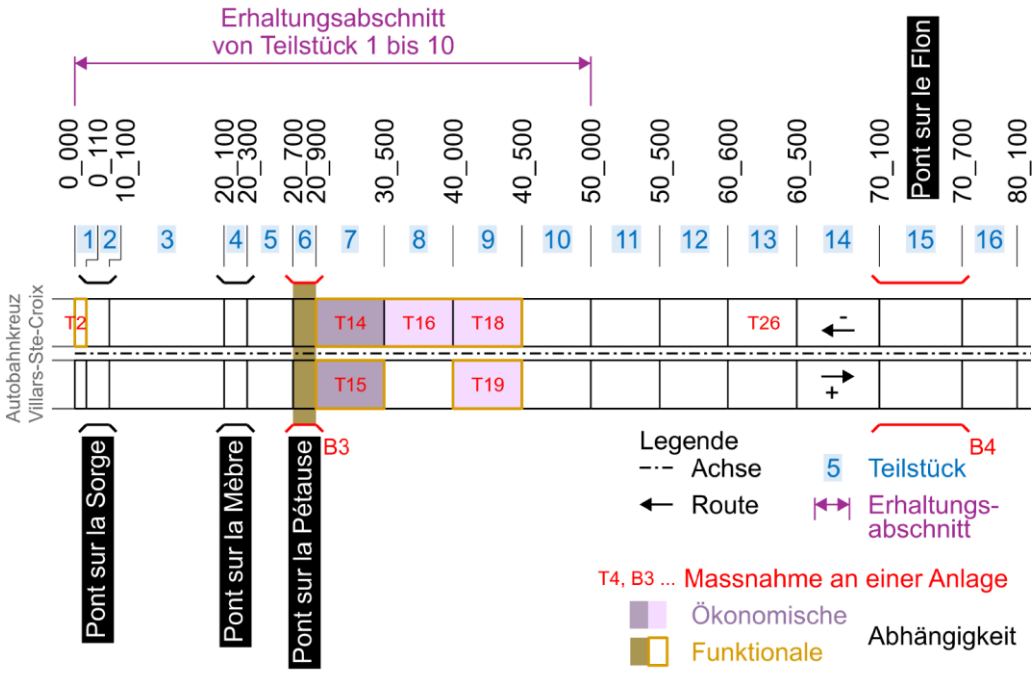


Abbildung 96: Darstellung der berücksichtigten Abhängigkeiten zwischen Bauanlagen und Trassee-Teilstücken.

7.3.3 Netzwerkflussmodell

Auf Basis der Zielformulierung, der Nebenbedingungen, der Netzwerkstruktur und der Abhängigkeiten kann das Massnahmenprogramm durch ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell beschrieben werden. Dies erfolgt hier in Form eines Netzwerkflussoptimierungsproblems. Im Folgenden wird das Modell definiert.

7.3.3.1 Netzwerkflussgraph

Das Flussnetzwerk wird als gerichteter Graph $G = (V, E)$ modelliert, welcher in Abbildung 98 schematisch gezeigt wird.

Die Knotenmenge V besteht aus zwei disjunkten Teilmengen:

- V^I: Knoten in der Massnahmenebene,
- $V^N = V^M \cup V^G \cup V^{EP}$: Knoten in der Netzwerkebene.

Die Kantenmenge E unterteilt sich analog in zwei disjunkten Teilmengen:

- $E^I \subseteq V^I \times V^I$: Menge aller gerichteten Kanten zwischen Knoten in der Massnahmenebene,
- $E^N \subseteq V^N \times V^N$: Menge aller gerichteten Kanten zwischen Knoten in der Netzwerkebene,

Die Massnahmenebene dient der Auswahl von Massnahmen, während die Netzwerkebene diese zu einem möglichen Erhaltungsprojekt aggregiert. Die daraus resultierenden Nutzerkosten können so im Modell berücksichtigt werden.

Die Knoten in V^I repräsentieren Massnahmen an einer spezifischen Anlage sowie den zugehörigen Quell- und Senkknoten.

Die Knoten in V^N repräsentieren entweder Massnahmen (V^M), Massnahmengruppierungen (V^G) desselben Anlagetyps oder – im Fall des Senkknotens - die Erhaltungsprojekte (V^{EP}). In einen Erhaltungsprojektknoten fliessen alle möglichen Massnahmen ein, die unter einem bestimmten Baustellenabschnitt und Verkehrsführung ausführbar sind. Massnahmenknoten in V^N korrespondieren zu einem in der Massnahmenebene – also ein Alias oder eine Kopie des Knotens in V^I.

Die Kanten in E^I können
- Quellknoten mit Massnahmenknoten,
- Massnahmenknoten untereinander, oder
- Massnahmenknoten mit dem Senkknoten verbinden.

Die Kanten vom Quellknoten zu einem Massnahmenknoten repräsentieren, ob eine Massnahme gewählt wird oder nicht. Kanten zwischen Massnahmenknoten modellieren ökonomische Abhängigkeiten und zeigen an, ob eine gekoppelte Auswahl gemacht wird. In diesem Fall wird die abhängige Massnahme nicht mehr direkt über eine Kante vom Quellknoten gewählt. Kanten, die zum Senkknoten führen, dienen der Formulierung der Flusserhaltungs-Nebenbedingungen.

Die Kanten in E^N können
- Massnahmenknoten mit den Massnahmengruppierungsknoten,
- Massnahmengruppierungsknoten mit dem Senkknoten (also dem Erhaltungsprojektknoten) oder
- Massnahmengruppierungsknoten untereinander verbinden, sofern beide Gruppierungen im gleichen Erhaltungsprojektknoten enden.

Die Kanten von den Massnahmenknoten zu den Massnahmengruppierungsknoten geben an, in welchen Massnahmengruppen und Erhaltungsprojekte eine Massnahme durchgeführt werden kann. Die Kanten von Massnahmengruppierungsknoten zum Senkknoten repräsentieren, ob die jeweilige Gruppierung mit dem entsprechenden Erhaltungsprojekt gewählt wird. Massnahmengruppierungen untereinander können funktionale Abhängigkeiten aufweisen, sofern sie im gleichen Erhaltungsprojekt sind. Diese funktionalen Kanten erfassen, dass die Arbeiten der verbundenen Massnahmengruppierungen gleichzeitig stattfinden können aber nicht müssen.

Zum besseren Verständnis ist in Abbildung 97 der Graph gezeichnet, der den Fall zeigt, in dem ausschliesslich an der Brücke B3, der *Pont sur la Pétause* (siehe Abbildung 95), Unterhaltsmassnahmen an den Bauwerksteilen ausgeführt werden. In der Massnahmenebene ist ein Knoten zu sehen, welcher die Unterhaltsmassnahme an der Anlage repräsentiert. Die Kante $a \in E^I$ führt den Fluss vom Quellknoten in diesen Knoten, und die Kante $b \in E^I$ trägt diesen Fluss weiter in den Senkknoten innerhalb der Massnahmenebene. In der Netzwerkebene führt die Kante $c \in E^N$ von dem Massnahmenknoten zum Knoten der Massnahmengruppen. Da keine weiteren Massnahmen vorliegen, besteht diese Massnahmengruppe ausschliesslich aus der Massnahme an der Brücke B3. Die einzig ausfliessende Kante $d \in E^N$ leitet den Fluss nun weiter in den Senkknoten EP_{1-10}, welcher ein Erhaltungsprojekt darstellt, das entlang der Achse einen Abschnitt umfasst, der sich über die Teilstücke 1 bis 10 erstreckt. Gemäss der in Kapitel 7.2.2 beschriebenen Definition des Erhaltungsabschnitts ist für die Brücke B3 kein anderer Abschnitt möglich.

In einem Szenario bzw. Optimierungsszenario (vgl. Kapitel 7.2.3 – Rückkehrperiode und Baustellenabstandsbedingung) werden nur Erhaltungsabschnitte mit dem entsprechenden Abstand zueinander betrachtet. Wenn nötig, werden Massnahmen vorgezogen. Wie beschrieben, wird die Rückkehrperiode eingehalten, indem **alle dafür nötigen Massnahmen erzwungen werden**. Für die einzelne Massnahme an B3 hatte das noch keine Konsequenzen.

Abbildung 98 zeigt einen weiteren Beispielgraphen G für das Szenariobeispiel eins in Tabelle 61. Dieses Szenario besteht aus nur einem Erhaltungsabschnitt. Neben einer Unterhaltsmassnahme an der Brücke B3 sind hier zusätzliche Massnahmen an verschiedenen Trassee-Teilstücken dargestellt. Wie bereits im Kapitel zur Erklärung der funktionalen Abhängigkeiten erläutert, werden alle Trassee-Teilstücke einer Route innerhalb eines Erhaltungsabschnitts als Massnahmengruppe betrachtet. Diese Gruppe kann funktional abhängig von einer Bauanlage sein, in der Abbildung von der Brücke B3. Die Massnahmen an den Trassee-Teilstücken T14, T16 und T18 befinden sich alle in negativer Achsenrichtung. Da T16 und T18 Nachbarn von T14 sind, besteht zwischen ihnen eine ökonomische Abhängigkeit. In der Netzwerkebene werden sie mit allen anderen Trassee-Teilstück Massnahmen in negativer Achsenrichtung in einem Massnahmengruppierungsknoten zusammengefasst. Dieser Knoten hat eine funktionale Abhängigkeit zu dem Massnahmengruppierungsknoten $G3_B$ von Brücke B3. Die Massnahme zum Trassee-Teilstück T2 hat keine ökonomische Abhängigkeit. Es gibt keine Kante $e \in E^I$ die zu oder aus dem Massnahmenknoten T2 führt. In der Netzwerkebene werden aber alle Massnahmen einer Route bzw. Achsenrichtung in einem Massnahmengruppierungsknoten zusammengefasst darum führt von Massnahme T2' eine Kante $c \in E^N$ in den Knoten $G1_T$. Die Massnahmen an den Trassee-Teilstücken T15 und T19 sind auch ökonomisch verbunden, obwohl T19 nicht direkt an T15 anschliesst. T19 liegt jedoch in einer Entfernung von 1500 m von T15 und ist somit ein Nachbar im Sinne der Definition. Da sie auf einer anderen Route liegen als die bereits besprochenen Trassee-Teilstücke, sind sie in einem eigenen Massnahmengruppierungsknoten ($G2_T$) zusammengeführt. Auch diese Massnahmen haben eine funktionale Abhängigkeit zur Brücke B3, weshalb es eine Kante $f \in E^N$ vom Knoten $G2_T$ zum Knoten $G3_B$ gibt.

Abbildung 99 zeigt einen Ausschnitt der Teststrecke mit den Massnahmen, die zu dem in Abbildung 98 dargestellten Graphen führen. Die Massnahmen in der Massnahmenebene werden zudem aufgrund der Rückkehrperiode erzwungen. Massnahmen wie T26 und B4 sind nicht Teil des Szenarios, da sie ausserhalb des Erhaltungsabschnitts von Teilstück 1-10 liegen, und kommen somit im Graphen auch nicht vor.

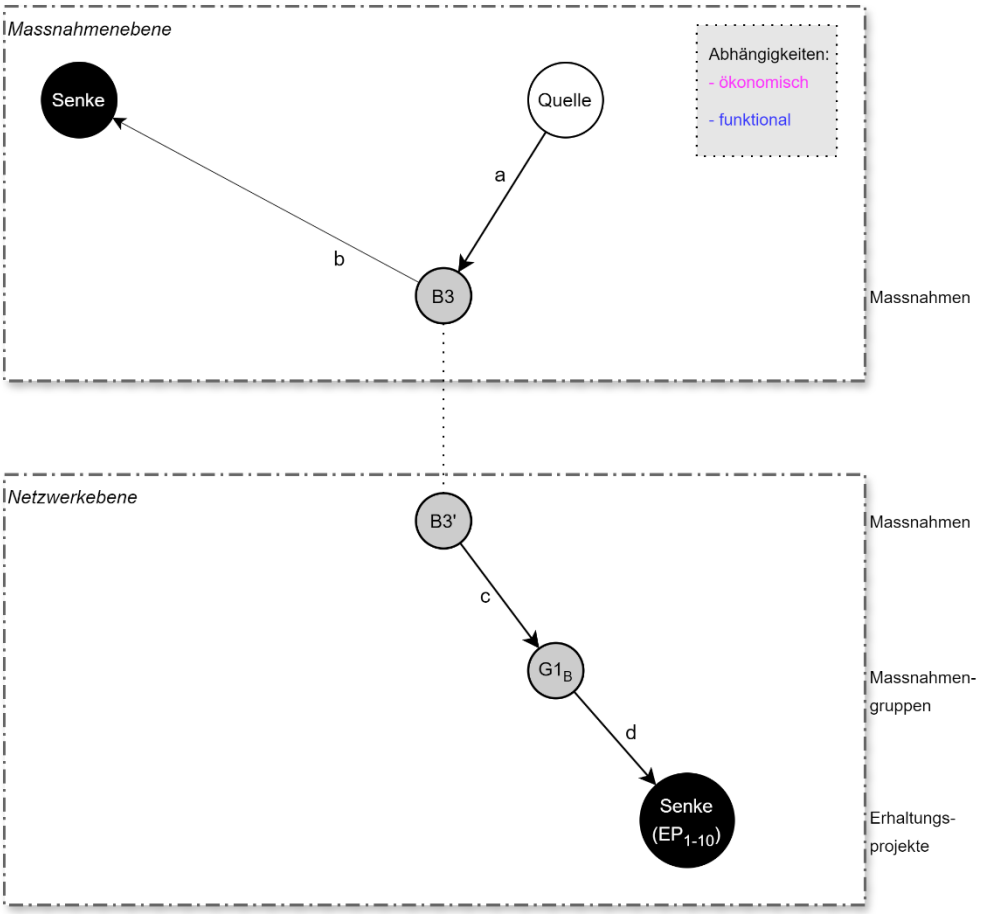


Abbildung 97: Beispielgraph G mit Unterhaltsmassnahme an Brücke B3.

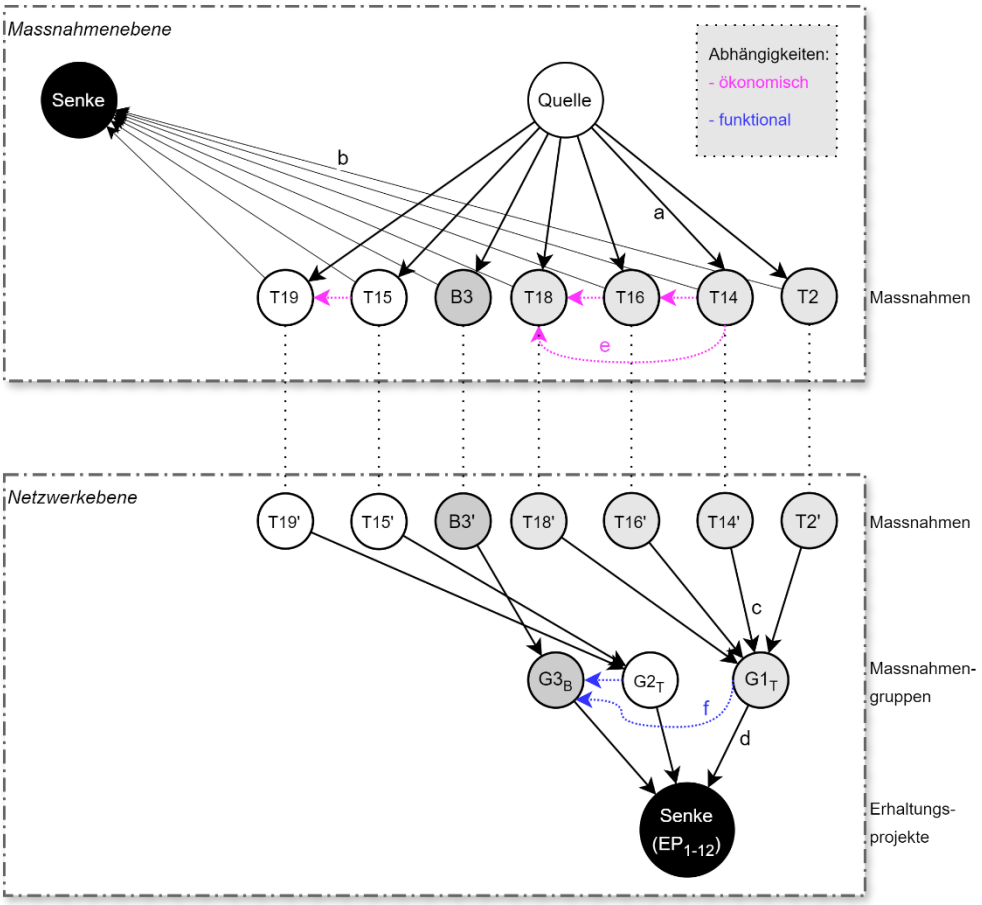


Abbildung 98: Beispielgraph G für Massnahmen an mehreren Trasse-Teilstücken und der Brücke B3.

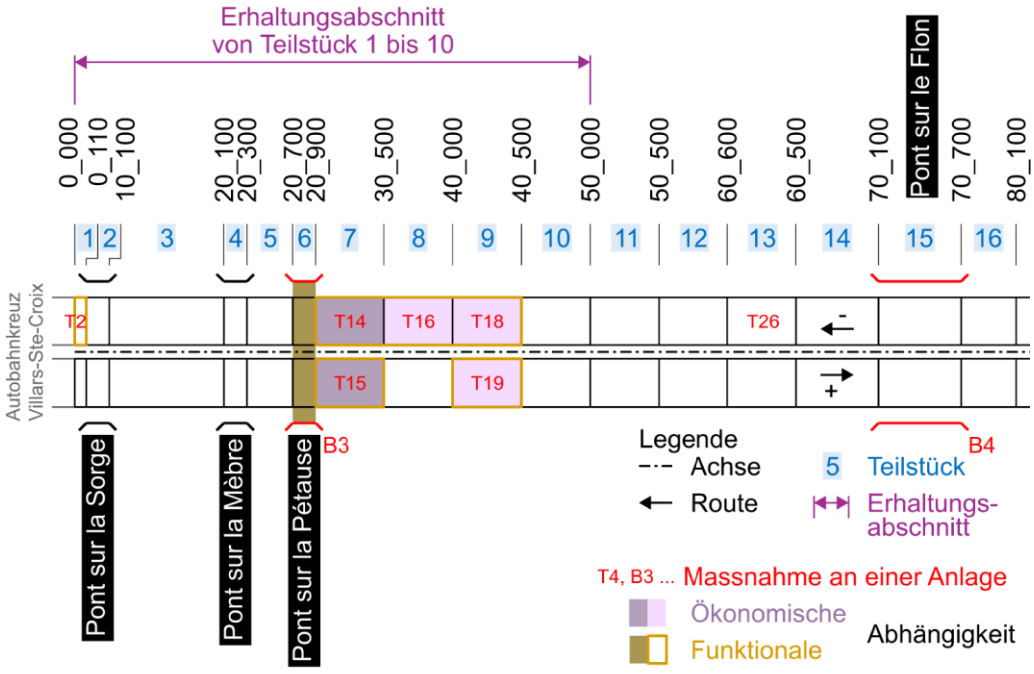


Abbildung 99: Netzwerkillustration zum Beispielgraph G für Massnahmen an mehreren Trasse-Teilstücken und der Brücke B3.

7.3.3.2 Knoten, Kanten, Entscheidungsvariablen und Koeffizienten

In Tabelle 66 und Tabelle 67 sind die möglichen Knoten- und Kantentypen sowie die zugehörigen Entscheidungsvariablen und Parameter im Detail erläutert.

Knoten

Knoten	Beschreibung	Bsp. in Abb.
$v^S \in V^I$	Quellknoten des Netzwerkflussgraphen.	$Quelle$
$v^E \in V^I$	Senkknoten des Netzwerkflussgraphen.	$Senke$
$v^I \in V^I$	Massnahme an einer Bauanlage oder an einem Trassee-Teilstück. Der Knoten enthält alle Informationen zur Zusammensetzung der Massnahme aus Teilmassnahmen an den zugehörigen Bauwerksteilen.	$T2$, $T14, T16, T18$, $B3$, $T15\ und\ T19$
$v^M \in V^N$	Kopie einer Massnahme $v^I \in V^I$.	$T2'$, $T14', T16', T18'$, $B3'$, $T15'\ und\ T19'$
$v^G \in V^N$	Massnahmengruppierung von Massnahmen mit gleichem Typ, Achse und Route, die in einem Erhaltungsprojekt gebündelt werden können.	$G1_T, G2_T, G3_B$,
$v^{EP} \in V^N$	Ein Erhaltungsprojekt, für das festgelegt ist, welcher Erhaltungsabschnitt benötigt wird. Über die eingehenden Kanten ist gegeben, welche Massnahmen darin ausführbar sind.	EP_{1-10}

Tabelle 66: Knoten des Netzwerkflussgraphen.

Die Nutzen- und Kostenkoeffizienten in Tabelle 67 ergeben sich aus den Gleichungen (42) bis (45). Für die Kanten $a \in E^I$ und $e \in E^I$ wird der Nutzen mit $(R_{MP} - R_{Ref})$ und die Kosten mit $-(C_{MP,Betreiber} - C_{Ref,Betreiber})$ berechnet. Die Annahme ist, dass sich die Kosten für den Betreiber zwischen den beiden Massnahmenprogrammen nicht unterscheiden, ausser wenn bei einer Kante e Fixkosten geteilt werden können. In diesem Fall ergeben sich für die Optimierung negative Kosten, was zu einer Erhöhung des Nettonutzens führt. Die Kosten für die Kante $d \in E^N$ werden mit dem Term $-\left(C_{MP,Nutzer} - C_{Ref,Nutzer}\right)$ berechnet. Auch hier gilt die Annahme, dass sich die Kosten für den Nutzer nicht unterscheiden zwischen den beiden Massnahmenprogramme. Gleichzeitig ausgeführte Massnahmen werden mit der funktionalen Abhängigkeitskante $f \in E^N$ und dem Term $-\left(C_{MP,Nutzer} - C_{Ref,Nutzer}\right)$ berücksichtigt, in der Optimierung ergibt sich dann einen negativen Kostenterm, weil $C_{MP,Nutzer} = 0$ wird für die Abhängigen Massnahmen. Zwischen den Massnahmenprogrammen gibt es in solch einem Fall einen Unterschied in der Ausführungsdauer. Die Kanten $b \in E^I$ und $c \in E^N$ haben per Definition Koeffizienten, die den Wert 0 annehmen.

Kanten

Kanten	Entscheidungsvariabel	Bsp. in Abbildung 98	Nutzenkoeffizient $b_{u,v}$	Kostenkoeffizient $c_{u,v}$	Kommentar
$(u,v) \in E^I$	$\delta_{u,v} \in \{0,1\}$	a	$= b_v$	$= 0$	$\delta_{u,v} = 1$, wenn die Massnahme $v \in V^I \setminus \{v^S, v^E\}$ gewählt ist ohne eine Abhängigkeit.
		b	$= 0$	$= 0$	$\delta_{u,v} = 1$, wenn die Massnahme $u \in V^I \setminus \{v^S, v^E\}$ gewählt ist.
		e	$= b_v$	$= -c_v^{fix}$	$\delta_{u,v} = 1$, wenn die Massnahme $v \in V^I \setminus \{v^S, v^E\}$ gewählt ist mit einer ökonomischen Abhängigkeit zu $u \in V^I \setminus \{v^S, v^E\}$.
$(u,v) \in E^N$	$\gamma_{u,v} \in \{0,1\}$	c	$= 0$	$= 0$	$\gamma_{u,v} = 1$, wenn die Massnahme $u \in V^I \setminus \{v^S, v^E\}$ gewählt ist.
		d	$= 0$	$= 0$	$\gamma_{u,v} = 1$, wenn die Massnahmengruppe $u \in V^N \setminus \{v^{EP}\}$ gewählt wird unter Erhaltungsprojekt $v \in V^N \setminus \{v^G\}$.
	$\varepsilon_{u,v} \in \{0,1\}$	f	$= 0$	$= -LLOS_p \cdot d_u \cdot VOT$	$\varepsilon_{u,v} = 1$, wenn die Massnahmengruppe $u \in V^N \setminus \{v^{EP}\}$ gewählt ist mit einer funktionalen Abhängigkeit zu $v \in V^N \setminus \{v^{EP}\}$ und d_u die Ausführungsdauer der Massnahmengruppe ist.

Tabelle 67: Parameter und Entscheidungsvariablen des Netzwerkflussgraphen.

7.3.4 Zielfunktion und Nebenbedingungen

Auf Grundlage der in Tabelle 66 und Tabelle 67 beschriebenen Knoten, Kanten, Entscheidungsvariablen und Koeffizienten wird in den Gleichungen (48)-(53) das Netzwerkflussmodell als gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem formal definiert. Der Nettonutzen wird damit immer für ein Jahr und ein Szenario ausgewertet. Die Resultate aus allen Szenarien werden am Schluss verglichen und das mit dem höchsten Nettonutzen wird gewählt.

$$Z^{opt} = \max_{s \in S}\{Max\ Z_s\} \tag{48}$$

$$Max\ Z_s = \sum_{(u,v)\in E_s^I} \delta_{u,v} \cdot (b_{u,v} - c_{u,v}) + \sum_{(u,v)\in E_s^N} \gamma_{u,v} \cdot (-c_{u,v}) + \sum_{(u,v)\in E_s^N} \varepsilon_{u,v} \cdot (-c_{u,v}) \quad (49)$$

wobei

$s \in S$	ein Szenario ist, indem die Rückkehrperiode- und Baustellenabstandsbedingung eingehalten wird,
$Max\ Z_s$	das optimierte Szenario s ist,
Z^{opt}	das optimale Szenario aus allen Szenarien in der Menge S ist,
E_s^I	die Menge der gerichteten Kanten in der Massnahmenebene im Szenario s ist,
E_s^N	die Menge der gerichteten Kanten in der Netzwerkebene im Szenario s ist,
$\delta_{u,v} \in \{0,1\}$	eine binäre Entscheidungsvariable ist, die den Wert 1 annimmt, wenn die Kante $(u,v) \in E_s^I$ Teil des optimalen Flusses ist,
$\gamma_{u,v} \in \{0,1\}$	eine binäre Entscheidungsvariabel ist, die den Wert 1 annimmt, wenn die Kante $(u,v) \in E_s^N$ Teil des optimalen Flusses ist,
$\varepsilon_{u,v} \in \{0,1\}$	eine binäre Entscheidungsvariabel für die funktionale Abhängigkeit einer Massnahmengruppe ist, die den Wert 1 annimmt, wenn die Kante $(u,v) \in E_s^N$ Teil des optimalen Flusses ist,
$b_{u,v}$	den Nutzen auf der Kante $(u,v) \in E_s^I$ beschreibt,
$c_{u,v}$	die Betreiberkosten auf der Kante $(u,v) \in E_s^I$ und die Nutzerkosten auf der Kante $(u,v) \in E_s^N$ beschreibt.

Die Zielfunktion (49) ist bewusst mit allen Entscheidungsvariablen angeben, obwohl die Koeffizienten von $\gamma_{u,v}$ nach Tabelle 67 gleich 0 sind. Je nach Annahmen und Referenzprogramm muss das aber nicht der Fall sein.

Flusserhaltungsbedingung

Die Bedingung in Gleichung (50) stellt für die Massnahmenebene sicher, dass der Fluss aller gewählten Massnahmen weitergeführt wird und am Ende in der Quelle endet. Die Flusserhaltungsbedingung gilt für alle Massnahmenknoten mit Ausnahme des Quell- und des Senkknotens. Es gilt:

$$\sum_{u:(u,v)\in E_s^I} \delta_{u,v} = \sum_{k:(v,k)\in E_s^I} \delta_{v,k}, \quad \forall v \in V_s^I \setminus \{v^S, v^E\} \quad (50)$$

Auf der Netzwerkebene wird ermittelt, wie lange ein Erhaltungsprojekt dauert und inwiefern funktionale Abhängigkeiten bestehen, die die Ausführungsdauer des Erhaltungsprojekts reduzieren. Für jeden Massnahmengruppierungsknoten $\forall v \in V_s^G \subset V_s^N$ gilt: Die summierte Ausführungsdauer der Massnahmenknoten wird entweder dem Erhaltungsprojekt oder einer funktional abhängigen Massnahmengruppe. zugeschrieben. Daraus folgt die erste Flusserhaltungsbedingung (51), die sicherstellt, dass von einem Massnahmengruppierungsknoten nur eine ausgehende Kante gewählt werden kann. Das heisst, eine Massnahmengruppe kann entweder gleichzeitig mit einer anderen Massnahmengruppe ausgeführt werden, solange eine funktionale Abhängigkeit besteht, oder dem Erhaltungsprojekt zugeschrieben werden.

$$1 = \left(\sum_{z:(v,z)\in E_s^N} \gamma_{v,z} + \sum_{z:(v,z)\in E_s^N} \varepsilon_{v,z} \right), \quad \forall v \in V_s^G \tag{51}$$

Ausserdem muss eingeschränkt werden, welche funktional abhängige Kante gewählt werden kann. Die Ausführungsdauer einer Massnahmengruppe kann nur so lange sein, wie es die funktionale Abhängigkeit zulässt. Da sich eine Massnahmengruppe aus mehreren Massnahmen zusammensetzt, werden die gewählten Massnahmen mit ihrer jeweiligen Ausführungsdauer multipliziert (linke Seite der Gleichung). Auf der rechten Seite der Gleichung wird jedoch die Ausführungsdauer der Massnahmengruppe mit der funktionalen Abhängigkeitskante multipliziert. Die Ausführungsdauer einer Massnahmengruppe ist bekannt, da alle Massnahmen gewählt sind (vgl. Gleichung (53)). Auf der rechten Seite wird jede ausgehende funktionale Kante betrachtet, aufgrund Gleichung (51) kann jedoch nur eine davon gewählt werden.

$$\sum_{u:(u,v)\in E_s^N} \gamma_{u,v} \cdot d_u \leq \sum_{z:(v,z)\in E_s^N} \varepsilon_{v,z} \cdot d_z \,, \quad \forall v \in V_s^G \tag{52}$$

wobei

d_u die Dauer für Massnahme $u \in V_s^M \subset V_s^N$ in der Massnahmengruppierung $v \in V_s^G \subset V_s^N$ ist und

d_z die Dauer der Massnahmengruppierung $z \in V_s^G \subset V_s^N$ ist.

Massnahmenzwangsbedingung

Um die in Kapitel 7.2.3 beschriebene Rückkehrperiode einzuhalten, müssen alle Massnahmen gewählt werden. Dies wird durch einen erzwungenen Fluss erreicht, der sicherstellt, dass der Fluss in einen Massnahmenknoten der Massnahmenebene immer gleich 1 ist, d. h., dass die Massnahme immer gewählt ist. Wenn die Massnahmen durch die Optimierung gewählt werden, verändert sich die Gleichung zu einer Exklusivitätsbedingung. Das Gleichheitszeichen wird dabei durch ein kleiner-gleich-Zeichen ersetzt.

$$\sum_{u:(u,v)\in E_s^I} \delta_{u,v} = 1, \quad \forall v \in V_s^I \setminus \{v^S, v^E\} \tag{53}$$

Übertragungsbedingung

Wenn eine Massnahme gewählt wird, müssen auch der Fluss aus dem korrespondierende Massnahmenknoten in der Netzwerkebene aktiviert werden. Diese Bedingung erzwingt, dass die Auswahl einer Massnahme $v \in V_s^I \setminus \{v^S, v^E\}$ die Massnahme in der Netzwerkebene $v' \in V_s^M \subset V_s^N$ aktiviert.

$$\sum_{u:(u,v)\in E_s^I} \delta_{u,v} = \sum_{w:(v',w)\in E_s^N} \gamma_{v',w} \quad \forall v \in V_s^I \setminus \{v^S, v^E\}, \forall v' \in V_s^M \tag{54}$$

Budget

Wenn die Kantenkoeffizienten, wie in Tabelle 67 angegeben, berücksichtigt werden, fehlt die Information, um eine mögliche Budgetüberschreitung zu berücksichtigen. Für solch eine Nebenbedingung müsste Kante $a \in E_s^I$ den Kostenkoeffizient als $c_{u,v} =$

$-((c^{fix}_{v,MP,Betreiber} + c^{var}_{v,MP,Betreiber}) - (c^{fix}_{v,Ref,Betreiber} + c^{var}_{v,Ref,Betreiber}))$ definiert haben und dann könnte das maximale Budget in einer Jahr Ω_{max} mit der Nebenbedingung $\sum_{(u,v)\in E^I_s} \delta_{u,v} \cdot (c^{fix}_{v,MP,Betreiber} + c^{var}_{v,MP,Betreiber}) \leq \Omega_{max}$ eingehalten werden. Diese Nebenbedingung wurde jedoch im Fallbeispiel nicht berücksichtigt.

7.4 Fallbeispiel

Die in den Kapiteln 7.1 bis 7.2.3 vorgestellte Modellierung und Optimierung des Problems bildet auch die Grundlage für die in diesem Kapitel gezeigten Ergebnisse. Die eingehenden Entscheidungen und Werte wurden schon gezeigt. Die wenigen Anpassungen sind:

- Es werden nur Erhaltungsabschnitte der Länge 5 km berücksichtigt.
- Nur Trassee-Teilstücke können von anderen Anlagearten ökonomisch und funktional abhängig sein.
- In der Netzwerkebene werden nur dann Trassee-Teilstück-Massnahmengruppen gebildet, wenn dieselbe Route und derselbe Massnahmentyp vorliegen.

Der analysierte Zeitraum erstreckt sich über die Jahre 6 bis 10 in der Zukunft. Da es sich um Massnahmenbündelungen für ein Jahr handelt, wurden die Unterhaltsmassnahmen zusätzlich in einer einjährigen Prognose ermittelt, statt wie in Kapitel 6 beschrieben in einer Fünfjahresprognose. Grundsätzlich könnte der Zeitpunkt der Ausführung aber auch von Erhaltungsplaner festgelegt werden, wichtig ist nur, dass das gewünschte Jahr der Ausführung einer Unterhaltsmassnahme an einer Anlage bekannt ist. Welche Massnahmen für die Jahre 6 bis 10 in der Zukunft ermittelt wurden, ist für alle Anlagetypen in Tabelle 68 dargestellt, inklusive der Kosten- und Risikoabschätzungen. Für Brücken und Tunnel wurde der in Kapitel 6.2 beschriebene Algorithmus mit Verfallsmatrizen mit einer Periode von einem Jahr angewandt. Die Unterhaltsmassnahmen an den Bauwerksteilen wurden manuell zu einer Unterhaltsmassnahme an der Bauanlage zusammengeführt.

Die automatische Bündelung der Massnahmen für die Jahre 6 bis 10 in der Zukunft ist in Tabelle 69 dargestellt. In allen Perioden wird schnell deutlich, dass die Nebenbedingung der Rückkehrperiode viele Massnahmen zur vorgezogenen Ausführung zwingt, beispielsweise die Trasse-Teilstückmassnahmen im Jahr 6. Wie in Gleichung (43) dargestellt, wird der Nutzen über die Risikodifferenz berechnet. Eine gegenüber dem Referenzprogramm vorgezogene Massnahme wird in Bezug auf das Risiko und somit auch auf den Nutzen negativ bewertet, eine aufgeschobene Massnahme hingegen positiv. Das aus der Massnahmenstrategie abgeleitete Risiko wird somit als das angesehen, aus dem sich weder ein positiver noch ein negativer Nutzen (bzw. Risiko) ergibt. Nutzenwerte von 0 Mio. CHF deuten somit auf eine geplante Ausführung der Massnahme an der Anlage nach Strategie hin. Beispielweise sind die *Pont sur La Sorge* und *Pont sur La Petause* gemäss Tabelle 68 im Jahr 6 auszuführen, was auch im Massnahmenprogramm der Fall ist. Eine aufgeschobene Massnahme kann in Tabelle 69 für das Jahr 10 beobachtet werden. Die *Pont sur La Lutrive* wird nach Massnahmenprogramm von dem individuell optimalen Zeitpunkt im Jahr 9 aufgeschoben (vgl. Tabelle 68).

Es können negative Fixkosten für diverse Anlagen beobachtet werden. Dies bedeutet, dass diese Massnahmen eine ökonomische Abhängigkeit ausnutzen und somit die Fixkosten gegenüber dem Referenzprogramm reduzieren.

Den grössten Anteil am positiven Nettonutzen haben jedoch die Nutzerkosten, die jedes Jahr negativ sind. Das bedeutet, dass diese Nutzerkosten gegenüber dem Referenzprogramm eingespart werden können, was zu einem grösseren Nettonutzen führt. Dies wird durch die funktionalen Abhängigkeiten ermöglicht, also die gleichzeitige Ausführung von Massnahmen an Anlagen.

Die Einhaltung der Baustellenabstandsbedingung ist gewährleistet und es können mehrere Erhaltungsabschnitte im gleichen Jahr vorkommen, beispielsweise im Jahr 6. Diese Annahme führt jedoch auch dazu, dass die meisten in der Planungsperiode geplanten Massnahmen nicht im vorgesehenen Jahr ausgeführt werden können. Wäre die Planungsperiode mit mehr geplanten Massnahmen belegt, könnte nicht ausgeschlossen werden, dass gewisse Massnahmen wegen der Abstandsbedingung nicht ausgeführt werden können, da in fünf Jahren mit den definierten Erhaltungsabschnitten und Szenarien nicht die gesamte Strecke abgedeckt wird.

Für alle Jahre der Planungsperiode ergibt sich ein positiver Nettonutzen für das Massnahmenprogramm. Aufgrund der Erzwingung aller Massnahmen in den Erhaltungsprojekten eines Szenarios sind negative Werte nicht ausgeschlossen. Da jedoch so viele Szenarien betrachtet werden, müsste jeder Nettonutzen negativ sein, damit eines davon vorgeschlagen würde.

Abbildung 100 zeigt die räumliche Darstellung des Massnahmenprogramms für die fünfjährige Planungsperiode. Die die hellen Farben stehen für die Erhaltungsabschnitte der verschiedenen Jahre der Planungsperiode. Die dunklen Farben mit den Markern symbolisieren jeweils eine Anlage, an der eine Massnahme durchgeführt werden soll. Für das Jahr 6 in der Zukunft wurde die Farbe Blau verwendet und die resultierenden Massnahmenbündel sind in Abbildung 101 und Abbildung 102 dargestellt. Für das Jahr 7 in der Zukunft wurde die Farbe Grün verwendet und das resultierende Massnahmenbündel ist in Abbildung 103 dargestellt. Für das Jahr 8 in der Zukunft wurde die Farbe Orange verwendet und das resultierende Massnahmenbündel ist in Abbildung 104 dargestellt. Für das Jahr 9 in der Zukunft wurde die Farbe Violett verwendet und die resultierenden Massnahmenbündel sind in Abbildung 105 und Abbildung 106 dargestellt. Für das Jahr 10 in der Zukunft wurde die Farbe Rot verwendet und das resultierende Massnahmenbündel ist in Abbildung 107 dargestellt. Hervorzuheben ist das Jahr 10, da dort noch einmal deutlich wird, dass stets von einem Erhaltungsabschnitt von 5 km ausgegangen wird, obwohl in diesem Jahr nur eine Massnahme ausgeführt werden soll. Die Abbildung wurde einem Screenshot einer Webanwendung entnommen, die in der Demonstration (vgl. Kapitel 8.2) noch vertiefter erläutert wird. Das Fallbeispiel konnte zwar zeigen, wie für die Teststrecke eine automatische, optimale Bündelung von Massnahmen in ein Massnahmenprogramm geschieht, doch erst die Interaktion mit diesen Resultaten in einer geeigneten Applikation ermöglicht eine intuitive Anwendung.

Ausgewählte Unterhaltsmassnahmen

			Massnahme	
Jahr	**Teilstück**	**Bez. Anlage**	**Kosten** [Mio. CHF]	**Dauer**
6	2	Pont sur La Sorge	19.95	UM_{Mittel}
	6	Pont sur La Petause	14.19	UM_{Klein}
	15	Pont sur Le Flon	25.48	UM_{Mittel}
	21	Pont sur La Chandelar	20.70	UM_{Klein}
	67	Pont JCT Montreux	3.19	UM_{Klein}
	68	Pont sur La Baye de Clarens	31.91	UM_{Gross}
7	49	Pont sur La Salenche	10.38	UM_{Klein}
8	30	Pont des Daillettes	5.96	UM_{Klein}
9	17	Pont A JCT Lausanne-Vennes	3.85	UM_{Klein}
	23	Pont sur La Paudeze	45.88	UM_{Gross}
	24	Tunnel de Belmont	12.19	UM_{Klein}
	27	Pont sur La Lutrive	47.49	UM_{Gross}
	32	Pont de La Criblette	2.71	UM_{Klein}
	36	Estacade en Jerusalem	3.16	UM_{Klein}
	37	Pont du Rio DEnfer	5.85	UM_{Klein}
	39	Pont du Crau Coulet	13.88	UM_{Klein}
	39	Estacade du Crau Coulet	13.20	UM_{Klein}
	40	Estacade de La Cornallaz	7.23	UM_{Klein}
	40	Pont de La Cornallaz	13.26	UM_{Klein}
	41	Tunnel du Flonzaley	22.91	UM_{Mittel}
	66	T147	0.39	UM_{Mittel}
	75	Tunnel de Glion	64.77	UM_{Gross}
10	50	T115	0.01	UM_{Klein}

Tabelle 68: Unterhaltsmassnahmen in den Jahre 6 bis 10 in der Zukunft.

Automatisch Bündelung von Massnahmen

Jahr	Erhaltungs-abschnitt [Teilstück Nr. und BP_U-Di-stanz]	Bez. Anlage	Fixkosten [Mio. CHF]	Nutzen [Mio. CHF]
6	1-10 0_000 - 50_000	Pont sur La Sorge	0.00	0.00
		Pont sur La Petause	0.00	0.00
		T6	0.00	-0.48
		T7	0.00	-0.49
		T10	-0.03	-0.41
		T11	-0.03	-0.44
		T14	-0.04	-0.42
		T15	-0.04	-0.42
		T16	-0.04	-0.42
		T17	-0.04	-0.35
		T18	-0.04	-0.41
		T19	-0.04	-0.43
		T20	-0.04	-0.42
		T21	-0.04	-0.43
	67-77 300_700 – 370_600	Tunnel de Glion	0.00	-0.49
		Pont sur La Baye de Clarens	0.00	0.00
		Pont JCT Montreux	0.00	0.00
		T142	0.00	-1.45
		T144	-0.06	-2.04
		T150	-0.08	-1.63
		T153	0.00	-1.90
		T155	-0.06	-1.99
		T157	-0.06	-1.26
		T161	0.00	-2.16
Mit Nutzerkosten von -139.6 Mio. CHF ergibt sich ein Nettonutzen von 122.2 Mio. CHF				
7	14-24 60_500 – 110_700	Tunnel de Belmont	0.00	-0.18
		Pont sur Le Flon	0.00	1.28
		Pont A JCT Lausanne-Vennes	0.00	-0.35
		Pont sur la Chandelar	0.00	0.60
		Pont sue La Paudeze	0.00	-2.13
		T28	0.00	-0.68
		T29	0.00	-0.69
		T32	-0.02	-0.70
		T33	-0.03	-0.93
Mit Nutzerkosten von -34.8 Mio. CHF ergibt sich ein Nettonutzen von 31.1 Mio. CHF				
8	37-50 170_500 – 220_500	Tunnel du Flonzaley	0.00	-0.03
		Pont du Rio Denfer	0.00	-0.45
		Pont du Crau Coulet	0.00	-0.55
		Estacade du Crau Coulet	0.00	-0.48

		Estacade de La Cornallaz	0.00	-0.32
		Pont de La Cornallaz	0.00	-0.46
		Pont sur La Salenche	0.00	0.93
		T98	0.00	-0.44
		T109	-0.02	-0.83
		T111	-0.02	-0.56
		T115	0.00	-0.23
Mit Nutzerkosten von -28.6 Mio. CHF ergibt sich ein Nettonutzen von 25.2 Mio. CHF				
9	28-39 130_000 – 180_100	Pont des Daillettes	0.00	0.22
		Pont de La Criblette	0.00	0.00
		Estacade en Jerusalem	0.00	0.00
		T56	0.00	-0.33
	63-73 280_500 – 330_500	T132	0.00	-0.11
		T134	-0.02	-0.08
		T136	-0.03	-0.12
		T141	0.00	-0.19
		T143	-0.02	-0.14
		T145	-0.02	-0.14
		T147	0.00	0.00
Mit Nutzerkosten von -10.7 Mio. CHF ergibt sich ein Nettonutzen von 9.9 Mio. CHF				
10	19-29 80_800 – 140_000	Pont sur La Lutrive	0.00	0.84
Mit Nutzerkosten von 0.0 Mio. CHF ergibt sich ein Nettonutzen von 0.8 Mio. CHF				

Tabelle 69: Ergebnisse aus der automatischen Bündelung von Massnahmen in den Jahre 6 bis 10 in der Zukunft.



Abbildung 100: Massnahmenprogramm der Teststrecke räumlich dargestellt für jedes Jahr der Planungsperiode (Blau = Jahr 6, Grün = Jahr 7, Orange = Jahr 8, Violett = Jahr 9, Rot = Jahr 10).

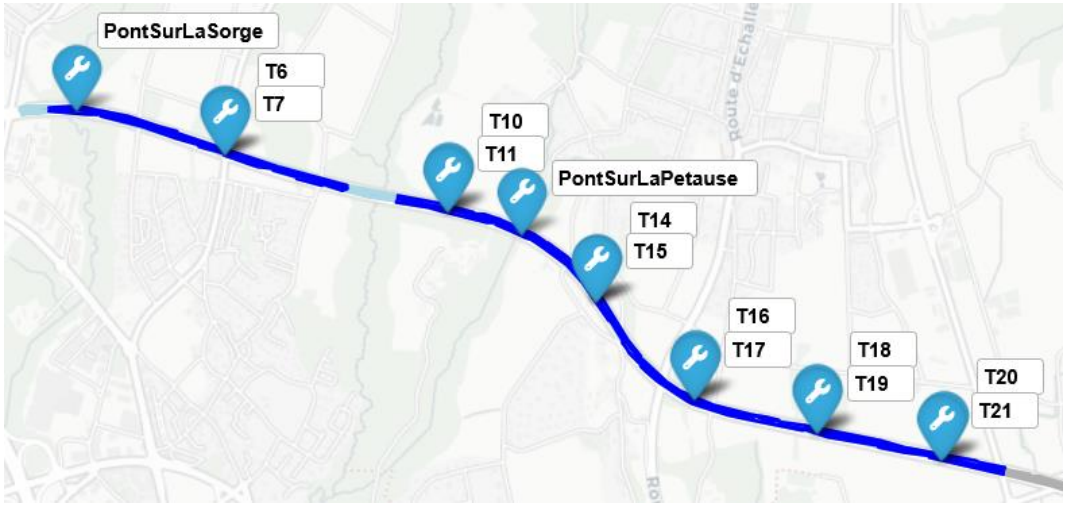


Abbildung 101: Gebündelte Massnahmen im Jahr 6 (erstes Bündel, Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).

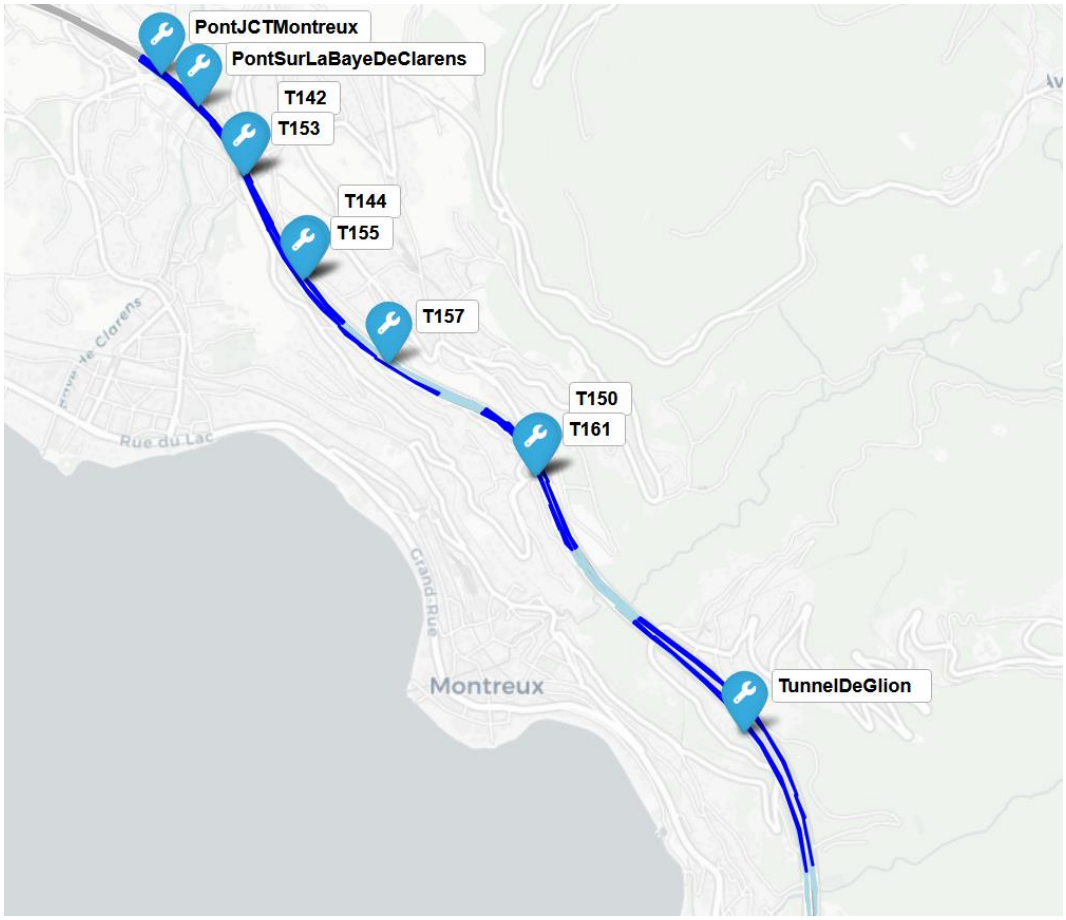


Abbildung 102: Gebündelte Massnahmen im Jahr 6 (zweites Bündel, Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).

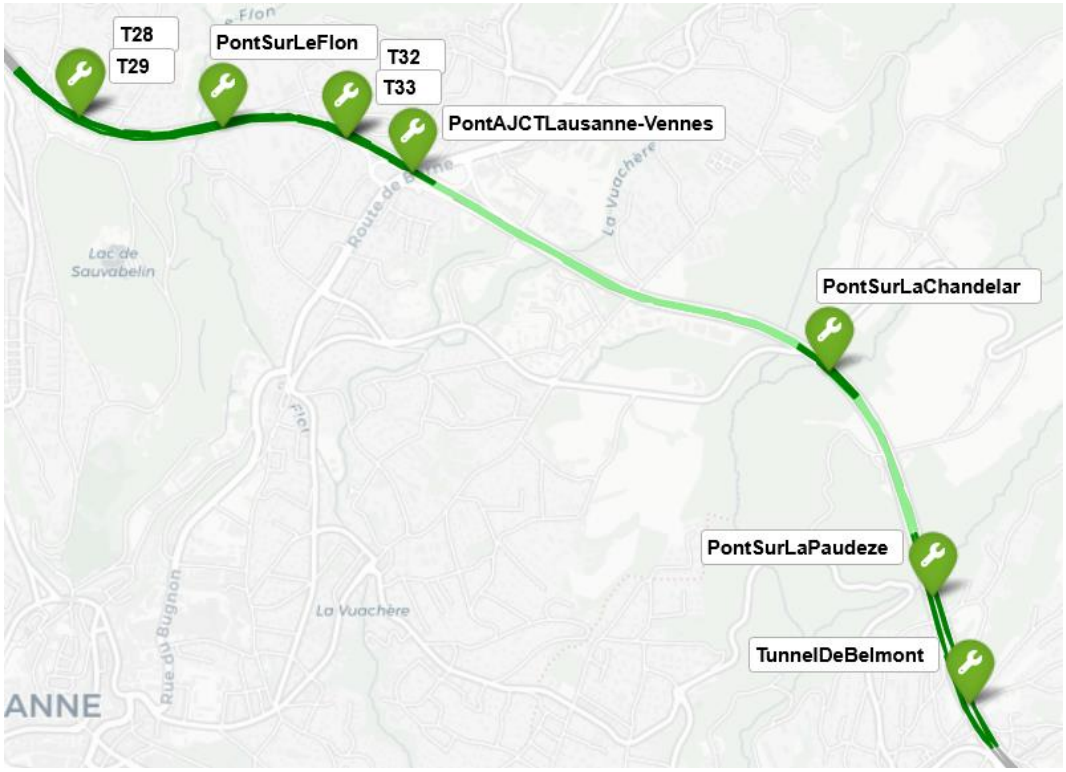


Abbildung 103: Gebündelte Massnahmen im Jahr 7 (Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).

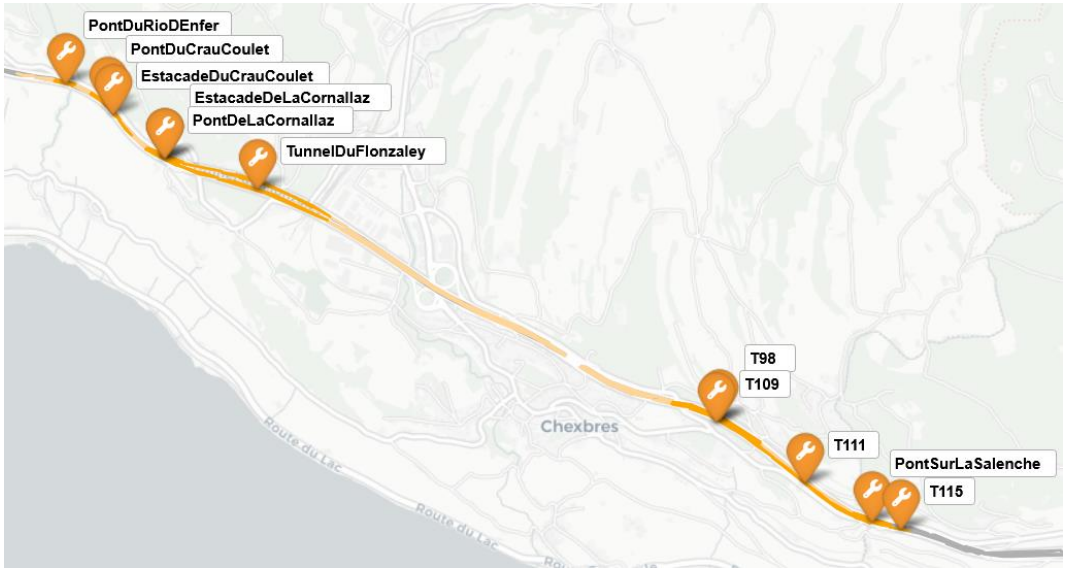


Abbildung 104: Gebündelte Massnahmen im Jahr 8 (Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).

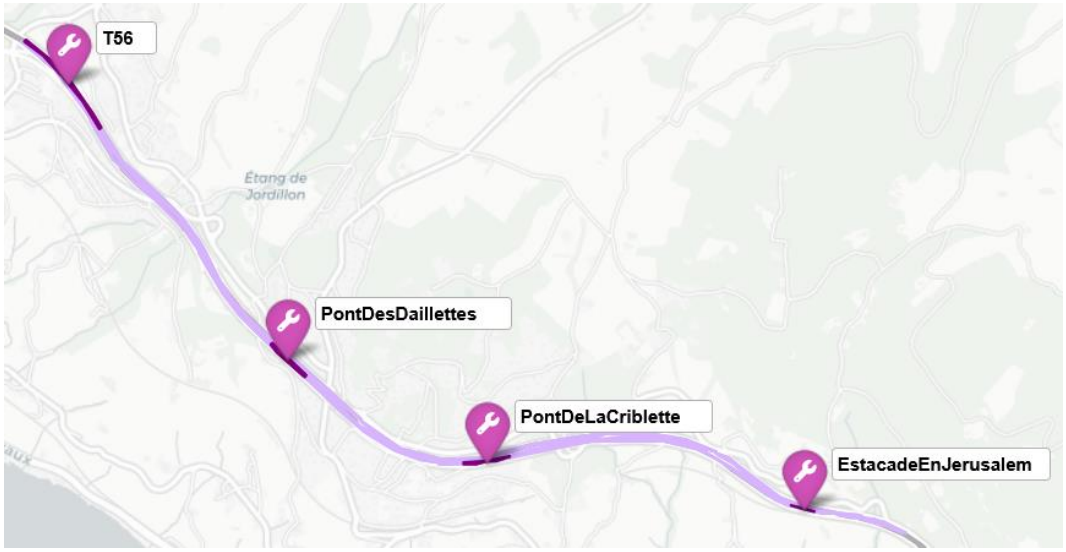


Abbildung 105: Gebündelte Massnahmen im Jahr 9 (erstes Bündel, Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).

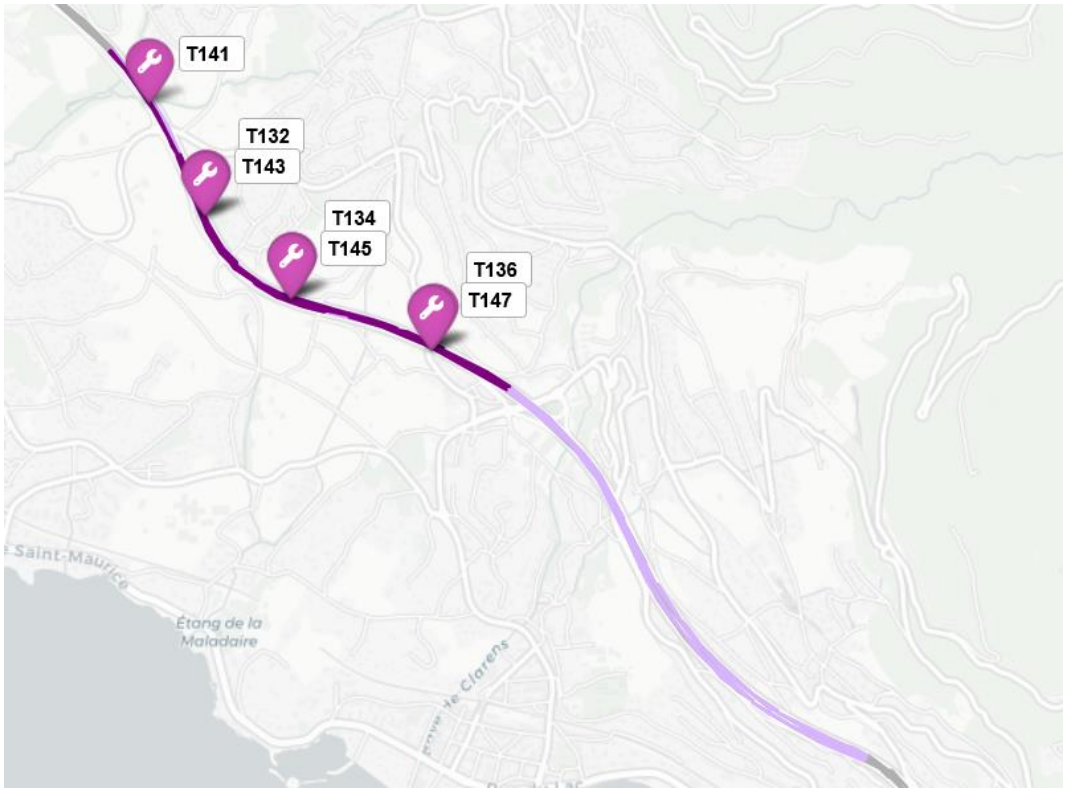


Abbildung 106: Gebündelte Massnahmen im Jahr 9 (zweites Bündel, Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).

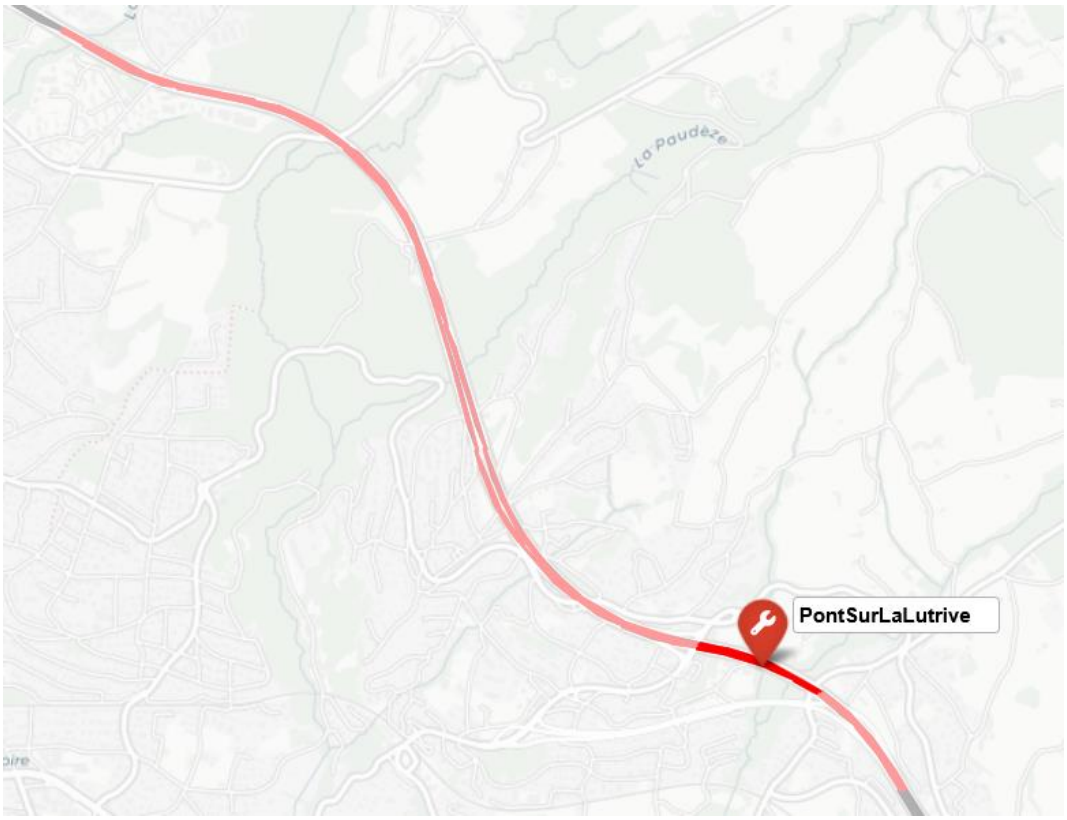


Abbildung 107: Gebündelte Massnahmen im Jahr 10 (Anlagen in dunkler Farbe, Erhaltungsabschnitt in heller Farbe).

8 Demonstration

Die Methodiken aus den vorangehenden Kapiteln wurden im Detail erklärt und auch an der Teststrecke angewendet. In diesem Kapitel wird eine Vision skizziert, wie die Erhaltungsplanung an der Teststrecke unter der Berücksichtigung der Vorgestellten Modelle und Algorithmen aussehen könnte. Die verwendeten sowie die berechneten Daten sind im MINERVA-Datensatz gegeben. Einleitend wird zuerst die Verwendung von Visuellen Hilfsmitteln wie BIM zur Darstellung von Informationen und wie das im Rahmen des Projekts MINERVA umgesetzt wurde erläutert.

8.1 Visuelle Hilfsmittel zur Darstellung von Informationen

Zur Unterstützung des Erhaltungsplanungsprozesses könnte die Digitalisierung eine wichtige Rolle spielen, wobei neben den vorgestellten Methodiken und Algorithmen auch eine intuitive Präsentation der Informationen wichtig ist. Die Integration digitaler Hilfsmittel vor allem dann erfolgreich, wenn diese Hilfsmittel auch tatsächlich verwendet werden. Die Umstellung hin zur Verwendung digitaler Hilfsmittel kann dadurch gefördert werden, dass diese intuitiv zu verwenden sind. Visuelle Darstellungen von Informationen werden oft als intuitiv wahrgenommen und können auch Zeit einsparen und die Genauigkeit erhöhen (Zhang et al., 2018). Hilfsmittel wie BIM und GIS ermöglichen schon heute das Referenzieren von Informationen zu räumlichen Objekten. Aus diesem Grund wurde auch im Rahmen diese Projekts MINERVA daran gearbeitet, wie ein Hilfsmittel wie BIM den Erhaltungsplanungsprozess unterstützen kann. Die dazugehörigen Schritte werden im Folgenden vorgestellt. Diese enthalten: 1) Bim-Modell erstellen, 2) Parameter definieren, 3) Informationen verknüpfen, 4) Visualisierungen ermöglichen.

8.1.1 BIM-Modell erstellen

Der erste Schritt stellt sicher, dass ein 3D-Modell des Infrastrukturobjekts in der gewünschten BIM-Umgebung vorhanden ist. Als erstes bedeutet das, die gewünschte BIM-Umgebung festzulegen (Bsp. Autodesk Revit). Ebenfalls ist in diesem Schritt zentral, dass die gewünschte Detailgenauigkeit der 3D-Repräsentationen mit der Granularität der vorhandenen Granularität der Informationen in den Managementsystemen, welche für die Erhaltung bestehender Infrastrukturobjekte verwendet werden, übereinstimmt. Im BIM-Kontext spricht man bezüglich Genauigkeit und Informationsgehalt von «Level of Development» (LOD). Eine verbreitete Einteilung der verschieden LODs geht von «LOD 100», was einer sehr einfachen generischen Repräsentation entspricht, bis «LOD 500», was einer sehr detaillierten, wie tatsächlich gebauten Repräsentation entspricht (BIMForum, 2024). Für die Erhaltungsplanung wird ein LOD von 200 bis 300 als genügend betrachtet. Dieser erste Schritt kann entsprechend bedeuten, dass ein BIM-Modell zuerst erstellt oder umgewandelt werden muss. Dafür gibt es unterschiedliche Ausgangslagen. Gibt es nur 2D-Pläne oder Fotos kann anhand dieser ein BIM modelliert werden, sei es durch geübte Fachpersonen oder automatisierte Methodiken mit Hilfe von künstlicher Intelligenz. Es können auch rudimentärere 3D-Modelle bereits

vorhanden sein, oder Punktwolkenrepräsentationen, welche in die gewünschte Form gebracht werden müssen.

Im Rahmen des Projekts MINERVA wurden für mehrere Infrastrukturobjekte der Teststrecke BIM-Modelle erstellt (Abbildung 108). Als BIM-Umgebung wurde Autodesk Revit verwendet. Die Infrastrukturobjekte wurden auf einem LOD von 200 bis 300 basierend auf verfügbaren 2D-Konstruktionsplänen sowie Fotos modelliert. In Bezug auf die Datenstruktur bedeutet das, dass die in der Fachapplikation KUBA vorhanden Bauwerksteile, insbesondere die Kostenrelevanten, als geometrische Entität modelliert wurden.

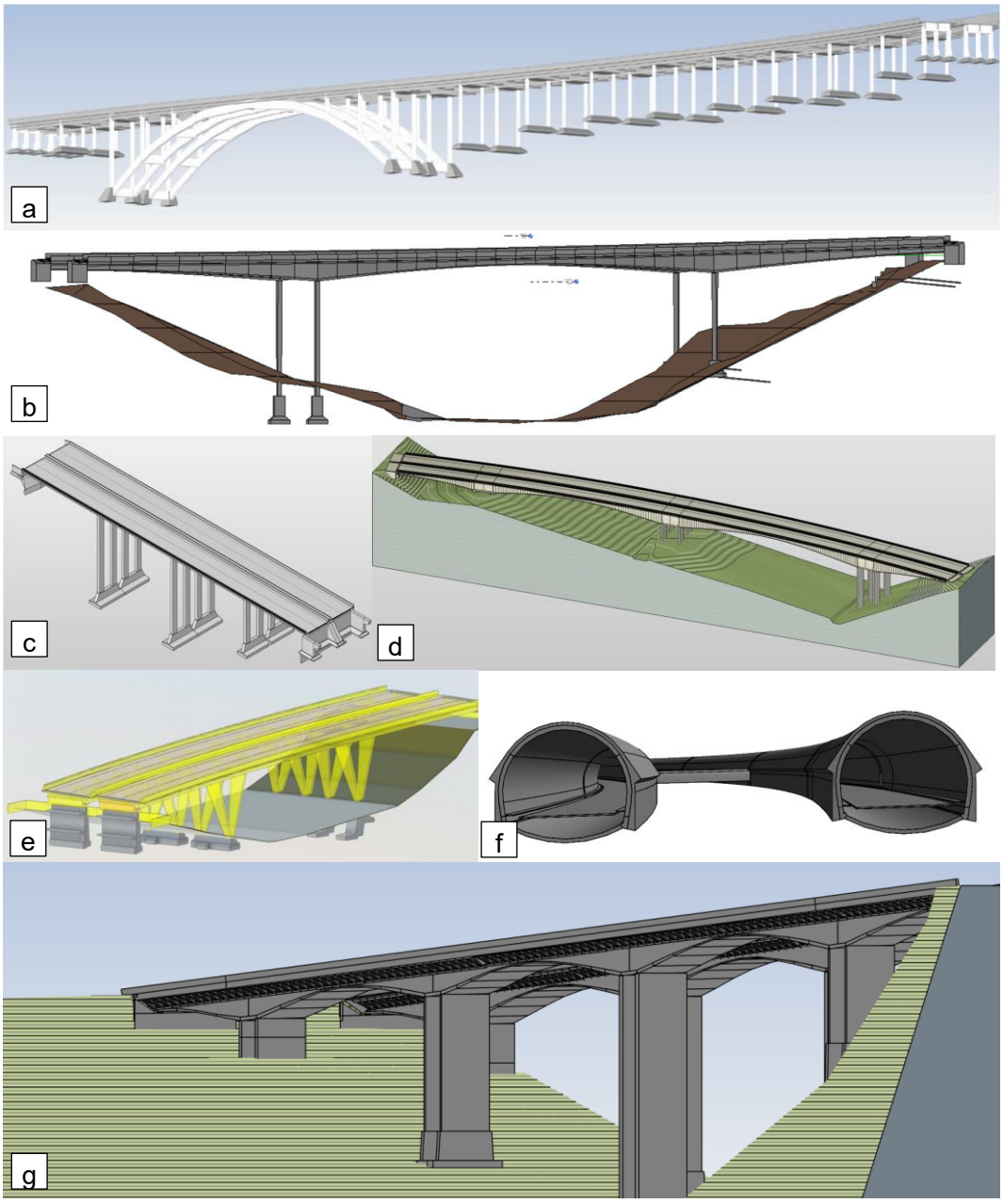


Abbildung 108: BIM-Modelle aus dem Projekt MINERVA. a) *Pont sur le Flon*, b) *Pont sur la Sorge*, c) *Pont sur la Mèbre*, d) *Pont sur la Lutrive*, e) *Pont sur la Pétause*, f) *Tunnel du Flonzaley*, g) *Pont sur la Paudèze*

8.1.2 Parameter definieren

In einem zweiten Schritt müssen die Parameter festgelegt werden, welche für die Erhaltungsplanung hilfreich sein könnten. Das heisst, dass neben den inhärenten Eigenschaften wie Material, Baujahr, etc. auch Parameter und Filter für die Repräsentation zusätzlicher Information vorbereitet werden. Mögliche solche Zusatzinformationen wären zum Beispiel der Zustand oder der Handlungsbedarf. Diese Informationen sind insbesondere interessant, wenn man diese für verschiedene Jahre oder Planungsperioden darstellen kann. Die Einrichtung der Parameter dient als Grundstruktur für die automatisierte Verknüpfung der Informationen im nachfolgenden Schritt.

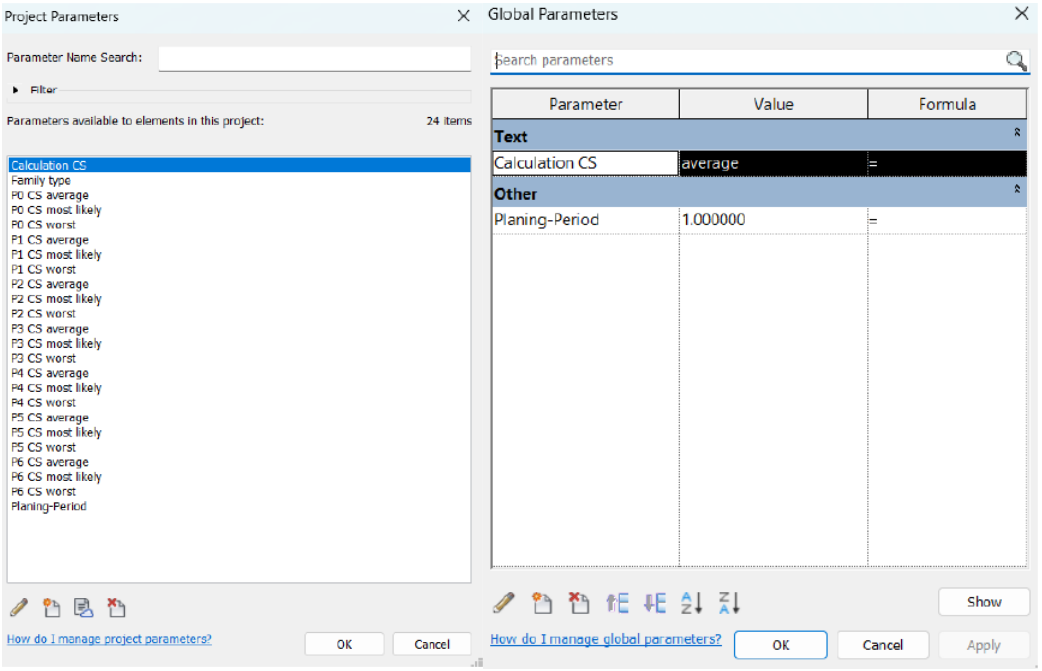


Abbildung 109: Definition der Parameter zur Darstellung (links) und Filterung (rechts) der Zustandsklassen in verschiedenen Planungsperioden.

Die Umsetzung im Rahmen des Projekts MINERVA fokussiert auf die Darstellung der gegenwärtigen und zukünftigen Zustände. In Autodesk Revit wurden entsprechend die Projektparameter definiert (Abbildung 109 links), welche für jedes Bauwerksteil vorhanden sind. In der Abbildung beschreiben P0 bis P6 verschiedene Planungsperioden (von bspw. 5 Jahren). Die Verwendung von drei verschiedenen Szenarien (average, most likely, worst) basiert auf der Probabilistischen Abschätzung der Zustandsklasse. Die verschiedenen Wahrscheinlichkeiten, in einer spezifischen Zustandsklasse zu sein, müssen, als einzelner Zustand repräsentiert werden, damit man diesen auch farblich im BIM darstellen kann.

Als Beispiel wird ein probabilistischer Zustand betrachtet mit ZK1=0%, ZK2=32%, ZK3=44%, ZK4=20% und ZK5=4%. Bei «average» wurde der auf den Wahrscheinlichkeiten jeder einzelnen Zustandsklasse gewichteter Mittelwert berechnet, was auf den Beispielzustand bezogen 2.98 ergibt (0*1+0.32*2+0.44*3+0.2*4+0.04*5=2.98). Bei «most likely» wird die Zustandsklasse angezeigt, welche die grösste Wahrscheinlichkeit besitzt, was auf den Beispielzustand Zustandsklasse 3 ergibt. Bei «worst» wird die schlechteste Zustandsklasse mit einer Wahrscheinlichkeit grösser als Null angezeigt,

was bei dem Beispielzustand die Zustandsklasse 5 ist. Diese Parameter können anschliessend als Filter für das ganze Modell verwendet werden (Abbildung 109 rechts).

8.1.3 Informationen verknüpfen

In einem dritten Schritt muss die Verknüpfung der Informationen mit dem BIM-Modell ermöglicht werden. Bezogen auf zukünftige Zustände müssen die Resultate der Abschätzungen über ein geeignetes Hilfsmittel mit den entsprechenden Bauwerksteilen im BIM verknüpft werden. Diese Verknüpfung weist den definierten Parametern für jedes Bauwerksteil die entsprechenden Informationen zu.

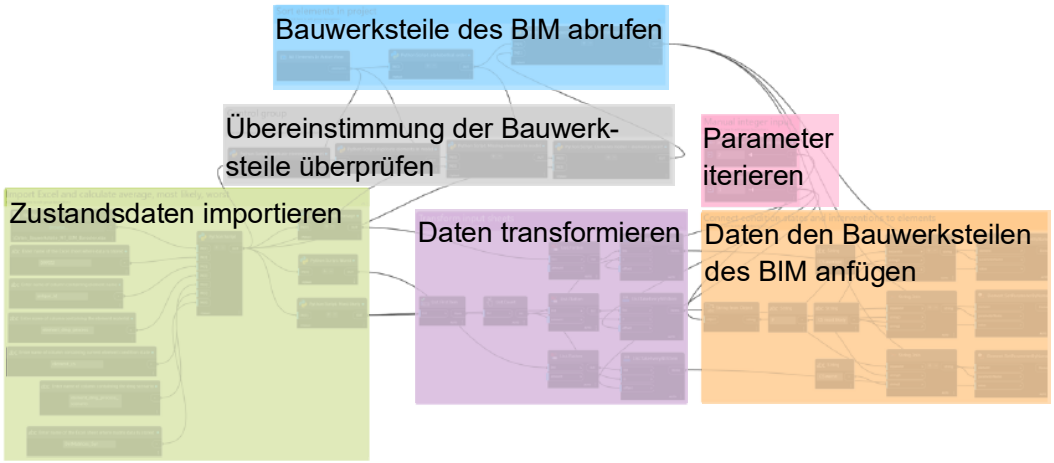


Abbildung 110: Grobe Darstellung der Informationsverknüpfung mit Dynamo.

In Autodesk Revit kann die Plattform namens Dynamo von Autodesk verwendet werden, welche eine Verknüpfung von Parametern in BIM mit externen Daten unterstützt. In einer visuellen Programmierungsoberfläche können anhand von vorhandenen oder selbstgeschriebenen Python-Knoten diese Verknüpfungen erstellt werden. Abbildung 110 zeigt eine grobe Darstellung der Verknüpfung der Zustandsinformationen mit den Bauwerksteilen im BIM-Modell. Im grünen Block werden die Zustandsinformationen für jedes Bauwerksteil eingelesen. Im grauen Block werden diese Bauwerksteile mit den im BIM-Modell vorhandenen Bauwerksteilen aus dem blauen Block abgeglichen, damit diese übereinstimmen. Während im violetten Block die Zustandsinformationen in ein passenderes Format transformiert werden, werden im pinken Block die Parameter für die verschiedenen Planungsperioden iteriert. Im orangen Block werden die Zustandsinformationen effektiv bei den Bauwerksteilen im BIM-Modell abgespeichert.

8.1.4 Visualisierungen ermöglichen

Im vierten Schritt werden verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten erstellt, welche Erhaltungsplanern entsprechende Unterstützung bei der Entscheidungsfindung bieten können. Diese sollen dem Entscheidungsträger die Möglichkeit geben, die Zustände für verschiedene Planungsperioden einzublenden, oder sich spezifische Bereiche eines Bauwerks genauer anzuschauen. Gleichzeitig wird ermöglicht, einzelne Bauwerksteile hervorzuheben oder auszublenden.

Im Rahmen des Projekts MINERVA wurden verschiedene Visualisierungen umgesetzt, welche unterschiedliche Betrachtungen zulassen. Die vorgängig vorgestellten

Parameter können so ausgewählt werden, dass das Modell die entsprechenden Zustandsabschätzungen in der dazugehörigen Farbe darstellt. Diese Auswahl kann einfach und schnell geändert und für beispielsweise die Betrachtung einer anderen Planungsperiode im Modell aktualisiert werden. Ebenfalls kann eingestellt werden, dass das Modell leicht transparent ist, damit darunterliegende Bauwerksteile sichtbar sind.

In Abbildung 111 wird eine Auswahl von Bauwerksteilen dargestellt. Einzelne oder eine Auswahl von Bauwerksteilen können auch isoliert dargestellt werden. Der Erhaltungsplaner kann so auch nur Bauwerksteile eines gewissen Zustands anzeigen lassen, oder nur Bauwerksteile eines spezifischen Typs (Bsp. Lager).

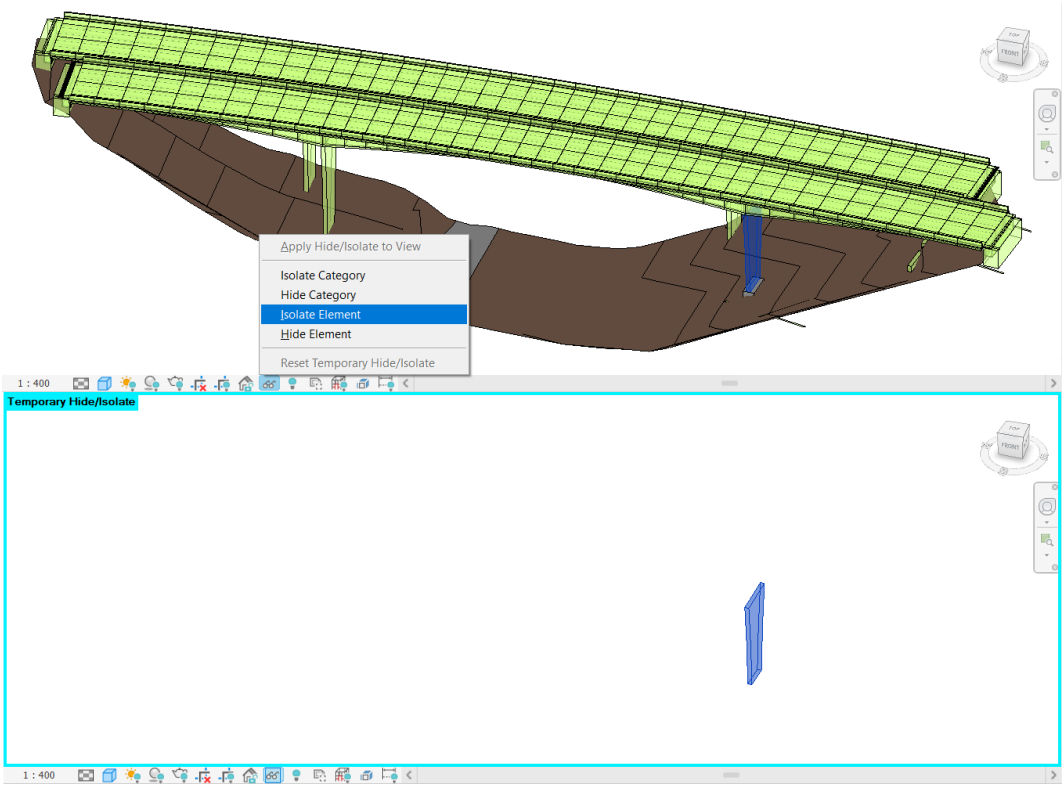


Abbildung 111: Auswahl einzelner Bauwerksteile mit der Möglichkeit diese isoliert zu betrachten.

Für eine schnelle Übersicht kann nach Auswahl der Parameter für die Planungsperiode und das zu betrachtende Zustandsszenario («average», «most likely», «worst») auch schnell ein Übersichtsblatt erstellt werden. Im Beispiel von Abbildung 112 sind die Bauwerksteile angeschrieben und entsprechend dem Zustand eingefärbt. Eine weitere Zusatzinformation wie zum Beispiel zukünftige Massnahmen kann durch die Verwendung von farbigen und gestrichelten Rändern dargestellt werden können.

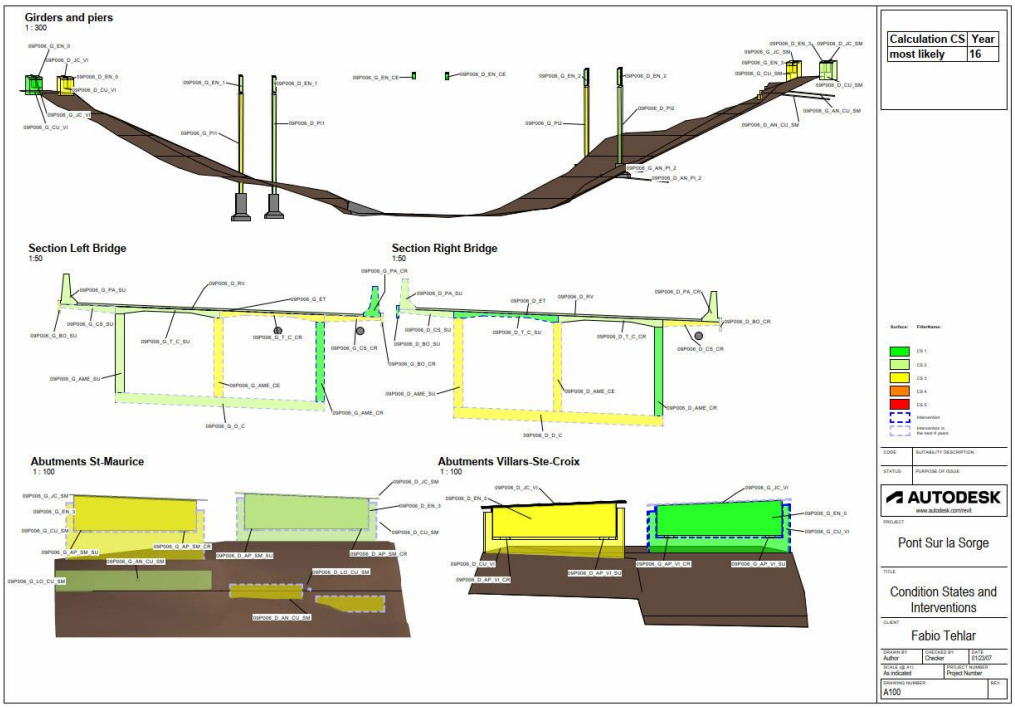


Abbildung 112: Mögliche Darstellung der Bauwerksteile eines Modells in einem Übersichtsblatt.

8.2 Integration der entwickelten Methoden in den Prozess

Inspektionsresultate bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsresultate können mit den Prognosemodellen verglichen werden und grosse Abweichungen notiert werden. In Tabelle 70 ist ein Beispiel dargestellt, wie für vier verschiedene Querträger einer Brücke die aktuelle Inspektion mit den Zustandsmodellen abgeglichen werden kann.

Beispiel: Vergleich Inspektionsresultate mit Zustandsmodellen

Bauwerksteil	Zustandsdatenquelle	ZK 1	ZK 2	ZK 3	ZK 4	ZK 5
Querträger Achse 1	Aktuelle Inspektion	0	1	0	0	0
Querträger Achse 1	Abschätzung anhand von vorheriger Inspektion	0	0.75	0.22	0.02	0.00
Querträger Achse 1	Abschätzung bed. Wahrscheinlichkeitstabelle	0	0.11	0.89	0.00	0
Querträger Achse 2	Aktuelle Inspektion	0	0	1	0	0
Querträger Achse 2	Abschätzung anhand von vorheriger Inspektion	0	0.75	0.22	0.02	0.00
Querträger Achse 2	Abschätzung bed. Wahrscheinlichkeitstabelle	0	0.11	0.89	0.00	0
Querträger Achse 3	Aktuelle Inspektion	0	0	1	0	0
Querträger Achse 3	Abschätzung anhand von vorheriger Inspektion	0	0	0.77	0.20	0.03
Querträger Achse 3	Abschätzung bed. Wahrscheinlichkeitstabelle	0	0.11	0.89	0.00	0
Querträger Achse 4	Aktuelle Inspektion	0	0	0	1	0

Querträger Achse 4	Abschätzung anhand von vorheriger Inspektion	0	0	0.77	0.20	0.03
Querträger Achse 4	Abschätzung bed. Wahrscheinlichkeitstabelle	0	0.11	0.89	0.00	0

Tabelle 70: Demonstration anhand eines Beispiels von vier Querträgern einer Brücke für den Vergleich der Zustandsmodelle mit den Inspektionsresultaten.

Querträger 1 ist gemäss der aktuellen Inspektion in Zustandsklasse 2 und basierend auf der Abschätzung anhand der vorherigen Inspektion ist dies auch weiterhin plausibel. Aufgrund gleicher Voraussetzungen für die Abschätzung mit den bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen, ist diese auch für alle drei dieselbe, mit der höchsten Wahrscheinlichkeit in ZK 3 zu sein. Querträger 2 war in der vorherigen Inspektion noch in ZK 2 ist jetzt aber in ZK 3, was auch plausibel ist. Querträger 3 ist und war bereits in ZK 3. Querträger 4 ist gemäss der aktuellen Inspektion in ZK 4, war jedoch bei der vorherigen Inspektion noch ZK 3. Gerade im Vergleich, dass an derselben Brücke auch noch Querträger in ZK 2 sind. Dies ist ein Beispiel, wie Zustandsmodelle auch anschliessend an Inspektionen interessante Hinweise geben können. Der Erhaltungsplaner hat so eine Unterstützung für die Entscheidung, ob eine vertiefte Untersuchung notwendig ist. Die Zustände von Abschätzungen oder Inspektionen können auch in BIM dargestellt werden um dem Erhaltungsplaner als visuelle Hilfe zu dienen (Abbildung 113). Bauwerksteile mit besonderer Abweichung von Abschätzung und Inspektionszustand können eingefärbt werden.

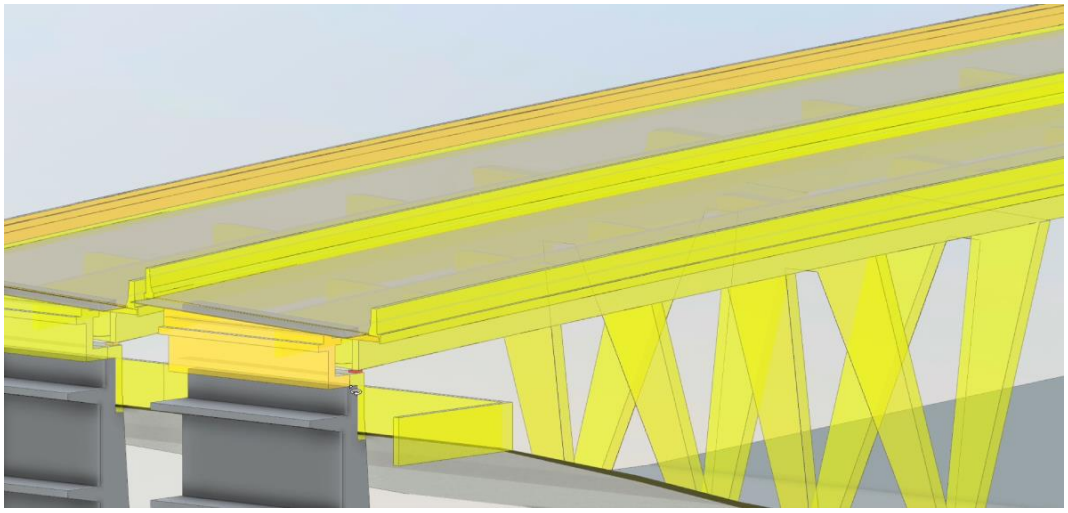


Abbildung 113: BIM-Modell mit den Bauwerksteilen gemäss dem Zustand eingefärbt.

Wenn anschliessend der Handlungsbedarf definiert wird kann der Erhaltungsplaner wieder auf eine Netzübersicht zugreifen, um Abschätzungen über verschiedene Zeithorizonte und Bauanlagen zu vergleichen (Abbildung 114).

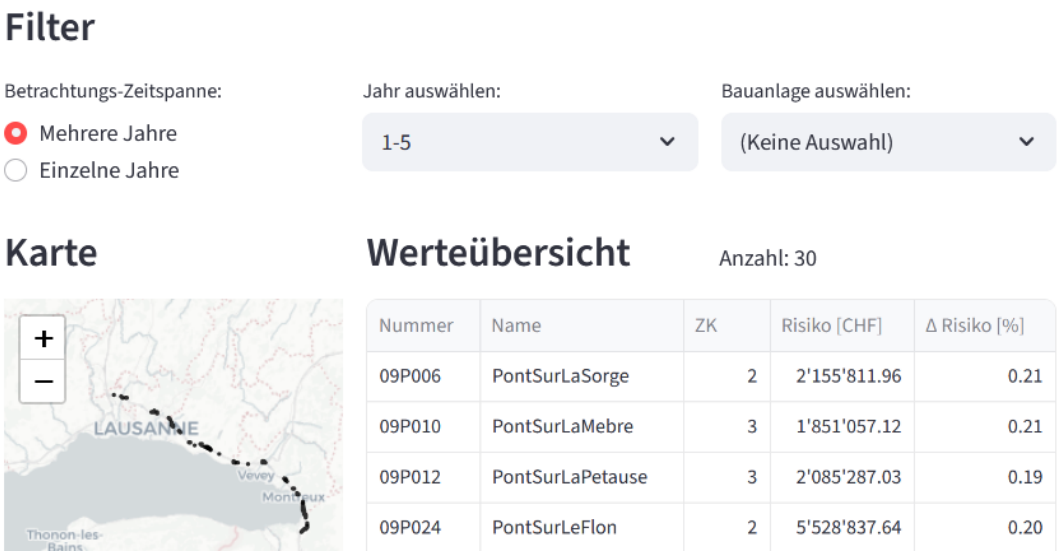


Abbildung 114: Netzübersicht zum Vergleich verschiedener Bauanlagen.

Da diese Zustandsprognosen, wie in Kapitel 6 gezeigt, auch in die Berechnung des Risikos einfliesst, kann auch das Risiko verschiedener Infrastrukturobjekte in einer übersichtlichen Art und Weise mit Karte und Tabelle dargestellt werden (Abbildung 115). Neben der Darstellung verschiedener Prognosejahre können auch die Ergebnisse für die verschiedenen Indikatoren bezüglich des Trassees dargestellt werden. Das berechnete Risiko der verschiedenen Infrastrukturobjekte kann anschliessend spezifisch betrachtet werden. Die berechneten Ergebnisse lassen sich nach spezifischen Prognosejahren oder Infrastrukturobjekten filtern und sortieren. In Abbildung 116 ist aufgezeigt, wie nach dem Delta-Risiko sortiert und ein entsprechendes Trassee-Teilstück auf der Karte betrachtet werden kann. Diese Darstellung kann so die Definition des Handlungsbedarfs unterstützen.

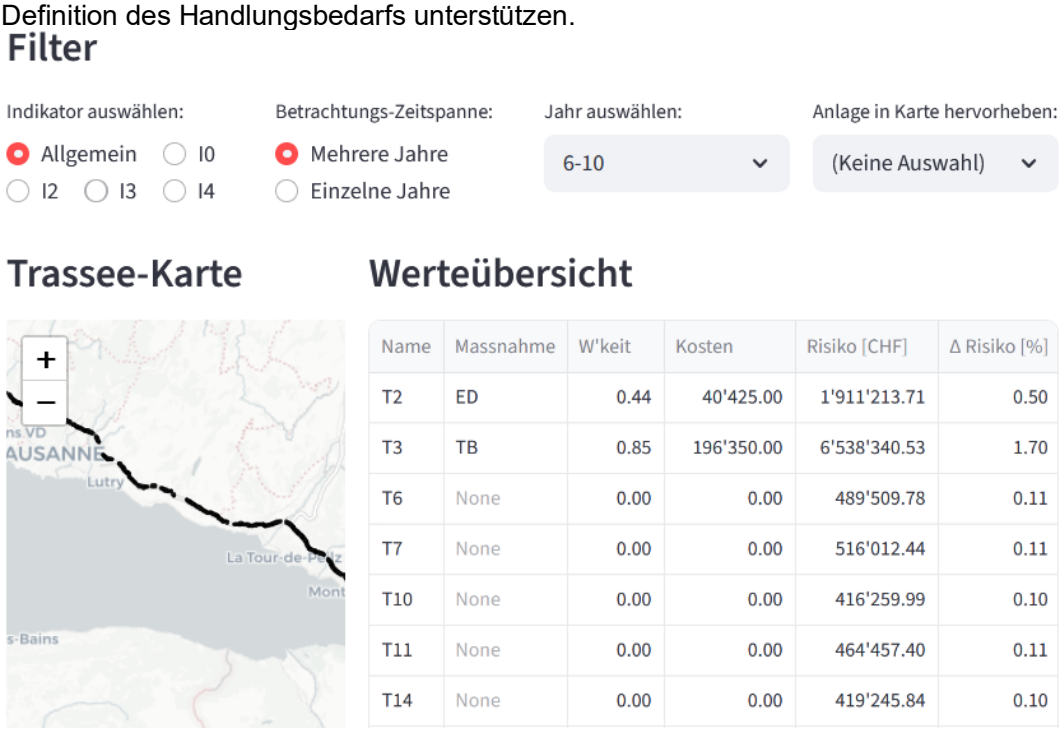
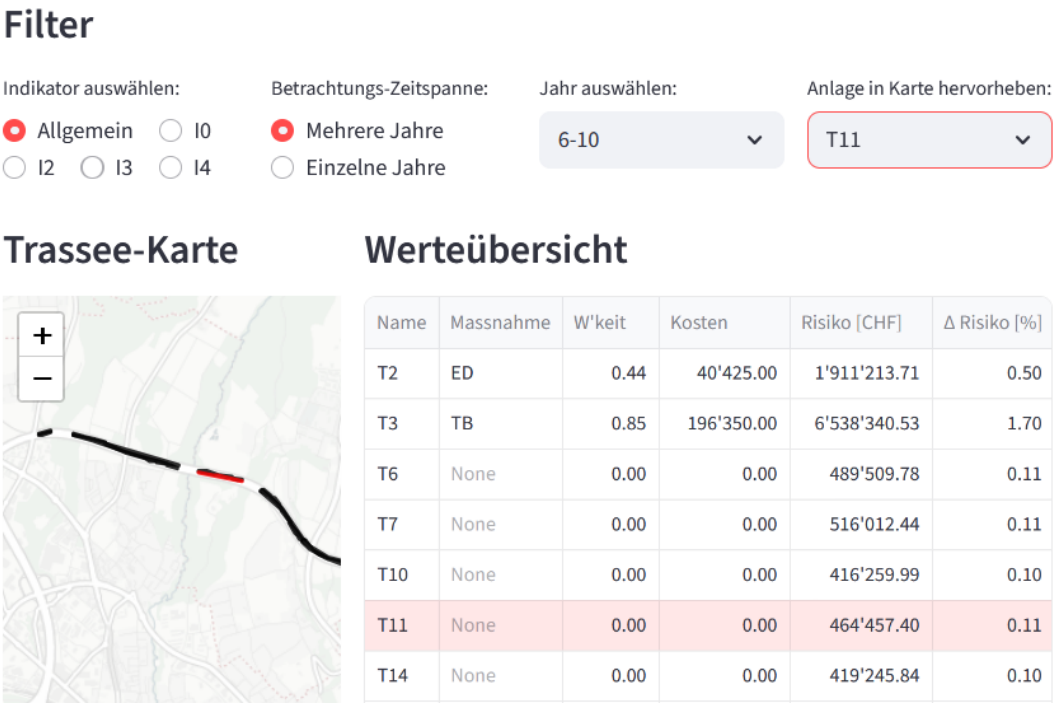


Abbildung 115: Darstellung des Risikos der Trassee-Teilstücke.



Name	Massnahme	W'keit	Kosten	Risiko [CHF]	Δ Risiko [%]
T2	ED	0.44	40'425.00	1'911'213.71	0.50
T3	TB	0.85	196'350.00	6'538'340.53	1.70
T6	None	0.00	0.00	489'509.78	0.11
T7	None	0.00	0.00	516'012.44	0.11
T10	None	0.00	0.00	416'259.99	0.10
T11	None	0.00	0.00	464'457.40	0.11
T14	None	0.00	0.00	419'245.84	0.10

Abbildung 116: Spezifische Betrachtung eines Trasse-Teilstücks auf der Karte mit der Übersichtstabelle daneben, sortiert nach dem Delta-Risiko.

Ist der Handlungsbedarf definiert, können die Resultate in den Bündelungsalgorithmus gegeben werden, welcher optimale Erhaltungsabschnitte mit den entsprechenden Massnahmen für die spezifizierte Planungsperiode ausgibt. In Abbildung 117 sind resultierende Erhaltungsabschnitte (helle Farbe) und vorgeschlagene Massnahmen (dunkle Farbe und Marker) dargestellt. Erhaltungsabschnitte und Massnahmen können auch separat angeschaut, oder gefiltert werden nach spezifischen Jahren der Planungsperiode (Farben, vergleiche Abbildung 100 und folgende ab Seite 252).



Abbildung 117: Darstellung der Bündelung von Massnahmen für fünf verschiedene Jahre der Planungsperiode (Farben, Blau = Jahr 1, Grün = Jahr 2, Orange = Jahr 3, Violett = Jahr 4, Rot = Jahr 5).

Neben dieser Darstellung auf der Karte bieten Tabellen nebenan eine Übersicht zu den verschiedenen Erhaltungsabschnitten und ausgewählten Massnahmen (Abbildung 118, Abbildung 119) mit zusätzlichen Informationen wie beispielsweise Ausführungszeitpunkt (Jahr), Dauer, Kosten und Nutzen.

Anlage	Jahr	Massnahme	Dauer [h]	Fixkosten [Mio. CHF]	Nutzen [Mio. CHF]	Erhaltungsabschnitt
PontSurLeFlon	7	Bridge middle IV	24000	0	1.28	TS4_6500_11700_Sec_14_to_24
PontSurLaPaudeze	7	Bridge big IV	3600	0	-2.13	TS4_6500_11700_Sec_14_to_24
TunnelDeBelmont	7	Tunnel small IV	1440	0	-0.18	TS4_6500_11700_Sec_14_to_24
PontAJCTLausanne	7	Bridge small IV	1200	0	-0.35	TS4_6500_11700_Sec_14_to_24
PontSurLaChandela	7	Bridge small IV	1200	0	0.6	TS4_6500_11700_Sec_14_to_24
T28	7	Pavement ED	86.4	0	-0.68	TS4_6500_11700_Sec_14_to_24
T29	7	Pavement ED	86.4	0	-0.69	TS4_6500_11700_Sec_14_to_24
T33	7	Pavement ED	57.6	-0.03	-0.93	TS4_6500_11700_Sec_14_to_24
T32	7	Pavement ED	57.6	-0.02	-0.7	TS4_6500_11700_Sec_14_to_24

Abbildung 118: Tabellendarstellung der gebündelten Massnahmen in Jahr 7 der Planungsperiode.

Erhaltungsabschnitt	Jahr	Zeitfenster	Dauer [h]	Kosten [Mio. CHF]	Anlagen
TS27_0_5000_Sec_1_to_10	6	Continuous	24000	104.48	['PontSurLaSorge', 'PontSurLaPetause', 'CH:N9+_10
TS27_30700_37600_Sec_67_to_77	6	Continuous	5760	30.41	['TunnelDeGlion', 'PontSurLaBayeDeClarens', 'Pont
TS4_6500_11700_Sec_14_to_24	7	Continuous	24000	108.17	['PontSurLeFlon', 'PontSurLaPaudeze', 'TunnelDeBe
TS9_17500_22500_Sec_37_to_50	8	Continuous	2880	11.06	['TunnelDuFlonzaley', 'PontSurLaSalenche', 'PontD
TS76_13000_18100_Sec_28_to_39	9	Continuous	1272	4.78	['PontDeLaCriblette', 'EstacadeEnJerusalem', 'Pont
TS76_28500_33500_Sec_63_to_73	9	Continuous	244.8	0.98	['CH:N9+_300_0_300_700_Pvmt', 'CH:N9-_300_0_3
TS5_8800_14000_Sec_19_to_29	10	Continuous	3600	12.34	['PontSurLaLutrive']

Abbildung 119: Tabellendarstellung der Erhaltungsabschnitte für unterschiedliche Jahre der Planungsperiode.

9 Diskussion

Die Methoden zur Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Zuständen, der Prognose von Unterhaltsmassnahmen, sowie der automatischen Bündelung von Massnahmen wurden in den vorangehenden Kapiteln vorgestellt. Ebenfalls wurden Resultate bei deren Anwendung an der Testrecke vorgestellt und besprochen. Wie alle die vorgestellten Methoden in einer Herangehensweise zusammengefügt werden, wird im Kapitel der Demonstration gezeigt. In diesem Kapitel wird diese integrierte Planung von Unterhaltsmassnahmen auf Strassenabschnitten, die aus Anlagen unterschiedlicher Art bestehen diskutiert.

9.1 Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen Infrastrukturzuständen

Für eine integrierte Planung von Unterhaltsmassnahmen auf Strassenabschnitten sind vollständige und konsistente Daten essenziell, besonders, wenn man den Prozess der Planung mit digitalen Hilfsmitteln unterstützen will. In Kapitel 5 zur Abschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Zustandes von Infrastrukturobjekten wurden Methoden vorgestellt, welche für Brücken sowie das Trassee Zustandsdatensätze durch Abschätzungen vereinheitlichen können. Eine Vereinheitlichung in dem Sinne, dass für alle relevanten Objekte Zustandsdaten zu den erwünschten Zeitpunkten vorhanden sind. Dies damit weiterführende Algorithmen diese berücksichtigen können unabhängig von ursprünglich fehlenden oder veralteten Daten.

Bei der Abschätzung des gegenwärtigen Zustands von Bauwerksteilen von Brücken wurden verschiedene Annahmen getroffen, welche zu diskutieren sind. Eine dieser Annahmen ist die Wahl der zu berücksichtigenden Einflussgrössen Alter, Verkehr und Umwelt. Wie bereits in der Methodik erklärt, wurde versucht diese Einflussgrössen so zu wählen, dass diese einerseits allgemein genug sind, um möglichst alle denkbaren Einflüsse abzudecken, und diese andererseits nur geringfügig voneinander abhängig sind, d.h. weitgehend orthogonal. Diese Wahl der Einflussgrössen könnte man noch vertiefter untersuchen, sollte jedoch die Auswirkung auf die Ermittlung der Gewichte mittels AHP im Auge behalten. Eine mögliche Erweiterung wäre die Berücksichtigung einer Einflussgrösse Bauart, welche zum Beispiel bezüglich des Materials oder der Geometrie eine Aussage, wie unvorteilhaft, neutral oder vorteilhaft die Bauweise ist, in das Bayes'sche Netz einfliessen lassen könnte.

Ebenfalls sind die für das Bayes'sche Netz gewählten uniformen Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu diskutieren. Mit zusätzlichen und präziseren Informationen lassen sich die Wahrscheinlichkeitsverteilungen noch genauer bestimmen (Bsp. Weibull-Verteilung für schiefe Verteilungen). Die Festlegung einer solchen Verteilung spielt eine zentrale Rolle, da sie massgeblich die Resultate in der Tabelle der bedingten Wahrscheinlichkeiten beeinflusst, also bestimmt, welcher Kombination von Einflussgrössen ein Simulationsresultat zugeordnet wird und wie sich daraus die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Zustandsklassen ergeben. Die Zuweisung eines Wertebereichs entspricht

somit ebenfalls der Festlegung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, die mangels weiterführender Argumente als uniform, also nicht-informativ, angenommen wurde und daher vertiefter untersucht werden könnte (z.B. empirische Herleitung). Die Zuteilung der Einflusswertebereiche könnte auch mit Fuzzy-Logik noch ergänzt werden, was auch etwas breitere Verteilungen in der resultierenden bedingten Wahrscheinlichkeitstabelle ermöglichen würde. Dies würde somit auch speziellere Fälle wie zum Beispiel sehr gute Zustände trotz fortgeschrittener Nutzungsdauer besser abbilden. Es ist auch so, dass dieser Ansatz gewissermassen eine synthetische Abschätzung des Zustandes ist, und dadurch vor allem für die Situation ohne vorhandene Zustandsdaten von besonderem Nutzen ist. Mit vorhandenen Zustandsdaten könnte eine Feinjustierung gemacht werden, jedoch mit entsprechender Vorsicht vor einer Überanpassung an die Daten (Overfitting).

Auch die Gewichtung der Einflussgrössen durch die Experten ist durch die vorhandenen ausgefüllten Expertenfragebögen bestimmt (MINERVA-Datensatz, zusammengefasst im Anhang in Tabelle 81). Diese Erhebung könnte noch intensiver gemacht werden mit zum Beispiel Delphi-Interviews. Die Anzahl von sechs Experten könnte noch erhöht werden, obwohl die Einbeziehung einer grösseren Anzahl an Fachpersonen gemäss (Saaty & Özdemir, 2014) nicht zwingend zu einer höheren Qualität der aggregierten Resultate führt. Die Autoren empfehlen eine Gruppengrösse von fünf bis sieben Personen als optimal, da in diesem Bereich eine ausgewogene Balance zwischen Genauigkeit und Vielfalt erreicht wird, ohne dass übermässige Inkonsistenzen oder Störeinflüsse in die Bewertungen einfliessen. Es ist wichtig, dass man gute Experten hat. Einzelne Expertinnen oder Experten dürfen dabei durchaus von der aggregierten Einschätzung abweichen, solange die daraus resultierenden aggregierten Matrizen insgesamt konsistent bleiben. Ebenfalls zu beachten ist, dass die Auswertung der Methodik mit den bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen für die Abschätzung des gegenwärtigen Zustands von Brückenbauwerksteilen vom verwendeten Datensatz abhängt (Bias). Das heisst, dass die Metriken weiterhin mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten sind. Dies weil der Datensatz voraussichtlich nicht sehr ausgeglichen ist und viele, der für die Auswertung vorhandenen Bauwerksteile, ein ähnliches Alter haben und somit nicht das ganze Spektrum möglicher Abschätzungen repräsentieren.

Bezüglich zukünftiger Zustände bei Brücken wurde primär das Vorgehen aus KUBA-MS mit Verfallsmatrizen aufgenommen. In KUBA-MS sind diese für 5-Jahres-Schritte definiert. In diesem Bericht wurden die vorhandenen 5-Jahres-Matrizen zu 1-Jahres-Matrizen umgewandelt, damit diese verwendet werden können, um Zustände aus verschiedenen Jahren in ein gleiches Jahr zu transformieren. Alle für alle Bauwerksteile Zustände im gewählten Referenzjahr zu haben ist für weiterführende Algorithmen essenziell, um konsistente Vergleiche anstellen zu können. Diese 1-Jahres- Matrizen haben aber auch Nachteile, dass zum Beispiel schlechtere Zustandsklassen schneller eine kleine Wahrscheinlichkeit erhalten, dass sich ein Bauwerksteil in dieser Zustandsklasse befindet. Dies hat insbesondere Auswirkungen auf die Berechnung des Risikos bei der Prognose von Unterhaltsmassnahmen, weil dort die Wahrscheinlichkeit einer Schlechten Zustandsklasse direkt miteinfliesst. Für diese 5- oder 1-Jahres-Matrizen wurde ebenfalls eine Methodik vorgestellt (Kapitel 5.1.2.2), welche die zeitliche Homogenität der Verfallsmatrix hinterfragt und nicht-stationäre Verfallsmatrizen erzeugt. Dies kann in Abhängigkeit des Bauwerksteilalters erfolgen, oder als Funktion der

Anzahl der bereits ausgeführten Unterhaltsmassnahmen an einem Bauwerksteil, sofern die Datenbasis dafür vorhanden ist. Dies würde die Tatsache modellieren, dass jede Unterhaltsmassnahme einen Einfluss auf die Verfallsgeschwindigkeit hat. Zusätzlich kann ein «Abbruchkriterium» definiert werden, nach wie vielen Unterhaltsmassnahmen ein Ersatz notwendig ist.

Die verwendeten Verfallsmatrizen aus KUBA-MS gelten für die ganze Schweiz und sind eine Funktion des primären Schadensprozesses sowie der drei möglichen Einflussfaktoren. Wenn genügende Daten vorhanden sind, können die Verfallsmatrizen auch enger definiert werden. Dies bedeutet, dass der Einfluss von mehreren Faktoren bestimmt wird, wie z.B. DTV, Umwelt, in der Vergangenheit durchgeführte Unterhaltsmassnahmen und deren Zeitpunkte, Niveau des betrieblichen Unterhalts, Bauwerksteiltyp und geodätische Höhe (Eine ähnliche Analyse wurde im Projekt Endure durchgeführt (Marsili et al., 2024)). Die Tatsache, dass der Schadensprozess die Verfallsrate weitgehend bestimmt, sollte jedoch beibehalten werden. Der Mehrwert einer solchen Erweiterung liegt darin, dass die Resultate den tatsächlichen Verfall besser widerspiegeln und es legitim wird, Analysen auch auf kleineren Gebietsausschnitten durchzuführen. Grundlage dafür ist aber auch, dass Informationen wie beispielsweise die Anzahl durchgeführter Unterhaltsmassnahmen, oder deren Zeitpunkte, auch auf der Ebene der Bauwerksteile und nicht bloss der Ebene der Bauanlagen erfasst wird. Dies damit auch zu einem späteren Zeitpunkt klar ist, an welchem Bauwerksteil was gemacht wurde.

Bei der Abschätzung des gegenwärtigen Zustands des Trassees wurde mit dem ANN-Kriging eine Methodik vorgestellt, welche eine verbesserte Abschätzung von fehlenden Datenpunkten ermöglicht. Es ist zu bemerken, dass es für die Anwendung dieser Methodik erforderlich ist, dass die Zustandsnoten der benachbarten Bewertungsflächen vorhanden sind. Unter dieser Berücksichtigung kann man feststellen, dass mit dieser Methodik des ANN-Krigings die gegenwärtigen Zustandsnoten der vier Zustandsindikatoren der Fahrbahn mit vernünftiger Genauigkeit von durchschnittlich 0.25 bis 0.55 Zustandsnote abgeschätzt werden können. Das ANN-Kriging ist im Vergleich mit der angeschauten Alternative der linearen Interpolation in den meisten Fällen etwas genauer. Das ANN-Kriging-Modell bildet also eine gute Möglichkeit, wenn man mit fehlenden Zustandsdaten zu tun hat und man trotzdem möglichst vollständige Datensätze für die Verwendung von Algorithmen für die Abschätzung von zukünftigen Massnahmen haben möchte.

Für die Abschätzung des zukünftigen Zustands des Trassees wurde ein EKF (extended Kalmann Filter) vorgestellt. Dieser verwendet das Alter des Deckbelags als Startpunkt für die Prognose der verschiedenen Zustandsindikatoren. Diese Prognosen wurden als Potenzfunktion den vorhandenen Daten angeglichen. Dies bedeutet, dass diese sehr abhängig sind von der Qualität dieser Zustandsdaten. Dies war nicht für alle Zustandsindikatoren gleichermassen erfolgsversprechend. Die Abschätzungen für alle vier Indikatoren unterscheiden sich unter Berücksichtigung der Unsicherheiten durchschnittlich ca. 0.310 bis 0.498 Zustandsnoten vom Vergleichswert aus der Zustandserfassung und -bewertung. Diese Abhängigkeit von den Daten kann aber auch dazu führen, dass wie beispielsweise bei Indikator I4 eine sehr flache Kurve gefunden wurde, welche nur wenig Aussagekraft hat. Dementsprechend können auch

vorgegebene Verhaltenskurven verwendet werden. Denn die eigentliche Stärke dieser Methode ist, dass die Prognose aufgrund von neuen Zustandsdaten angepasst werden kann und dabei nicht nur einen Erwartungswert abschätzt, sondern auch die Varianz der abgeschätzten Verteilung zur Quantifizierung der Unsicherheit ausgibt.

Die Resultate zeigen grundsätzlich eine gute Übereinstimmung der Abschätzungen mit den erfassten Zustandsnoten mit einem CRPS-Fehlermass, welches ebenfalls die Unsicherheit berücksichtigt, von weniger als 0.5 Zustandsnote für alle vier Indikatoren. Die Resultate können aber nur so gut sein, wie es die Daten zulassen, denn bei vielen Bewertungsflächen treten während der Nutzungsdauer des Deckbelags spontane Zustandsverbesserungen auf, obwohl bezüglich Massnahmen gefiltert wurde. Der Qualität und der Verlässlichkeit der Trassee-Daten spielt entsprechend eine besonders wichtige Rolle für gute Prognosen.

9.2 Prognose von Unterhaltsmassnahmen

Die in Kapitel 6 zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen vorgestellte Methodik bzw. Algorithmus hat das übergeordnete Ziel, Erhaltungsplanern in Ihrer Aufgabe «einen haushälterischen Umgang mit den finanziellen Mitteln sowie ein nutzerfreundliches Angebot zu gewährleisten» zu unterstützen. Die vorgeschlagene Methodik ermöglicht den Erhaltungsplanern, einen effizienten und frühzeitigen Überblick über den Unterhaltsbedarf auf der Ebene von Bauwerksteilen sowie Trassee-Teilstücken, die damit verbundenen Kosten und das damit verbundene Sofortmassnahmenrisiko in zukünftigen Planungsperioden zu erhalten. Diese Berücksichtigungen sollen die Erhaltungsplaner unterstützen, besonders bei der Priorisierung der vertieften Untersuchungen, bei der Bestimmung des Handlungsbedarfs und bei der Festlegung der in die Mehrjahresplanung aufzunehmenden Unterhaltsmassnahmen. Das Sofortmassnahmenrisiko ist ein wichtiges Instrument zur Entscheidungsfindung. Es zeigt auf, dass nicht jedes Unterhaltsprojekt dieselbe Auswirkung auf die Risikoreduzierung hat. Angesichts der limitierten monetären und personellen Ressourcen ist es oft nicht möglich, jede vertiefte Untersuchung zum gewünschten Zeitpunkt durchzuführen. In vielen Fällen ist dies auch nicht erforderlich, da möglicherweise kein akutes Sofortmassnahmenrisiko vorliegt. Monetär betrachtet ist es zudem entscheidend, Projekte über mehrere Planungsperioden zu verteilen, um Kostenspitzen zu vermeiden. Hierbei unterstützt die Risikoanalyse dabei, Prioritäten zu setzen und die dringlichsten Projekte zu identifizieren, die in den Handlungsbedarf müssen, sowie diese zu identifizieren, die in der Mehrjahresplanung verbleiben können. Die vorgestellte Methodik ist keinen Ersatz für schon bestehende Prozessschritte in der Erhaltungsplanung, sondern wird als eine Entscheidungsstütze gesehen. Insofern ist eine Anwendung zur Abschätzung des Handlungsbedarfs, zur Planung vertiefter Untersuchungen und zur mittelfristigen Investitionsschätzung für eine Unterhaltsregion oder Filiale sinnvoll. Im ASTRA ist der Rahmen gegeben, um die in diesem Bericht vorgestellte Prognose von Unterhaltsmassnahmen umzusetzen. Die Ergebnisse dieses Berichts sind aber mit Vorbehalten zu verwenden, da speziell bei der Risikoabschätzung viele Annäherungen, Abschätzungen und Annahmen getroffen wurden. Sie zeigen jedoch, dass einer Umsetzung nichts im Wege steht.

Bezüglich Brücken berücksichtigt die Methodik den Zustand der Bauwerksteile, ihre Schadensprozesse, Massnahmenstrategien auf Bauwerksteilebene und tolerierbare Schwellenwerte für das Sofortmassnahmenrisiko. Der Fokus lag auf der Funktionsweise des bestehenden KUBA-MS Algorithmus und dessen punktuelle Erweiterung mit der Berechnung des Sofortmassnahmenrisikos. Der Fokus lag nicht darauf, die Berechnungsmethoden, also z.B. das Verfahren zur Berechnung des zukünftigen Zustands eines Bauwerksteils, in Frage zu stellen. KUBA-MS hat bereits gezeigt, dass es möglich ist, Unterhaltsmassnahmen und die damit verbundenen Kosten zu prognostizieren. Die Erweiterung mit der Risikoanalyse kann jedoch nicht einfach nach Baukastenprinzip erfolgen, sondern es muss festgelegt werden, welchen Detaillierungsgrad die Fehlerbäume abdecken können müssen und dabei darf die Vergleichbarkeit der Resultate auf Netzebene nicht verloren gehen. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wurde das Sofortmassnahmenrisiko aus der Summe von drei Top-Ereignissen gebildet. Jedes dieser Top-Ereignisse repräsentiert eine Sofortmassnahme, die eine bestimmte Leistungseinschränkung zur Folge hat. Die drei häufigsten eingeschränkten Verkehrszustände – Geschwindigkeitsreduktion, Kapazitätsreduktion und Schliessung – wurden dabei berücksichtigt. Zudem wurden für die Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten Fehlerbäume eingesetzt, die die Ursachen für Sofortmassnahmen in Basisereignisse gliedern. Aus diesen kann die Wahrscheinlichkeit für das Top-Ereignis berechnet werden. Besonders für die Anwendung auf verschiedene Brücken hat sich dieser Ansatz als einfach, effektiv und als genau genug erwiesen. Vorteilhaft ist auch, dass die drei Hauptäste in den Fehlerbäumen stets gleich gewählt wurden: Diese repräsentieren die Zwischenereignisse «alarmierende sichtbare Schäden», «externe Ereignisse» und «unzureichender statischer Nachweis». Diese Gliederung soll die Denkweise von Ingenieuren, insbesondere von Erhaltungsplanern, widerspiegeln, indem sie sowohl die Tragsicherheit als auch die Einwirkungen und potenzielle menschliche Fehler berücksichtigt.

- Die Basisereignisse des Astes „alarmierende sichtbare Schäden“ basieren auf den Bauwerksteilen und deren prognostizierten Zuständen. Dies ermöglicht eine einfache Berechnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten und erfasst den Wunsch des Erhaltungsplaners nach Sofortmassnahmen bei Zuständen, die schlechter sind als in der Massnahmenstrategie festgelegt.
- Der Ast „externe Ereignisse“ untersucht extreme Ereignisse, die tatsächlich eintreten können und eine Sorge für Brückenbauer sowie Erhaltungsplaner darstellen.
- Der letzte Ast „unzureichender statischer Nachweis“ thematisiert die Bedenken der Erhaltungsplaner, dass etwas falsch geplant, ausgeführt oder überwacht wurde. Der Fehlerbaum berücksichtigt dieses Risiko und wird von Bauingenieuren hoffentlich als realitätsnäher angesehen.

Bei der Berechnung der Konsequenzen ist ein sinnvoller Detaillierungsgrad zu wählen. Die Nutzerkosten, die sich aus der zusätzlichen Reisezeit ergeben, wurden hierbei berücksichtigt, während die Berechnung der Betreiberkosten simpel ausfiel. Hier zeigt sich die grösste Schwäche der vorgestellten Risikoanalyse: Die Betreiberkosten für ein Top-Ereignis müssen definiert werden, obwohl nur für die jeweiligen Basisereignisse eine ungefähre Abschätzung der Betreiberkosten möglich ist. Zur Berücksichtigung der Betreiberkosten wurde ein prozentualer Teil der Gesamtkosten für den Brückenersatz angesetzt. Letztendlich ist dies jedoch nicht allzu problematisch, da die Nutzerkosten in der Praxis und in dem Beispiel für Hochleistungsstrassen fast immer die massgeblichen Konsequenzen der Leistungseinschränkung sind. Für eine Realisierung im

ASTRA wird empfohlen, einen ähnlichen Detaillierungsgrad anzustreben wie im Bericht dargestellt. Auf diese Weise können die erforderlichen Daten für alle Brücken in einem wirtschaftlichen Zeitrahmen ermittelt werden. So wie die Fehlerbäume vorgeschlagen wurden, werden alle Bauwerkteile gleichbehandelt, was das Auslösen einer Sofortmassnahme betrifft und die daraus resultierende Leistungseinschränkung. In einer praktischen Umsetzung müsste jedoch über Brückenexperten festgelegt werden, inwiefern eine Bauwerksteilmassnahme überhaupt eine Sofortmassnahme auslöst und welche Konsequenzen sich daraus für die Leistungseinschränkung ergeben. Für akademische Demonstrationszwecke werden die gewählten Fehlerbäume als ausreichend angesehen.

Für das Trassee wurde lediglich eine vereinfachte Abschätzung des Risikos vorgenommen. Diese ist in der vorliegenden Form nicht für eine direkte Anwendung in der Praxis empfohlen. Es stellt sich die Frage, inwiefern das Risiko einzelner Trassee-Teilstücke überhaupt sinnvoll berechnet werden kann, oder ob eine Analyse immer über grössere Abschnitte erfolgen sollte – beispielsweise zwischen Autobahnknoten. Auch ist der Verfall vielleicht nur für eine Fahrtrichtung relevant aber ein Externes Ereignis, wie ein Erdbeben, für beide Fahrtrichtungen. Eine solche Änderung würde bedeuten, dass die Priorisierung des Unterhaltsbedarfs auf Abschnitten und nicht auf etwa 500 m langen Teilstücken erfolgt. Im Hinblick auf die Prognose von Unterhaltsmassnahmen hätte jedoch eine andere Definition der Trassee-Teilstücke bzw. Erhaltungsobjekte direkten Einfluss auf die Ergebnisse. Eine besondere Herausforderung beim Trassee liegt in seiner kontinuierlichen und heterogenen Struktur: Zustandsmerkmale variieren sowohl längs als auch quer zur Fahrbahn. Daher wäre es sinnvoll, die Grenzen der Trassee-Teilstücke nach jeder Inspektion dynamisch und automatisch neu zu definieren, basierend auf den aktuellen Zustandswerten der Bewertungsflächen. In weiterführenden Arbeiten sollte vertieft untersucht werden, wie aus einem Raster von Zustandswerten jene Flächen abgegrenzt werden können, die eine prognostizierte Massnahme erhalten sollen, während angrenzende Flächen keine oder eine andere Massnahme benötigen. Wenn eine automatisierte Bündelung von Unterhaltsmassnahmen angestrebt wird, hat dies wiederum Einfluss auf die Definition der Trassee-Teilstücke bzw. Erhaltungsobjekte und muss in die diese Definition mit einfliessen.

Wichtige Diskussionspunkte für Brücken und Trassee sind zudem:

- Die Abschätzung der Zustandsdaten bildet die Grundlage für die Prognose und beeinflusst somit den Zeitpunkt, zu dem eine Unterhaltsmassnahme vorgeschlagen wird. In diesem Sinne ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Prognose immer etwas zu pessimistisch oder optimistisch ausfällt und daher nur als Entscheidungshilfe und nicht als Grundlage dienen kann.
- Obwohl probabilistisch prognostiziert wurde, erfolgte für beide Anlagenarten eine deterministische Wahl der Unterhaltsmassnahme. Die Regeln für die Umwandlung von probabilistisch zu deterministisch sind lediglich eine Annahme und müssten auf strategischer Ebene vom ASTRA festgelegt werden. Es wird jedoch empfohlen, die Wahrscheinlichkeit der möglichen Unterhaltsmassnahmen zur Entscheidungsunterstützung zu verwenden. Für diesen Bericht bedeutet dies, dass der Zeitpunkt einer vorgeschlagenen Unterhaltsmassnahme und somit auch die Zeit- und Kostenschätzungen von diesen Regeln der Umwandlung beeinflusst sind.

- Der Einsatz von neuartigen Messmethoden zur Unterstützung von Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung mit dem Potential bessere Zustandsdaten zu liefern, würden entsprechen auch die Prognose von Unterhaltsmassnahmen verbessern. Beispielsweise haben neuartige Laser-Methoden, welche ganze Flächen aufnehmen können, das Potential bessere Zustandsdaten zu liefern, was wiederum zu besseren Prognosen führt (ASTRA, 2024e, 2025b). Konkret mussten für die Abschätzung des Zustands des Trassees a priori-Funktionen für alle Zustandsindizes definiert werden, da die empirisch ermittelten Werte nicht realitätsnah waren.
- Mit der vorhandenen Datengrundlage ist eine Abschätzung der Dauer einer Unterhaltsmassnahme nicht möglich. Eine schnelle, ungefähre Berechnung der Bauzeit, eventuell mit Variabilität, wäre eine nützliche Information für eine Projektidee. Diese neue Information würde auch eine genauere Risikoberechnung ermöglichen. So wäre die Leistungseinschränkung für jedes Infrastrukturobjekt individuell definiert und nicht global. Es würde einen Mehrwert generieren, dies innerhalb des ASTRAS oder als Forschungsprojekt zu ermitteln.
- Die Wahrscheinlichkeiten der Basisereignisse wurden sowohl für Brücken als auch für das Trassee sehr grob angenähert. Es gibt jedoch bereits heute frei zugängliche Geodaten, wie beispielsweise die Gefahrenkarte, die hinzugezogen werden könnten. Dies würde zu genaueren Ergebnissen führen und einen schweizweit anwendbaren Workflow unterstützen.
- Es ist nicht hilfreich, nur das totale Risiko zu betrachten, da dieses, wie gezeigt, erheblich vom Ausmass des betrachteten Objekts abhängt. Beispielsweise gibt es bei einem Viadukt viele Bauwerksteile, die potenziell ausfallen und Kosten verursachen können. Selbst in einem besseren Zustand kann ein langes Bauwerk somit ein höheres absolutes Risiko aufweisen als ein kurzes Bauwerk in einem schlechteren Zustand. Angenommen, ein Viadukt und eine kurze Brücke liegen auf demselben Abschnitt und dazwischen gibt es keine Ein- und Ausfahrten, so ist es für die Nutzer wichtig, dass sie ohne Leistungseinschränkung verkehren können. In diesem Fall ist es wichtig, das gewichtete Risiko oder das Delta-Risiko bei der Entscheidung zu berücksichtigen, da es ein besseres Signal für die Wahrscheinlichkeit des Sofortmassnahmenrisikos und somit für eine Leistungseinschränkung für den Nutzer ist. Den für das Delta-Risiko gewählte Risikogrenzwert ist in jedem Fall auf strategischer Ebene festzulegen.

Die grob abgeschätzten Ergebnisse werden für die genannten Anwendungsbereiche als ausreichend angesehen. Eine vertiefte Analyse, bei der neben dem Zustand auch andere Entscheidungsvariablen als Grundlage dienen, ist erst auf Projektebene sinnvoll. Zu diesem Zeitpunkt sind deutlich mehr Randbedingungen geklärt und es ist erforderlich, ein genaues Budget zu erstellen und eine Projektrechtfertigung vorzubringen. Der Unterhalt von Infrastruktur ist eine zyklische Aufgabe und die Erhaltungsplanung konzentriert sich auf die langfristige Planung. Dabei sind Details weniger wichtig. Entscheidend ist, dass die Infrastruktur hinsichtlich ihres Zustands und neuer Anforderungen nicht vernachlässigt wird und die langfristigen Kosten grob bekannt sind. Neben Brücken, Trassee-Teilstücke und Tunneln würde es sich anbieten, die ganze Methodik auch auf weitere Bauwerke und Bauanlagen auszuweiten, die im Ereignisfall ähnliche Leistungseinschränkungen auslösen und für welche Unterhaltsmassnahmen prognostiziert werden sollen. Dazu zählen Unterführungen und Überführungen sowie Stützmauern in gewissem Umfang.

9.3 Automatische Bündelung von Massnahmen

Die in Kapitel 7 vorgestellte Methodik zur automatischen Bündelung von Massnahmen verfolgt das übergeordnete Ziel, Erhaltungsplaner bei der Bildung von Erhaltungsprojekten für Anlagen unterschiedlicher Art zu unterstützen. Sie soll einen schnellen Überblick über mögliche Bündelungen von Massnahmen ermöglichen, wobei die institutionellen und informationssystemischen Rahmenbedingungen des ASTRA berücksichtigt werden. Obwohl die bisherigen Ergebnisse vielversprechend sind, bestehen noch verschiedene Aspekte, die vertieft untersucht und modelliert werden sollten. Also wie die Netzwerkabstraktion ist, wie der Nettonutzen berechnet wird, welche Rahmenbedingungen berücksichtigt werden und was die Datenqualität der Prognose von Unterhaltsmassnahmen ist.

Wichtige Punkte sind:

- Um die Rückkehrperiode- und Baustellenabstandsbedingung zu berücksichtigen, wurde das Problem in verschiedene Szenarien unterteilt. In einer Vorprozessierung wurden für jedes Szenario die auszuführenden Massnahmen ausgewählt. Dadurch wird das Problem vereinfacht, sodass der Lösungsraum in der Massnahmenebene trivial wird. Mit höherem Rechenaufwand könnte anstelle der Bildung von Szenarien auch eine Nebenbedingung eingeführt werden, die für jeden Erhaltungsprojektknoten alle anderen mit unzureichendem Abstand ausschliesst. In diesem Fall müsste keine Vorprozessierung der Massnahme gemacht werden.
- Das Problem wird auf Ebene einer Anlage betrachtet, kann aber mit viel mehr Rechenaufwand auch in seine Bauwerksteile zerlegt werden, wobei dann auch strukturelle Abhängigkeiten in vertikaler Richtung einen Einfluss hätten. In der vorgestellten Methodik wird immer davon ausgegangen, dass eine Unterhaltsmassnahme an der Anlage einen Baustellenbereich zur Folge hat. Es gibt jedoch diverse Massnahmen, wie den Ersatz von Brückenlagern, die unter Betrieb oder in einer Nachtschicht erledigt werden können. Aufgrund der benötigten Genauigkeit und des Rechenaufwands wird jedoch empfohlen, die zeitliche Gruppierung der Unterhaltsmassnahmen auf Bauwerks- bzw. Bauanlagenebene durchzuführen und nicht zu versuchen, diese in einen Bündelungsalgorithmus zu integrieren.
- Eine zeitliche Gruppierung von Unterhaltsmassnahmen an Bauwerksteilen auf Anlageebene wird als gegeben vorausgesetzt. Die Bestimmung dieser Gruppierung kann entweder auf Erfahrungswerten beruhen oder durch eine computergestützte Methode unterstützt werden. Das Ergebnis dieser Gruppierung hat jedoch einen erheblichen Einfluss auf das Resultat der anschliessenden Bündelung. Ein unüberlegter Input an dieser Stelle führt entsprechend auch nicht zu einem brauchbaren Output.
- Das Netzwerk wird in linearer, kontinuierlicher Form abstrahiert. Es gibt jedoch auch Bauwerke wie Überführungen oder Stützmauern, die sich über oder entlang der bereits definierten Anlagen befinden. Ein Stützmauer könnte als weiterer Teil eines Trasse-Teilstücks angesehen werden, es kann aber auch ein Netzwerkmodell definiert werden, in dem diese Anlage separat betrachtet wird. Auch ist die ganze Testrecke ein Achssegment – Knotenpunkte wurde gänzlich ausser Acht gelassen. Was die beste Abstraktion muss vom Betreiber entschieden werden wobei die verfügbaren Daten und die Art der Infrastruktur wichtig Einflussgrössen sind.

- Die Netzwerkabstraktion muss gewählt werden, ist jedoch selbst eine Einflussgrösse auf das Ergebnis der Optimierung. Die Achse wurde in diskrete Teilstücke von ca. 500 m unterteilt. Diese Wahl hat bereits einen Einfluss darauf, wie das Trassee betrachtet und Bündelungen vorgeschlagen werden. Erhaltungsplaner sind derzeit an frei wählbare Erhaltungsobjekte gewöhnt. Anhand vordefinierter Kriterien oder einer Entscheidung des Erhaltungsplaners könnte diese Auswahl auch automatisiert vorgeschlagen und so in den Bündelungsalgorithmus miteinbezogen werden. Auch der Abstand, in dem Trassee-Teilstücknachbaren berücksichtigt werden, beeinflusst die Lösung der Optimierung.
- Die Grösse von Erhaltungsabschnitten ist vordefiniert und nicht von den tatsächlich enthaltenen Anlagen abhängig. Die resultierende Bündelung wird dadurch zwar nur geringfügig beeinflusst, die nicht verursachten Nutzerkosten durch die funktionale Abhängigkeit werden jedoch überschätzt.
- Die Annahme, dass die Beeinflussungen der Baustellenabschnitte untereinander vernachlässigt werden, kann am besten vermieden werden, indem für jedes Szenario eine Verkehrssimulation mit angemessenem Rechenaufwand berechnet wird, um die Nutzerkosten zu ermitteln.
- Die Abhängigkeiten zwischen jeder Anlage könnten individuell definiert werden bzw. realitätsnäher. Beispielsweise wissen Erhaltungsplaner ungefähr, welche Arbeiten an zwei Brücken im gleichen Erhaltungsabschnitt gleichzeitig durchgeführt werden können und welche nicht. So kann die tatsächliche Ausführungsdauer auch von Algorithmus besser berücksichtigt werden. Dies entspricht aber einem hohen Aufwand, evtl. könnte BIM in der Zukunft für diesen Aspekt einen hohen Mehrwert haben.
- Die Möglichkeit von Nachtarbeiten, mobilen Brücken, mobilen Baustellen, anderen Verkehrsführungen als 4+0 etc. wurde gänzlich ausgeblendet. Insbesondere die Berücksichtigung von Modellen zur Baustellenverkehrssteuerung könnte zu realitätsnahen Verkehrssimulationen beitragen.
- Ein Einzelprojekt hat auch eine Sperrung des genutzten Erhaltungsabschnitts für die Rückkehrperiode zur Folge. Zudem werden alle Massnahmen ab einem Stichtag vorgezogen, ohne eine quantitative Analyse durchzuführen, ob es nicht besser ist, diese aufzuschieben. Eine Optimierung über mehrere Planungsperioden kann dies zu einem teilweise berücksichtigen.
- Der Nutzen wird durch die Reduzierung des Sofortmassnahmenrisikos berechnet. Es könnten jedoch auch andere Formen der Kosten-Nutzen-Rechnung verwendet werden. So werden beispielsweise zukünftige Kostenreduktionen nicht miteinbezogen. Die Berechnung beschränkt sich auf die Auswertung eines Jahres. Eine kombinierte Betrachtung der gesamten 5-Jahres-Periode ist denkbar.
- Die von der Optimierung gefundenen Werte, d.h. der Nettonutzen, der Nutzen und die Kosten, sind nur Informationen, die in der Differenz zum Referenzmassnahmenprogramm etwas aussagen, und beispielsweise nicht, wie hoch die Betreiberkosten für die Umsetzung des gefundenen Massnahmenprogramms sind. Aber auch diese Differenzwerte könnten aussagekräftiger sein, wenn das Referenzmassnahmenprogramm anders angenommen wird.
- Die Nutzerkosten wurden nur grob berechnet und auf die Betrachtung der Reiserzeitverlängerung reduziert. Inwiefern es sinnvoll ist, andere Anspruchsgruppen und Leistungsänderungen zu berücksichtigen, ist in einer realen Anwendung zu überprüfen. In jedem Fall ist die Berechnung der zusätzlichen Reisezeit detaillierter zu

machen. Der EMNS-Bericht zeigte in diesem Bereich schon einen Ansatz, welcher in der ASTRA Umgebung erfolgreich getestet werden konnte.
- In der Optimierung werden Werte für die Risikoschätzung verwendet, die auf einer anderen Berechnungsgrundlage beruhen, beispielsweise Brücken mit Fehlerbäumen und das Trassee mit viel simpleren Überlegungen. Es ist eine vereinheitlichte Abschätzung des Risikos anzustreben oder eine andere Metrik, welche die Leistung misst.
- Die Berücksichtigung von Erhaltungsabschnitten mit einer Länge von über 5 km hat sich als wenig praktikabel erwiesen. Längere Abschnitte werden durch die Methode bevorzugt, da mehr Abhängigkeiten existieren und somit die Betreiber- und Nutzerkosten stärker beeinflusst werden. Es wurden auch keine negativen Skaleneffekte eingeführt, die diesem Umstand entgegenwirken, obwohl sie in der Realität existieren. Die Ausführungsdauer einer Baustelle wird ebenfalls ausgeblendet, kann aber in einer Nebenbedingung erfasst werden. Aufgrund dieser Limitierungen wurden nur Abschnitte mit einer Länge von 5 km zugelassen.

Obwohl einige Aspekte noch einer vertieften Analyse bedürfen, ist die automatische Bündelung von Massnahmen umsetzbar und die vorgestellte Methodik bildet einen ausreichenden Ausgangspunkt. Das Problem genauer zu modellieren und dabei die in der Diskussion genannten Punkte zu berücksichtigen, ist speziell in Bezug auf die Modellierung des Verkehrs und seiner Abhängigkeiten mit viel Aufwand verbunden. Für eine reale Anwendung ist es jedoch unumgänglich, genauer zu werden. Bei Optimierungsproblemen mit einem grösseren Input kommt auch die Rechenzeit zum Tragen, die wiederum beeinflusst, wie die Realität abstrahiert werden muss. Auch das Bilden verschiedener Szenarien sollte künftig vermieden werden, da es die Methode zu starr macht. Damit wird verhindert, dass eine Nebenbedingung zur maximalen Bauzeit innerhalb eines Jahres eingeführt werden kann. Der menschliche Entscheidungsprozess soll nicht durch die Methode ersetzt werden, da die Komplexität gewisser externer Bedingungen für computergestützte Verfahren viel zu hoch ist und diese Bedingungen zudem nicht vorhersehbar sind. Vielmehr soll diese Komplexität in sinnvoller Detailtiefe abgebildet werden, um in angemessener Rechenzeit nützliche Erstinformationen für die Erhaltungsplanung zu liefern.

9.4 Allgemein

Die verschiedenen angewendeten Methoden sind geeignet, um entscheidungsrelevante Ergebnisse zu erhalten. Welches Verfahren im Einzelfall angewendet wird, ist jedoch eine strategische Entscheidung, die das ASTRA intern treffen muss, damit alle Beteiligten Vertrauen in die Anwendung dieser computergestützten Methoden haben. Es ist nicht das Ziel zu sagen, dass die Umsetzung genau den Prozessschritten und deren Berechnungsverfahren folgen muss, sondern diese sollen einen Anstoss geben, wie sich die digitalen Hilfsmittel (Fachapplikationen) oder allgemein die Erhaltungsplanung im ASTRA weiterentwickelt werden kann und dass es Anwendungsbereiche für computergestützte Methodiken zur Entscheidungsunterstützung gibt.

10 Umsetzung und Forschungsbedarf

10.1 Umsetzung der Erkenntnisse aus dem Projekt MINERVA im ASTRA

Die im Rahmen des Projekts MINERVA erarbeiteten Methoden, Modelle, Algorithmen und Erkenntnisse zeigen, welche digitalen Mittel der Erhaltungsplanung in Zukunft zur Verfügung stehen könnten. In diesem Abschnitt werden verschiedene Punkte erläutert, die dem ASTRA bei der Umsetzung helfen.

Integration von Zustandsabschätzungsmodellen in den Fachapplikationen
Die im ASTRA vorhandenen Fachapplikationen sind zum Teil bereits mit Möglichkeiten, Zustandsabschätzungen zu machen, ausgestattet. Die in diesem Forschungsprojekt vorgestellten Methoden und Modelle zur Abschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Zustands bauen grundsätzlich auf diesen vorhandenen Möglichkeiten auf und führen neben gewissen Erweiterungen und vor allem zu einer flächendeckenden Lösung für eine konsistente und gute Datengrundlage (insbesondere beim Trassee).

Integration des Sofortmassnahmenrisikos für die Prognose und Priorisierung von Massnahmen in den Fachapplikationen
Die in MINERVA erarbeitete Methodik zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen könnte, in die Fachapplikationen integriert, die Erhaltungsplaner aktiv unterstützen. Dies ist nicht nur für einen Überblick über die zukünftigen Unterhaltsmassnahmen wertvoll, sondern insbesondere auch für die Priorisierung von Unterhaltsmassnahmen bei beschränkten Ressourcen, beispielsweise bei der Anzahl durchführbarer vertiefter Untersuchungen. Dabei unterstützt das Sofortmassnahmenrisiko die Entscheidungsfindung. Für flächendeckende Prognosen zukünftiger Unterhaltsmassnahmen mit Abschätzung des Sofortmassnahmenrisikos sind konsistente Datengrundlagen zum Zustand unabdingbar.

Integration des Bündelungsalgorithmus in den Fachapplikationen
Die Integration des Bündelungsalgorithmus für die automatische Bündelung von Massnahmen in die Fachapplikationen (allenfalls EMNS) würde den Erhaltungsplanern ein wertvolles Hilfsmittel bei Vorschlägen zu Projektideen zur Verfügung stellen. Für die Integration eines solchen Algorithmus bedarf es flächendeckender und auf konsistente Art und Weise erstellte Prognosen von Unterhaltsmassnahmen.

Schulungen zur Verwendung der digitalen Hilfsmittel
Damit die Umsetzung der Integration und vor allem auch der Verwendung von neuen digitalen Hilfsmitteln in der Praxis tatsächlich Fuss fasst ist es essenziell, dass die vorgesehenen Anwender auch die notwendige Unterstützung erhalten. Dies bedeutet, dass mit der Umsetzung eine Strategie für die Schulung der zukünftigen Anwender erarbeitet wird. Dies kann bedeuten, dass besonders zu Beginn Schulungen oder

Workshops angeboten werden und später eventuell Ansprechpersonen definiert werden, welche sich gut mit den jeweiligen Hilfsmitteln und deren Funktionen auskennen.

Filialübergreifende Prozessvereinheitlichung
In diesem Projekt MINERVA sind Unterschiede des Erhaltungsplanungsprozesses zwischen den Filialen aufgefallen. Für eine erfolgreiche Digitalisierung des Prozesses insbesondere durch die Verwendung von digitalen Hilfsmitteln ist eine gewisse Vereinheitlichung der Prozesse wünschenswert. Dies würde sich aber hauptsächlich auf die Schnittstellen und Ergebnisse der digitalen Hilfsmittel beziehen, sodass die zentralen Entscheidungen und Dokumentationen des Erhaltungsplanungsprozesses in einheitlicher und übersichtlicher Form daherkommen. Diesbezüglich wäre eine Untersuchung empfehlenswert, welche schaut, welche Prozesse innerhalb der Filialen verbessert und lokal unterstützt werden könnten. Dabei sollte aber nicht das Ziel sein alles zu vereinheitlichen, sondern nur dort, wo Verbesserungen sinnvoll wären, diese in eine einheitliche Richtung anzupassen. Als Beispiel einer vorteilhaften Vereinheitlichung könnte man betrachten, wenn mehrere Filialen noch keinen Algorithmus zur automatisierten Bündelung von Massnahmen haben, dass man spezifisch dort plant eine einheitliche Lösung zu installieren.

10.2 Forschungsbedarf

Bei der Analyse des Erhaltungsplanungsprozesses wurden sechs primäre Bereiche mit Forschungsbedarf identifiziert. Diese betreffen:
- Identifizierung des Handlungsbedarfs
- Überwachung für präventive Massnahmen
- Planung von Massnahmen mit Unsicherheiten bezüglich des Handlungsbedarfs einzelner Objekte
- Planung von Massnahmen mit Unsicherheiten bezüglich des Handlungsbedarfs mehrerer Objekte
- Informationsbeschaffung mit unbemannten Luftfahrzeugen (Bsp. Drohnen)
- Nutzung von BIM

Im Folgenden werden diese Bereiche und deren Forschungsbedarf vorgestellt und wie der Prozess dadurch mögliche Verbesserungen bezüglich Effizienz und Effektivität erfahren könnte. Dafür wird auch nochmals auf die relevanten Prozessschritte eingegangen sowie aktuelle Forschung in diesem Bereich erklärt.

10.2.1 Identifizierung des Handlungsbedarfs
Bei der Identifizierung des Handlungsbedarfs geht es primär darum, die vielen Verschiedenen Gründe eine Massnahme an einem Objekt durchzuführen, zu berücksichtigen. Ein Hauptgrund mag ein ungenügender Zustand sein, jedoch sind gerade bei längerfristigen Planungen andere Gründe, wie nicht-konformität mit den neusten Normen oder Bündelungen von Massnahmen in der Nähe, nicht zu vernachlässigen. Die Beschreibung und Analyse des aktuellen Erhaltungsplanungsprozesses in Kapitel 2 brachte verschiedene Erkenntnisse bezüglich der Identifizierung des Handlungsbedarfs. Aus der periodischen Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung versucht der Erhaltungsplaner abzuschätzen, ob die erhaltenen Informationen sowie die

Massnahmenempfehlungen ausreichen, um den Handlungsbedarf zu identifizieren. Reichen diese Informationen nicht aus, oder es wird auf potenzielle sicherheitsrelevante Aspekte hingewiesen kann ein Erhaltungsplaner eine vertiefte Untersuchung anordnen, um ein tieferes Verständnis für die Situation zu erlangen. Im nächsten Prozessschritt, bei dem der Handlungsbedarf definiert wird, kann der Erhaltungsplaner für die Entscheidung einerseits auf die Informationen aus der Inspektion bzw. Zustandserfassung & -bewertung zurückgreifen und andererseits die bestehenden Strategien, Richtlinien, Standards und Normen konsultieren. Solche Richtlinien und Standards können aber oft nicht einen vollständigen Blick bezüglich der unterschiedlichen Gründe einer Massnahme bieten. Einhergehend kann es zu heterogenen Entscheidungen kommen, was durchgeführte Massnahmen für vergleichbare Objekte betrifft. Forschung in diesem Bereich ist oft auf Lebenszyklusmodelle oder auf zustandsbasierte Massnahmenstrategien fokussiert (Adey et al., 2014; Gschösser et al., 2014). Zukünftige Forschungen sollten die vielen verschiedenen Gründe für die Entscheidung, eine Massnahme durchzuführen, berücksichtigen. Hilfsmittel könnten entwickelt werden, welche mögliche Anpassungen beschlossener aber noch nicht angefangener Projekte prüft (in der Zeit zwischen der festgelegten Projektidee und dem Festlegen des Projekttyps). Die Erhaltungsplaner könnten durch ein solches Hilfsmittel auch unterstützt werden die verschiedenen Ungewissheiten zu berücksichtigen. Diese Unsicherheiten reichen von Anpassungen von Normen, die Konformität bedürfen, über Veränderungen bezüglich Umwelt- oder Nachfragebedürfnissen, als auch veränderter Wahrscheinlichkeiten von Katastrophenrisiken, bis zu veränderten übergeordneten Zielen der Organisation. Dies könnte die Effektivität erhöhen, indem die Erhaltungsplaner in der Identifizierung und Priorisierung von Massnahmen unterstützt werden. Dies würde auch helfen die Erwartungen von Erhaltungsplaner an vertiefte Untersuchungen besser zu formulieren bezüglich der zu beschaffenden Informationen. Solche Hilfsmittel würden dadurch den Aufwand für Erhaltungsplaner insbesondere für die Begründung von Massnahmen reduzieren, indem sie einen vollständigeren Überblick der zu berücksichtigenden Einflüssen haben, was sich auf effizientere Analysen, Diskussionen und Sitzungen auswirken könnte.

10.2.2 Überwachung für präventive Massnahmen

Ein weiterer Bereich ist, wie man die verschiedenen Tätigkeiten der Überwachung so unterstützen kann, dass die gewonnenen Informationen die Erhaltungsplaner bei den Entscheidungen für präventive Massnahmen bei deren Planung ca. 8-13 Jahre vor der Umsetzung besser unterstützen. Wie in Kapitel 2 beschrieben braucht ein Erhaltungsprojekt durchschnittlich 8 Jahre von der Definition bis zur Umsetzung. Unter Berücksichtigung dieses Vorlaufs sollten die notwendigen Informationen für die Entscheidungsfindung ungefähr 8-13 Jahre vorher zur Verfügung stehen. Die Forschung bezüglich der Überwachung von Objekten der Strasseninfrastruktur fokussiert oft auf neuartige Überwachungstechnologien, welche fähig sind Diagnosen zu übermitteln und auf möglicherweise notwendige Sofortmassnahmen hinzuweisen. Im Rahmen des Projekts «NTech» wurde im ASTRA bereits eine Dokumentation bezüglich der Technologien zur Überwachung der Infrastruktur erarbeitet (ASTRA, 2025c). Der Forschungsbedarf besteht also darin, Überwachungstechnologien so zu konzipieren, dass diese früh genug das Ausmass des Schadens und den erwarteten Zeitpunkt, bei dem eine Massnahme notwendig wird, abzuschätzen. Dies würde es den Erhaltungsplanern erlauben, Massnahmen zu antizipieren und in ganzheitlich Erhaltungsprojekte

zu integrieren, statt von Sofortmassnahmenhinweisen getrieben zu werden. Aufgabe zukünftiger Forschung wäre es dementsprechend herauszufinden, welche Informationen für frühzeitige Diagnosen und somit für die ausführenden Planer von präventiven Massnahmen hilfreich sind, um innerhalb der üblichen Planungsdauer agieren zu können (Matos et al., 2016; Radopoulou & Brilakis, 2016). Solche neuartige Überwachungstechnologien könnten die Effizienz bei der Erhebung sowie der Analysen von Informationen erhöhen. Gleichzeitig könnte es die Effektivität erhöhen, indem es ermöglicht, den zeitlich richtigen Augenblick für Massnahmen, auch im Kontext des gesamten Infrastruktursystems, auszuwählen.

10.2.3 Planung von Massnahmen mit Unsicherheiten bezüglich des Handlungsbedarfs einzelner Objekte

In diesem Bereich geht es darum, explizit die Unsicherheit bezüglich des Handlungsbedarfs einzelner Objekte zu berücksichtigen, um die Erhaltungsplaner in der aktuellen Entscheidung bezüglich der zu planenden Erhaltungsprojekte zu unterstützen. Der Erhaltungsplaner definiert für einzelne Objekte den zukünftigen Handlungsbedarf (max. 30 Jahre). Betrifft der Handlungsbedarf nicht die aktuelle Planungsperiode, für welche die Finanzierung diskutiert wird, ist auch noch keine Entscheidung zur Ausführung einer Massnahme getroffen worden. Das bedeutet, dass der Handlungsbedarf einer gewissen Unsicherheit in Bezug auf Umfang und Ausführungsdauer und -Zeitpunkt unterliegt. In der Zukunft werden zu angemessener Zeit mehr Informationen zur Verfügung stehen. Im Bewusstsein, dass eine prognostizierte Massnahme sowie deren Zeitpunkt viele Unsicherheiten mitbringt, würde es Sinn machen diese Unsicherheiten in Modellen explizit zu berücksichtigen, um den Erhaltungsplanern einen besseren Überblick zu bieten bei der Planung von aktuellen Projekten. Zum Beispiel könnte es dem Erhaltungsplaner helfen, wenn er die Unsicherheiten bezüglich einer Massnahme an einer Brücke in mehr als 20 Jahren kennt, dass er das Trassee frühzeitig in der zu planenden Periode erneuert. Diese Berücksichtigung der Unsicherheit bezüglich einer Massnahme erlaubt es auch, eine konsistentere und transparentere Argumentation für mögliche Verschiebungen aufzustellen. Die Unsicherheiten so zu berücksichtigen, würde auf aktueller Forschung aufbauen (Yang & Frangopol, 2020) und zu adaptiven Plänen führen, wie sie oft in der Entscheidungsfindung bei der Entwicklung eines Infrastrukturnetzes verwendet werden (Adey et al., 2022). Wird diese Berücksichtigung der Unsicherheit in Bezug auf die Zukunft verbessert und verschiedene Zukunftsszenarien mit verschiedenen Auslösern von Massnahamen in Betracht gezogen, könnte dies die Entscheidungsträger befähigen bessere Entscheidungen zu treffen und den Analysesaufwand bei veränderten Ausgangslagen reduzieren.

10.2.4 Planung von Massnahmen mit Unsicherheiten bezüglich des Handlungsbedarfs mehrerer Objekte

Ein weiterer Bereich mit Forschungsbedarf ist die Berücksichtigung der Unsicherheit des Handlungsbedarfs mehrerer Objekte mit der Möglichkeit diese zu gruppieren. Algorithmen könnten Erhaltungsplanern helfen bei der Entscheidung, welche Massnahmen zu gruppieren. Im Erhaltungsplanungsprozess (Kapitel 2) wird der Handlungsbedarf für jedes Objekt individuell definiert. Ist der Handlungsbedarf definiert können im nächsten Prozessschritt Vorschläge für Projektideen gemacht werden, in welchen Massnahmen verschiedener Objekte gruppiert werden können. Der Forschungsbedarf in diesem Bereich zielt darauf ab, den Erhaltungsplanern ein gutes Verständnis zu

vermitteln, welche räumlich nahegelegenen Objekte möglicherweise eine Massnahme um dieselbe Zeit erfordern. Dies könnte helfen den Zeitpunkt für die Massnahmen zu bestimmen und allenfalls beeinflussen wie und was für vertiefte Untersuchungen, mit welchen Spezialisten, noch durchgeführt werden. Dies würde auf Forschung aufbauen, welche mögliche Gruppierungen bereits weit in die Zukunft berücksichtigt (Kammouh et al., 2021). Wenn zum Beispiel ein Trassee-Teilstück eine Massnahme in 10 Jahren benötigt und eine nahegelegene Brücke in 15 Jahren, dann könnte man diese gruppieren und Abklärungen von einem Ingenieurbüro mit Expertise in beiden Feldern machen lassen. Ist es jedoch unklar, ob die Brücke in 15 Jahren eine Massnahme benötigt, dann könnte man für das Trassee-Teilstücke eine vertiefte Untersuchung von einem spezialisierten Ingenieurbüro durchführen lassen und die Brücke zu einem späteren Zeitpunkt separat betrachten. Verbindet man die Unsicherheit des Handlungsbedarfs mit der Möglichkeit Massnahmen in Modellen schnell und einfach zu gruppieren, könnte dies die Erhaltungsplaner unterstützen gute Massnahmenprojekte zusammenzustellen und dadurch die Effizienz im Prozess erhöhen. Dies würde besonders bei Strassen mit regelmässig ausgelasteter Kapazität die Leistungseinbussen reduzieren, was sich auf reduzierte interne sowie externe Kosten niederschlägt. Hilfsmittel, welche das berücksichtigen können, helfen auch schnell und einfach verschiedene Optionen zu erstellen und unterschiedliche Ansprüche und Bedingungen (Bsp. Budget) zu modellieren.

10.2.5 Informationsbeschaffung mit unbemannten Luftfahrzeugen (Bsp. Drohnen)

Forschungsbedarf gibt es auch im Bereich der Informationsbeschaffung mit unbemannten Luftfahrzeugen. Dies könnte dem Erhaltungsplanungsprozess bei klarem Verständnis von Kosten und Nutzen einen Mehrwert bieten. Die unbemannten Luftfahrzeuge sind lediglich Trägersysteme, welche verschiedene Instrumente zur Informationsbeschaffung tragen können. Zum Beispiel könnten dies Infrarotkameras sowie Kameras des sichtbaren Spektrums sein, oder LiDAR-Sensoren. Von der Inspektion bzw. der Zustandserfassung & -bewertung wird gemäss Prozess erwartet, dass eine Massnahmenempfehlung abgegeben wird. Aufgrund der gewonnenen Informationen sowie der Massnahmenempfehlung entscheidet der Erhaltungsplaner anschliessend, ob eine vertiefte Untersuchung notwendig ist und was von dieser zu erwarten wäre. Eine klare Hilfestellung bei dieser Entscheidung wäre hilfreich, um einen Überblick darüber zu erhalten, für welche Informationen sich die zusätzlichen Kosten durch die Verwendung eines unbemannten Luftfahrzeugs lohnen. Während bei der Forschung in diesem Bereich grundsätzlich viel geht (Congress et al., 2024; Hackl et al., 2018; Isailović et al., 2020), wurde auch schon eine Kosten-Nutzen-Analyse zu der Verwendung von unbemannten Luftfahrzeugen durchgeführt (Kielhauser et al., 2017). Eine, bezüglich der Kosten und des Nutzens, informierte Verwendung von unbemannten Luftfahrzeugen kann helfen die richtigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt und in der richtigen Art und Weise zu beschaffen. Der Wert von solchen Informationen ist immer auch vom Bauwerk abhängig und kann sich fest unterscheiden. Dies würde die Effizienz des Erhaltungsplanungsprozesses erhöhen, indem sichergestellt wird, dass die Informationen kostenoptimiert beschafft werden.

10.2.6 Nutzung von Informationsmodellen (BIM, GIS)

Ein Bereich mit viel Potenzial ist die Integrierung von Informationsmodellen wie BIM oder GIS im Erhaltungsplanungsprozess. Diese können an mehreren Prozessschritten die Arbeit unterstützen durch die Visualisierung von Informationen. Es gibt viel Forschung in diesem Gebiet und das Potential sowie die Herausforderungen werden von verschiedenen Seiten beleuchtet (Hagedorn et al., 2023; Hajdin, 2025; Panah & Kioumarsi, 2021). Für die Erhaltungsplanung der Strasseninfrastruktur sind Daten und Informationen unablässig, weshalb die Managementsysteme auch eine reiche Semantik haben, jedoch kaum Informationen zur Geometrie. Dies erschwert die Weiterverwendung von BIM-Modellen welche aus der Konstruktion der Objekte kommen, da diese Modelle oft geometrisch sehr detailliert sind, jedoch nur ein Bruchteil der für die Erhaltung erforderlichen Informationen darstellen können. Kurz gesagt bringt eine vernünftige geometrische Information auf der Ebene der Bauwerksteile einen Mehrwert für die Erhaltung, jedoch muss nicht jede Schraube erkenntlich sein. Die geometrischen Informationen geben dem Erhaltungsplaner eine Intuition des Volumens oder der Oberfläche im Raum. Ein solches BIM erlaubt es auch das vorhandene Material zu kennen und ökologische Bewertungen zu machen (Bsp. GreenInfraTwins, 2025). Ebenfalls gibt es bereits Vorstösse Konstruktionspläne anhand von künstlicher Intelligenz relativ einfach in ein BIM-Modell zu erstellen (Abbildung 120), welcher detailliert genug ist für die Erhaltungsplanung (Hajdin, 2025).

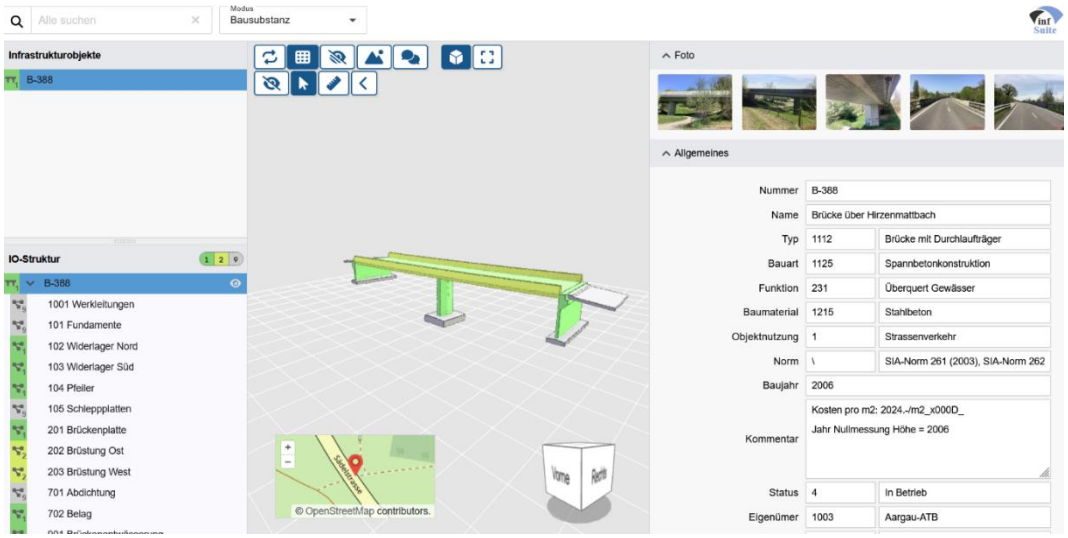


Abbildung 120: Beispiel eines mit KI erstellten BIM-Models basiert auf Konstruktionsplänen (https://imc-ch.ch/InfBim/home).

BIM kann den Erhaltungsplanungsprozess an mehreren Prozessschritten positiv beeinflussen. In der Folge werden verschieden Prozessschritte vorgestellt und wie sich diese durch die Integration von BIM verändern können. Die Inspektion bei Kunstbauten wird momentan mit Hilfe eines Tablets durchgeführt, auf dem eine Liste der Bauwerksteile sowie ein Bauwerksplan vorhanden ist. Mit BIM können die Bauwerksteile und deren Informationen visuell dargestellt werden. Im Gegensatz zu heute, wo Fotos und Text den Erhaltungsplaner über die Situation informieren, würde es dem Inspektor erlauben, mögliche Schäden gleich im BIM zu erfassen (Isailović et al., 2020).



Abbildung 121: Darstellung von Schäden in BIM am Beispiel von (Isailović et al., 2020).

Diese Verwendung von BIM würde insbesondere dem nachfolgenden Prozessschritt zugutekommen, bei dem der Erhaltungsplaner die Inspektionsergebnisse evaluieren muss. Gemäss dem aktuellen Erhaltungsplanungsprozess wird der Inspektionsbericht sowie die Massnahmenempfehlung evaluiert, ob die Informationen ausreichen für die Definition des Handlungsbedarfs, oder ob eine vertiefte Untersuchung notwendig wird. Mit BIM können die neuen Informationen einerseits visuell vermittelt werden und andererseits mit Prognosen verglichen werden.

Um den Handlungsbedarf zu definieren, werden die schriftlich in KUBA hinterlegten Informationen sowie die Inspektions bzw. Zustandserfassungs & -bewertungsberichte und die Massnahmenempfehlung berücksichtigt. Mit BIM können alle notwendigen Informationen (z.B. Zustand, Risiko, erwartete Massnahmen, Kosten, etc.) intuitiv am Modell dargestellt werden (Bsp in Abbildung 122).

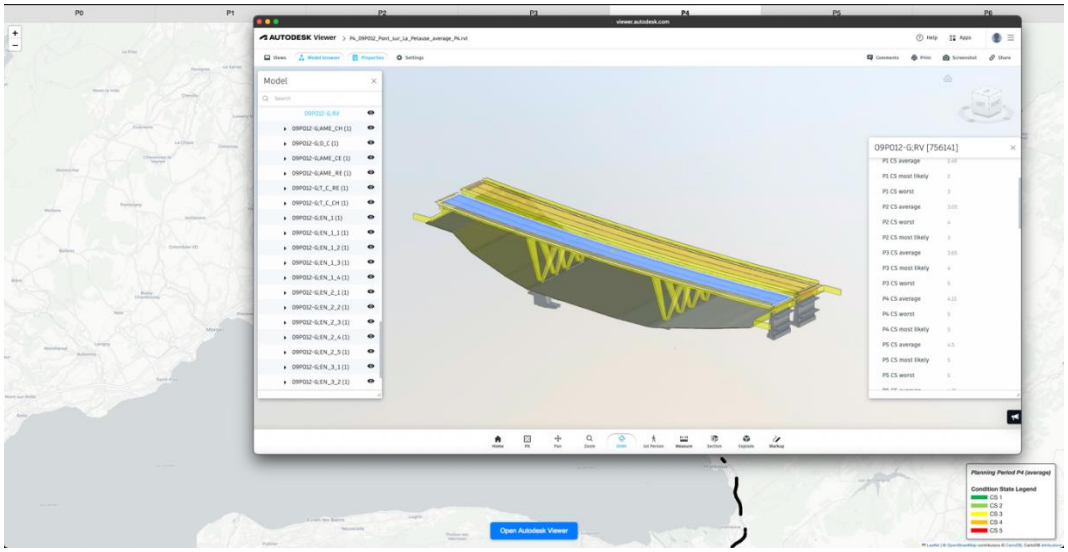


Abbildung 122: Darstellung eines BIM-Modells mit den Zuständen.

Beim Prozessschritt Projekt definieren legt der Erhaltungsplaner alle Details fest, welche bei der Umsetzung des Projekts berücksichtigt werden sollen. Mit BIM kann es für den Erhaltungsplaner hilfreich sein auch in diesem Projektschritt die spezifischen Informationen noch einmal visuell dargestellt zu betrachten.

Auch für die Teststrecke konnten im Rahmen dieses Projekts MINERVA BIM-Modelle erstellt werden (Abbildung 108). Ein Teil diese BIM-Modelle konnte bereits in KUBA integriert werden und stellen somit einen ersten Output aus dem Projekt MINERVA dar.

11 Schlussfolgerungen

Die Forschungsarbeit hat gezeigt, dass die heutige Erhaltungsplanung zwar auf bewährten Prozessen basiert, diese jedoch oft uneinheitlich umgesetzt werden und dadurch an Konsistenz und Nachvollziehbarkeit verlieren. Eine Vereinheitlichung der Abläufe und die Unterstützung durch digitale Hilfsmittel – insbesondere Abschätzungsmodelle – können wesentlich dazu beitragen, fundiertere und langfristig tragfähige Entscheidungen effizienter und effektiver zu ermitteln. Über die methodischen Entwicklungen hinaus hat die Arbeit auch gezeigt, dass die Wirksamkeit von eingesetzten digitalen Lösungen wesentlich von den zugrundeliegenden Planungsprozessen abhängt. Heute wird die Erhaltungsplanung zwar nach etablierten Abläufen durchgeführt, doch fehlt es oft an Einheitlichkeit und Konsistenz in der Umsetzung. Inspektionsberichte bzw. externe Zustandserfassungen & -bewertungen haben dabei teilweise schon fast projektauslösenden Charakter, wodurch die langfristige strategische Planung in den Hintergrund tritt. Digitale Hilfsmittel und transparente Abschätzungsmodelle können hier helfen, die Abläufe zu vereinheitlichen und nachvollziehbarer zu machen. Auch Algorithmen zur automatischen Bündelung von Massnahmen können einen wesentlichen Beitrag leisten, mit geringerem Aufwand verschiedene Projektideen zu generieren und Vergleichen unter ständigem Einbezug der zu berücksichtigenden Randbedingungen. Dadurch wird nicht nur die Qualität der Entscheidungen verbessert, sondern auch ermöglicht, Risiken und Ressourcenengpässe systematisch und frühzeitig zu berücksichtigen. Die im Projekt entwickelten digitalen Ansätze haben genau dies zum Ziel.

Zunächst wurden Methoden entwickelt, um sowohl bei Brücken als auch beim Trassee den gegenwärtigen und zukünftigen Zustand besser abzuschätzen. Für Brücken konnte gezeigt werden, dass sich mit Hilfe von Einflussgrössen in einem Bayes'schen Netz gewichtet durch Experten Zustände für Bauwerksteile auch dann ableiten lassen, wenn keine Zustandsdaten vorhanden sind. Solch gegenwärtige Abschätzungen sind erforderlich, um die im KUBA-MS hinterlegten Verfallsmatrizen für die Prognose des zukünftigen Zustands anwenden zu können.

Für das Trassee wurde mit dem ANN-Kriging-Modell eine Methode vorgestellt, die bestehende Lücken in den Zustandsdaten schliesst. Dadurch lassen sich aktuelle Zustände zuverlässiger abbilden und konsistente Eingaben für Abschätzungs- und Entscheidungsalgorithmen erzeugen. Im Vergleich zur linearen Interpolation erwies sich das Verfahren in den meisten Fällen als präziser und somit besser geeignet, um eine vollständige und belastbare Datengrundlage für die Planung bereitzustellen. Zur Prognose des zukünftigen Zustands wurde zudem ein Extended Kalman Filter eingesetzt. Dessen Anwendung war jedoch nur bedingt erfolgreich, da die vorhandenen Messdaten eine zu hohe Streuung zwischen den einzelnen Kampagnen aufweisen. Dadurch konnten keine ausreichend belastbaren Prognosen in die Zukunft erzielt werden.

Darauf aufbauend wurden die Resultate aus den Zustandsabschätzungen für die Prognose von Unterhaltsmassnahmen und Sofortmassnahmenrisiken auf Brücken und dem Trassee genutzt. Damit konnten die Algorithmen basierten Entscheidungshilfen

erweitert und gezeigt werden, wie Risikoabschätzungen gezielte Priorisierung von Massnahmen bei Ressourcenknappheit unterstützen. Besonders die Ermittlung des Sofortmassnahmenrisikos bietet den Entscheidungsträgern einen Mehrwert, da sie erlaubt, kritische Infrastruktur frühzeitig zu identifizieren und vertiefte Untersuchungen begründet einzuleiten. Für das Trassee ist die Anwendung dieser Risikoanalyse jedoch weniger aussagekräftig, da die Risiken für Trassee-Teilstücke berechnet wurden, deren Wahrscheinlichkeiten nicht unabhängig voneinander sind und die nicht anhand von Gefährdungsabschnitten definiert wurden.

Der vorgestellte Algorithmus zur Prognose von Unterhaltsmassnahmen hat zum Ziel als Entscheidungshilfe zu dienen, d.h. die Erhaltungsplaner bei der Ermittlung des Handlungsbedarfs zu unterstützen, den Entscheidungsträgern auf Filialebene eine mittelfristige Investitionsplanung zur Verfügung zu stellen und Warnsignale zu geben, wenn die Ressourcen nicht ausreichen, um alle erforderlichen Unterhaltsmassnahmen durchzuführen.

Es ist festzuhalten, dass mit der bestehenden Funktionsweise von KUBA-MS eine durchdachte und gut abgestimmte Abstraktionsebene für die in der Erhaltungsplanung geforderte Ergebnisgenauigkeit geschaffen wurde. Die grosse Ergänzung dieser Arbeit betrifft die Risikoanalyse von Sofortmassnahmen. Risiko ist oft etwas, das in der Erhaltungsplanung vernachlässigt wird, obwohl es in der Realität allzu oft vorübergehenden Schliessungen gibt und Sofortmassnahmen ausgeführt werden müssen.
Es gibt immer ein gewisses Risiko, das akzeptiert werden muss, z.B. Naturgefahren, Unfälle etc. In dieser Arbeit wird das Risiko als eingehalten angesehen, solange die Massnahmenstrategie eingehalten wird - denn, wenn dies nicht der Fall wäre, müsste die Massnahmenstrategie geändert werden. Trotzdem ist es wichtig das Risiko zu berücksichtigen damit bei der Planung von Unterhaltsmassnahmen begründet eine Priorisierung vorgenommen werden kann.

Dazu folgende Gedanken: (1) Es kann vorkommen, dass eine Brücke oder Verbindung als «wichtig» eingestuft wird und daher vorsorglich in die Erhaltung investiert wird, ohne dass jemals ein kritischer Zustand erreicht wird. (2) Es kann vorkommen, dass kleinere Bauwerke so lange vernachlässigt werden, bis sie einen alarmierenden Zustand erreichen, weil die potenziellen Gefahren und Konsequenzen nie analysiert wurden. (3) Die Anzahl der vertieften Untersuchungen, die in Auftrag gegeben werden können, ist begrenzt. Hier hilft das Risiko bei der Priorisierung, welche schneller ausgeführt werden müssen.

Bei einer vollständigen Implementierung der vorgestellten Methodik wird empfohlen: (1) in enger Zusammenarbeit mit den Erhaltungsplanern deren Bedürfnisse abzuklären, was in dieser nicht abgedeckt wird, (2) Die Fehlerbäume mit Experten zu entwikkeln, (3) die Prognose von Unterhaltsmassnahmen auf den neusten Stand der Technik zu bringen und (4) BIM für Infrastrukturmanagement als Informationsdarstellung zu Nutzen.

Die automatisierte Bündelung von Unterhaltsmassnahmen basiert auf einer robusten Abschätzung der Zustände sowie auf der Prognose der Unterhaltsmassnahmen. Da in der vorgestellten Methode der Nutzen quantifiziert werden muss, ist die Wahl einer geeigneten Metrik entscheidend. Mit der Abschätzung des Sofortmassnahmenrisikos konnte eine solche Metrik gefunden werden, die zugleich eine wertvolle Grundlage für die Priorisierung von Unterhaltsmassnahmen darstellt. Zudem wurde aufgezeigt, wie das Infrastrukturnetz abstrahiert werden kann, um daraus einen Netzwerkflussgraphen abzuleiten, der als gemischtganzzahliges lineares Optimierungsproblem lösbar ist. Obwohl die Methode erfolgreich demonstriert werden konnte, hängt das Ergebnis wesentlich von den Modellierungsentscheidungen ab, insbesondere davon, wie das Netzwerk abstrahiert wird, wie der Nettonutzen berechnet wird, welche Nebenbedingungen berücksichtigt werden und welche Qualität die Eingangsdaten der Massnahmenprognose besitzen. In einer praktischen Anwendung ist daher sicherzustellen, dass die gewählten Modellierungsparameter den institutionellen Vorgaben entsprechen oder den Erhaltungsplanern die nötige Flexibilität belassen wird, um zentrale Parameter selbst zu variieren. Ein einfaches Beispiel hierfür ist die Rückkehrperiode, die als Nebenbedingung eingeführt wurde. Bereits die Entscheidung, ob eine Massnahme vorgezogen oder auf das nächste Ausführungsfenster verschoben werden soll, erfordert eine komplexe Berechnung. Die in dieser Arbeit gewählte Annahme, dass alle Massnahmen bis zu einem bestimmten Jahr vorgezogen werden, stellt dabei nur eine mögliche, vereinfachte Variante dar und bildet die Überlegungen von Erhaltungsplanern nicht in voller Tiefe ab. Dies könnte den Eindruck erwecken, dass eine möglichst realitätsgetreue Modellierung anzustreben sei. Dies ist jedoch nicht zielführend. Solange klar ist, dass die Ergebnisse der automatisierten Bündelung lediglich als Ausgangspunkt für weiterführende planerische Überlegungen dienen, kann die Modellierungstiefe gezielt auf ein sinnvolles und praktikables Niveau begrenzt werden.

Insgesamt verdeutlichen die Arbeiten, dass eine systematischere Erhaltungsplanung für das ASTRA möglich ist. Sie erfordert jedoch (1) die weitere Validierung der Methoden an realen Fallstudien, (2) die Einbettung in bestehende Systeme wie TRA und KUBA sowie (3) eine enge Abstimmung mit den Bedürfnissen der Praxis. Werden diese Schritte umgesetzt, können die entwickelten methodische Ansätze einen wichtigen Beitrag leisten, um die vorhandenen Ressourcen effizienter und effektiver einzusetzen und gleichzeitig die Sicherheit und Verfügbarkeit der Nationalstrasseninfrastruktur nachhaltig zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

Abdelmohsen, A. Z., & El-Rayes, K. (2018). Optimizing the Planning of Highway Work Zones to Maximize Safety and Mobility [Optimierung der Planung von Baustellenabschnitten auf Autobahnen zur Maximierung von Sicherheit und Mobilität]. *Journal of Management in Engineering*, *34*(1), 04017048. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000570

Adey, B. T. (2019). A road infrastructure asset management process: Gains in efficiency and effectiveness [Ein Prozess zum Management von Strasseninfrastrukturanlagen: Effizienz- und Effektivitätssteigerungen]. *Infrastructure Asset Management*, *6*(1), 2–14. https://doi.org/10.1680/jinam.17.00018

Adey, B. T., Burkhalter, M., & Martani, C. (2020). Defining road service to facilitate road infrastructure asset management [Definition von Strassendienstleistungen zur Erleichterung des Managements von Strasseninfrastrukturanlagen]. *Infrastructure Asset Management*, *7*(4), 240–255. https://doi.org/10.1680/jinam.18.00045

Adey, B. T., Lethanh, N., Hartmann, A., & Viti, F. (2014). Evaluation of intervention strategies for a road link in the Netherlands. *Built Environment Project and Asset Management*, *4*(2), 180–198. https://doi.org/10.1108/BEPAM-06-2013-0020

Adey, B. T., Martani, C., & Hackl, J. (2022). Investing in water supply resilience considering uncertainty and management flexibility. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, *175*(3), 104–115. https://doi.org/10.1680/jsmic.21.00005

Alonso-Solorzano, Á., Pérez-Acebo, H., Findley, D. J., & Gonzalo-Orden, H. (2023). Transition probability matrices for pavement deterioration modelling with variable duty cycle times [Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen für die Modellierung von Fahrbahnverschleiss mit variablen Betriebszykluszeiten]. *International Journal of Pavement Engineering*, *24*(2), 2278694. https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2278694

Andrews, J., & Lunt, S. (2012). *An Introduction to Fault Tree Analysis* [Eine Einführung in die Fehlerbaumanalyse]. University of Nottingham.

ASTRA. (2002). *Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen: Planung und Durchführung des Unterhalts.* (Richtlinie 308 103.d). Bundesamt für Strassen.

ASTRA. (2012). *KUBA 5.0 Fachapplikation Kunstbauten: Datenerfassungshandbuch* (IT-Dokumentation 62014; Version 1.00). Bundesamt für Strassen.

ASTRA. (2016). *Erhaltungsplanung: Arbeitsprozesse und Produkte* (Fachhandbuch 2B010; Version 1.01). Bundesamt für Strassen.

ASTRA. (2017a). *Integrales Risiko- und Chancenmanagement des ASTRA* (Weisungen 79002; Version 2.10). Bundesamt für Strassen.

ASTRA. (2017b). *Nationalstrassennetz als räumliches Basisbezugssystem RBBS* (Richtlinie 10001; Version 1.20). Bundesamt für Strassen.

ASTRA. (2021a). *KUBA 5.0 Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel: Anwendungshandbuch, Teil 2 KUBA-MS - Erhaltungsplanung* (IT-Dokumentation 62011; Version 3.00). Bundesamt für Strassen.

ASTRA. (2021b). *KUBA 5.1: Leitfaden für Inspektoren von Kunstbauten* (IT-Dokumentation 62016; Version 1.20). Bundesamt für Strassen.

ASTRA. (2023a). *KUBA 5.0 Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel: Anwendungshandbuch, Teil 1 KUBA DB - Substanzdaten* (IT-Dokumentation 62011; Version 4.20). Bundesamt für Strassen.

ASTRA. (2023b). *Schweizerische automatische Strassenverkehrszählung (SASVZ)* (Version vom 31.05.2024) [Datensatz].

https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/daten-informationsprodukte/verkehrsdaten/daten-publikationen/automatische-strassenverkehrszaehlung/monats-jahresergebnisse.html
ASTRA. (2024a). *KUBA: Informationen zu den Brücken auf der N9 [Datenbank]*. Bundesamt für Strassen (ASTRA).
ASTRA. (2024b). *MISTRA TRASSEE - TRA: Datenerfassungshandbuch* (IT-Dokumentation 61014; Version 2.4.0). Bundesamt für Strassen.
ASTRA. (2024c). *MISTRA Trassee—TRA: Anwendungshandbuch PMS* (IT-Dokumentation 61 011, Teil 1B; Version 2.5.0). Bundesamt für Strassen.
ASTRA. (2024d). *MISTRA Trassee—TRA: Organisationshandbuch* (IT-Dokumentation 61017; Version 2.5.0). Bundesamt für Strassen.
ASTRA. (2024e). *Technologien zur Überwachung der Infrastruktur: Teilbericht Trassee* (Dokumentation 84013; Version 1.00). Bundesamt für Strassen.
ASTRA. (2024f). *Überwachung der Fahrbahn: Zustandserhebung und -bewertung* (Richtlinie 11021; Version 1.00). Bundesamt für Strassen.
ASTRA. (2025a). *Gestion intégrale des risques et des opportunités à l'OFROU* (Weisungen 79002; Version 2.20) [Integrales Risiko- und Chancenmanagement des ASTRA]. Bundesamt für Strassen.
ASTRA. (2025b). *Technologien zur Überwachung der Infrastruktur: Synthesebericht* (Dokumentation 84010; Version 1.00). Bundesamt für Strassen.
ASTRA. (2025c). *Technologien zur Überwachung der Infrastruktur—Synthesebericht* (Dokumentation 84010; Version 1.00). Bundesamt für Strassen. https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/fachleute/dokumente-nationalstrassen/standards/dokumentationen.html
ASTRA. (o. J. [a]). *Karte der Filialen des ASTRA* [Abbildung, abgerufen am 11.10.2023]. https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/das-astra/kontakt/filialen.html
ASTRA. (o. J. [b]). *Unterhaltsplanung Nationalstrassen*. https://www.astra.admin.ch/astra/de/home.html
ASTRA, F. 4. (2021c). *Detailprozess ASTRA EP F4 (3)*. Bundesamt für Strassen ASTRA.
ASTRA, F. 4. (2021d). *Gesamtprozess ASTRA EP F4 (2)*. Bundesamt für Strassen ASTRA.
ASTRA, F. 4. (2021e). *Prozess kleiner baulicher Unterhalt (KBU) ASTRA EP F4 (3.4)*. Bundesamt für Strassen ASTRA.
ASTRA, F. 4. (2021f). *Prozess Stellungnahmen ASTRA EP F4 (4.2)*. Bundesamt für Strassen ASTRA.
ASTRA, F. 4. (2021g). *Prozess vorsätzliche Sachbeschädigungen ASTRA EP F4 (3.5)*. Bundesamt für Strassen ASTRA.
ASTRA, F. 4. (2021h). *Realisierungs- und Bauabnahmeprozess ASTRA EP F4 (4.4)*. Bundesamt für Strassen ASTRA.
ASTRA, F. 4. (2021i). *Übergeordneter Prozess ASTRA EP F4 (1)*. Bundesamt für Strassen ASTRA.
ASTRA, F. 4. (2021j). *Übersicht Grundlagen EP F4*. Bundesamt für Strassen ASTRA.
ASTRA, F. 4. (2021k). *Übersicht Prozesse ASTRA EP F4*. Bundesamt für Strassen ASTRA.
BIMForum. (2024, Dezember 31). *Level of Development (LOD) Specification*. https://bimforum.org/resource/lod-level-of-development-lod-specification/
Bundesgesetz über die Nationalstrassen (NSG) (1960). https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1960/525_569_555/de
Burkhalter, M., & Adey, B. T. (2018). A Network Flow Model Approach to Determining Optimal Intervention Programs for Railway Infrastructure Networks [Ein Netzflussmodell-Ansatz zur Bestimmung optimaler Massnahmenprogramme für

Eisenbahninfrastrukturnetze]. *Infrastructures*, *3*(3). https://doi.org/10.3390/infrastructures3030031

Burkhalter, M., & Adey, B. T. (2021). Quantifying net benefits of intervention programmes to enable their digitalised generation [Quantifizierung des Nettonutzens von Massnahmenprogrammen, um ihre digitalisierte Erstellung zu ermöglichen]. *Infrastructure Asset Management*, *8*(3), 141–154. https://doi.org/10.1680/jinam.20.00020

Chen, C.-H. (Peter), Schonfeld, P., & Paracha, J. (2005). Work Zone Optimization for Two-Lane Highway Resurfacing Projects with an Alternate Route [Optimierung von Baustellenabschnitten bei zweispurigen Strassenbelagssunterhaltsprojekten mit alternativer Route]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1911*(1), 51–66. https://doi.org/10.1177/0361198105191100106

Chien, S., & Schonfeld, P. (2001). Optimal Work Zone Lengths for Four-Lane Highways [Optimale Länge von Baustellenabschnitten für vierspurige Autobahnen]. *Journal of Transportation Engineering*, *127*(2), 124–131. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:2(124)

Congress, S. S. C., Puppala, A. J., Escamilla, J., Jaladurgam, R., & Kumar, P. (2024). Transportation bridge infrastructure asset condition monitoring using uncrewed aerial vehicles (UAVs). *Transportation Geotechnics*, *47*, 101268. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101268

Division, U. B. of P. R. O. of P. U. P. (1964). *Traffic assignment manual for application with a large, high speed computer* [Handbuch zur Verkehrszuweisung für die Anwendung mit einem großen, schnellen Computer]. US Department of Commerce.

Erath, A. L. (2011a). *Vulnerability Assessment of Road Transport Infrastructure* [ETH Zurich; Bewertung der Vulnerabilität der Strassenverkehrsinfrastruktur]. http://hdl.handle.net/20.500.11850/153072

Erath, A. L. (2011b). *Vulnerability assessment of road transport infrastructure* [ETH Zurich; Bewertung der Vulnerabilität der Strassenverkehrsinfrastruktur]. http://hdl.handle.net/20.500.11850/153072

Gnehm, V. (2008). *Standardisierte Erhaltungsmassnahmen* (Forschungsauftrag Nr. FB1235; Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen). Bundesamt für Strassen. https://www.mobilityplatform.ch/de/research-datashop/product/1235

Gore, N., Arkatkar, S., Joshi, G., & Antoniou, C. (2023). Modified Bureau of Public Roads Link Function [Geänderte Link-Funktion des Amtes für öffentliche Straßen (BPR)]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2677*(5), 966–990. https://doi.org/10.1177/03611981221138511

GreenInfraTwins. (2025). *GreenInfraTwins | Nachhaltigkeitsanalysen mit Digitalem Zwilling im Ingenieurbau*. https://greeninfratwins.blogs.ruhr-uni-bochum.de/

Gschösser, F., Wallbaum, H., & Adey, B. T. (2014). Environmental analysis of new construction and maintenance processes of road pavements in Switzerland. *Structure and Infrastructure Engineering*, *10*(1), 1–24. https://doi.org/10.1080/15732479.2012.688977

Hackl, J., Adey, B. T., Woźniak, M., & Schümperlin, O. (2018). Use of Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry to Obtain Topographical Information to Improve Bridge Risk Assessment. *Journal of Infrastructure Systems*, *24*(1), 04017041. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000393

Hagedorn, P., Liu, L., König, M., Hajdin, R., Blumenfeld, T., Stöckner, M., Billmaier, M., Grossauer, K., & Gavin, K. (2023). BIM-Enabled Infrastructure Asset Management Using Information Containers and Semantic Web. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *37*(1), 04022041. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001051

Hajdin, R. (2025, Juni 30). Bridge Management Systems – The next generation. *Proc. of the 5th CACRCS Workshop Capacity Assessment of Corroded Reinforced Concrete Structure*. ficCACRCS 2025.

Hajdin, R., & Diederich, H. (2024). *Prioritization of structures for reassessment considering the value of information* [Priorisierung von Strukturen für die Neubewertung unter Berücksichtigung des Informationswerts]. 1153–1160. https://doi.org/10.2749/sanjose.2024.1153

Hajdin, R., Fastrich, A., & Schiffmann, F. (2013). *Erhaltungsmanagement Nationalstrassen (EMNS)* (Fachkonzept R 2012 10 31) [Interner Bericht]. Bundesamt für Strassen (ASTRA).

Hajdin, R., Fastrich, A., Schiffmann, F., van Linn, A., Mellert, L., & Grunicke, U. H. (2025). *Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln: Einzelprojekt EP4—Entwicklung eines Entscheidungsmodells* (AST_2020_104) [[Nicht öffentlicher Bericht]]. Bundesamt für Strassen ASTRA.

Hajdin, R., & Lindenmann, H.-P. (2007). Algorithm for the Planning of Optimum Highway Work Zones [Ein Algorithmus für die optimale Planung von Baustellenabschnitte]. *Journal of Infrastructure Systems*, *13*(3), 202–214. https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(2007)13:3(202)

Isailović, D., Stojanovic, V., Trapp, M., Richter, R., Hajdin, R., & Döllner, J. (2020). Bridge damage: Detection, IFC-based semantic enrichment and visualization. *Automation in Construction*, *112*, 103088. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103088

ISO. (2019). *Akustik: Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgeräusche, Teil 2: Nahfeldmessverfahren* (SN EN ISO 11819-2).

Kammouh, O., Nogal, M., Binnekamp, R., & Wolfert, A. R. M. R. (2021). Multi-system intervention optimization for interdependent infrastructure. *Automation in Construction*, *127*, 103698. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103698

Kielhauser, C., Romer, F. B., & Adey, B. T. (2017). Preliminary estimates of the viability of UAV-based bridge [Application/pdf]. *Proceedings of SMAR 2017 Conference*, 8 p. https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000229541

Lethanh, N., Adey, B. T., & Burkhalter, M. (2018). Determining an Optimal Set of Work Zones on Large Infrastructure Networks in a GIS Framework [Festlegung optimaler Baustellenabschnitte in grossen Infrastrukturnetzen in einem GIS-Framework]. *Journal of Infrastructure Systems*, *24*(1), 04017048. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000410

Marsili, F., Diederich, H., Ralbovsky, M., Hajdin, R., Vorwagner, A., & Kessler, S. (2024). *Abschätzung der Restnutzungsdauer von Brückenbauwerken durch Entwicklung und Erprobung hybrider Modelle: ENDURE*. D-A-CH Kooperation.

Matos, J., Casas, J., Strauss, A., & Fernandes, S. (2016, November). *COST ACTION TU1406: Quality Specifications for Roadway Bridges, Standardization at a European level (BridgeSpec) – performance indicators*. Fib Symposium 2016. https://www.researchgate.net/publication/312116995_COST_ACTION_TU1406_Quality_Specifications_for_Roadway_Bridges_Standardization_at_a_European_level_BridgeSpec_-_performance_indicators

Mirzaei, Z., & Adey, B. T. (2015). Investigation of the use of three existing methodologies to determine optimal life-cycle activity profiles for bridges [Untersuchung der Anwendung von drei bestehenden Methoden zur Ermittlung optimaler Lebenszyklus-Aktivitätsprofile für Brücken]. *Structure and Infrastructure Engineering*, *11*(11), 1484–1509. https://doi.org/10.1080/15732479.2014.976577

Mirzaei, Z., & Adey, B. T. (2018). Determination of the most sustainable bridge work programs through the improved structure level considerations [Ermittlung der nachhaltigsten Brückenbauprogramme durch verbesserte Überlegungen auf Strukturebene]. *Structure and Infrastructure Engineering*, *14*(8), 1123–1139. https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1401096

OMG. (2014). *Business Process Model and Notation (BPMN) 2.0* (Version 2.0.2). https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0.2

Panah, R. S., & Kioumarsi, M. (2021). Application of Building Information Modelling (BIM) in the Health Monitoring and Maintenance Process: A Systematic Review. *Sensors*, *21*(3), 837. https://doi.org/10.3390/s21030837

Radopoulou, S. C., & Brilakis, I. (2016). Improving Road Asset Condition Monitoring. *Transportation Research Procedia*, *14*, 3004–3012. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.436

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process* [Der analytische Hierarchieprozess]. McGraw-Hill.

Saaty, T. L., & Özdemir, M. S. (2014). How Many Judges Should There Be in a Group? [Wie viele Richter sollten in einer Gruppe sein?]. *Annals of Data Science*, *1*(3–4), 359–368. https://doi.org/10.1007/s40745-014-0026-4

SAP. (2021). *SAP Signavio Process Manager* [Software]. SAP.

Schiffmann, F. (2014). *Entscheidungsmodell zur Ermittlung optimaler Baustellenabschnitte an Autobahnen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht* (S. 1 Band) [ETH Zurich; Application/pdf]. https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-010182371

Schmid, B., Molloy, J., Peer, S., Jokubauskaite, S., Aschauer, F., Hössinger, R., Gerike, R., Jara-Diaz, S. R., & Axhausen, K. W. (2021). The value of travel time savings and the value of leisure in Zurich: Estimation, decomposition and policy implications [Der Wert der Reisezeitersparnis und der Wert der Freizeit in Zürich: Schätzung, Aufschlüsselung und politische Implikationen]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *150*, 186–215. https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.06.015

Schonfeld, P., & Chien, S. (1999). Optimal Work Zone Lengths for Two-Lane Highways [Optimale Länge von Baustellenabschnitten für zweispurige Autobahnen]. *Journal of Transportation Engineering*, *125*(1), 21–29. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:1(21)

SED. (2024, Oktober 4). *Overview of the earthquake hazard in Switzerland* [Übersicht über die Erdbebengefahr in der Schweiz]. http://www.seismo.ethz.ch/en/knowledge/earthquake-hazard-and-risk/earthquake-hazard-switzerland/background-information/

SIA. (2013). *Grundlagen der Projektierung von Tragwerken—SIA 2690* (SN 505 260). Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein.

Vrtic, M., Weis, C., Rindsfüser, G., & Matthews, W. (2018). *Kalibrierung von Capacity-Restraint- Funktionen.* (Technischer Bericht Nr. 1628). Bundesamt für Strassen, UVEK.

VSS. (2013). *Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr Unfallraten und Unfallkostensätze* (SN 641 824). Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS.

VSS. (2019a). *Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF): Zustandserhebung und Indexbewertung* (40925b). Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS.

VSS. (2019b). *Geometrisches Normalprofil* (40202). Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS.

VSS. (2019c). *Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Freie Strecke auf Autobahnen* (40018a). Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS.

VSS. (2022). *Erhaltungsmanagement: Grundnorm* (SN 640 900). Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS.

Wackernagel, H. (1998). *Multivariate Geostatistics*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-03550-4

Weishaupt, R., & Beeler, P. (2024). *Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln: Einzelprojekt EP1 – Schadensprozesse und Langzeitverhalten bei*

Tunneln (AST_2020_101). Bundesamt für Strassen ASTRA. https://myvss.mobilityplatform.ch//vss/account/publication/3217/webviewer/

Yang, D. Y., & Frangopol, D. M. (2020). Risk-based portfolio management of civil infrastructure assets under deep uncertainties associated with climate change: A robust optimisation approach. *Structure and Infrastructure Engineering*, *16*(4), 531–546. https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1639776

Zhang, Z., Hamledari, H., Billington, S., & Fischer, M. (2018). 4D beyond construction: Spatio-temporal and life-cyclic modeling and visualization of infrastructure data. *Journal of Information Technology in Construction*, *23*, 285–304.

Anhang

Prozessdiagramm

Das Prozessdiagramm (vgl. Abbildung 123 und Abbildung 124) ist in hoher Auflösung im MINERVA-Datensatz hinterlegt.

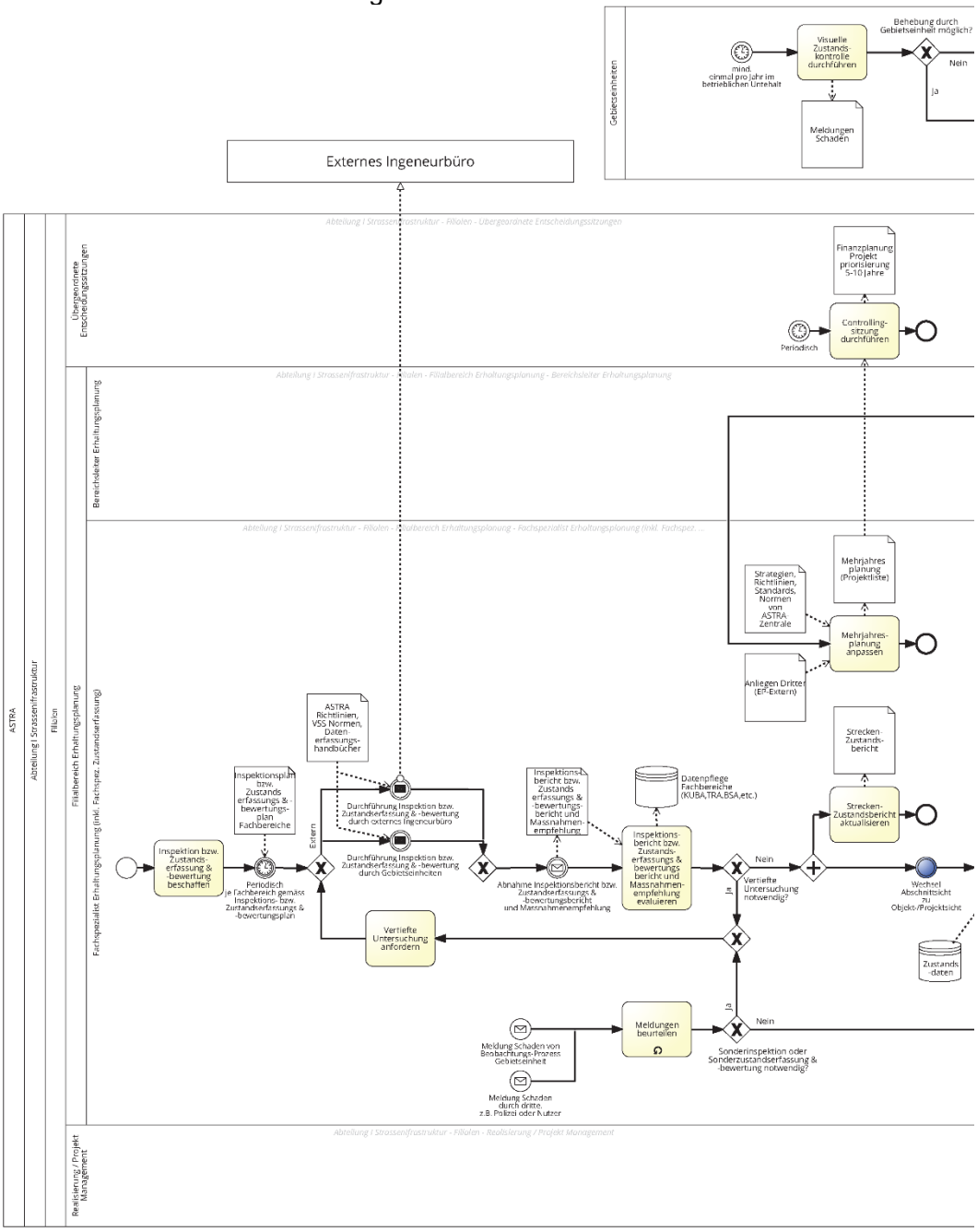


Abbildung 123: Erhaltungsplanungsprozess Teil 1.

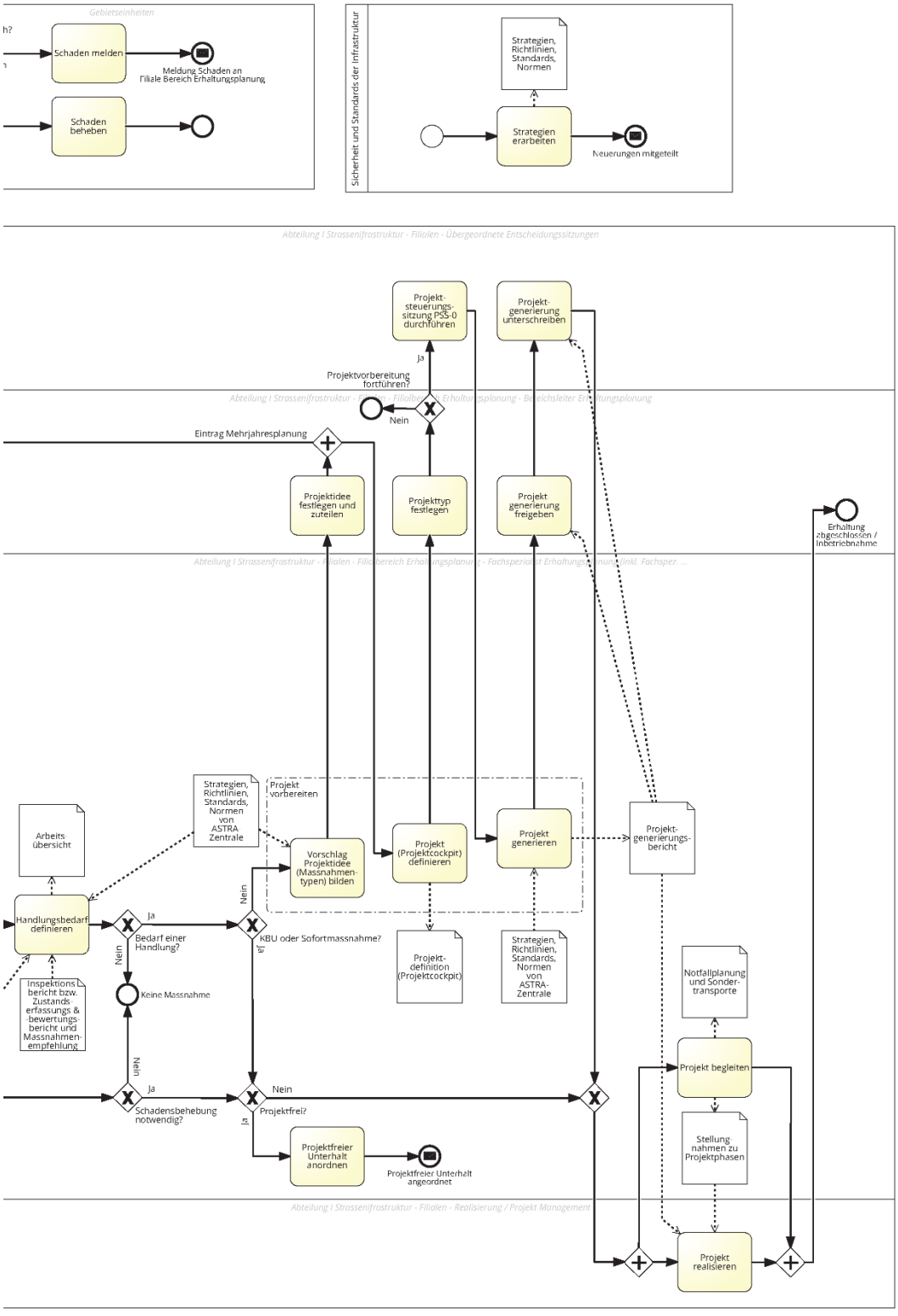


Abbildung 124: Erhaltungsplanungsprozess Teil 2

Verfallsmatrizen

In Tabelle 71sowie Tabelle 72 sind die Verfallsmatrizen für alle Schadensprozesse mit den Übergangswahrscheinlichkeiten in Prozent angegeben, sowohl für die Abschätzung von Zuständen nach fünf als auch nach einem Jahr. Die Matrizen für andere als den neutralen Einfluss sind im MINERVA-Datensatz hinterlegt. Für die 5-jährige Periode komme die Daten aus KUBA-MS.

Verfallsmatrizen für Schadenprozesse 10 bis 40

Schadensprozess Nr.		Verfallsmatrizen bei neutralem Einfluss									
		5-jährige Periode					1-jährige Periode				
10		ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
	ZK1	79	21	0	0	0	95.4	4.6	0	0	0
	ZK2	0	75	25	0	0	0	94.4	5.6	0	0
	ZK3	0	0	77	23	0	0	0	94.9	5.1	0
	ZK4	0	0	0	75	25	0	0	0	94.4	5.6
	ZK5	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100.0
20		ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
	ZK1	75	25	0	0	0	94.4	5.6	0	0	0
	ZK2	0	85	15	0	0	0	96.8	3.2	0	0
	ZK3	0	0	79	21	0	0	0	95.4	4.6	0
	ZK4	0	0	0	72	28	0	0	0	93.6	6.4
	ZK5	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100.0
30		ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
	ZK1	63	37	0	0	0	91.2	8.8	0	0	0
	ZK2	0	85	15	0	0	0	96.8	3.2	0	0
	ZK3	0	0	87	13	0	0	0	97.3	2.7	0
	ZK4	0	0	0	65	35	0	0	0	91.7	8.3
	ZK5	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100.0
40		ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
	ZK1	83	17	0	0	0	96.3	3.7	0	0	0
	ZK2	0	62	38	0	0	0	90.9	9.1	0	0
	ZK3	0	0	56	44	0	0	0	89.1	10.9	0
	ZK4	0	0	0	58	42	0	0	0	89.7	10.3
	ZK5	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100.0

Tabelle 71: Verfallsmatrizen für die Schadensprozesse 10 bis 40 unter neutralem Einfluss mit den entsprechenden Übergangswahrscheinlichkeiten in Prozent zur Abschätzung der Zustände nach einem bzw. fünf Jahren.

Verfallsmatrizen für Schadenprozesse 50 bis 90

Schadensprozess Nr.	Verfallsmatrizen bei neutralem Einfluss									
	5-jährige Periode					1-jährige Periode				
50		ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
	ZK1	80	20	0	0	0	95.6	4.4	0	0	0
	ZK2	0	73	27	0	0	0	93.9	6.1	0	0
	ZK3	0	0	85	15	0	0	0	96.8	3.2	0
	ZK4	0	0	0	78	22	0	0	0	95.2	4.8
	ZK5	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100.0
60		ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
	ZK1	68	32	0	0	0	92.6	7.4	0	0	0
	ZK2	0	53	47	0	0	0	88.1	11.9	0	0
	ZK3	0	0	52	48	0	0	0	87.7	12.3	0
	ZK4	0	0	0	50	50	0	0	0	87.1	12.9
	ZK5	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100.0
70		ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
	ZK1	69	31	0	0	0	92.8	7.2	0	0	0
	ZK2	0	59	41	0	0	0	90.0	10.0	0	0
	ZK3	0	0	39	61	0	0	0	82.8	17.2	0
	ZK4	0	0	0	44	56	0	0	0	84.9	15.1
	ZK5	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100.0
80		ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
	ZK1	66	34	0	0	0	92.0	8.0	0	0	0
	ZK2	0	51	49	0	0	0	87.4	12.6	0	0
	ZK3	0	0	37	63	0	0	0	82.0	18.0	0
	ZK4	0	0	0	33	67	0	0	0	80.1	19.9
	ZK5	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100.0
90		ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
	ZK1	76	24	0	0	0	94.7	5.3	0	0	0
	ZK2	0	45	55	0	0	0	85.2	14.8	0	0
	ZK3	0	0	32	68	0	0	0	79.6	20.4	0
	ZK4	0	0	0	38	62	0	0	0	82.4	17.6
	ZK5	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100.0

Tabelle 72: Verfallsmatrizen für die Schadensprozesse 50 bis 90 unter neutralem Einfluss mit den entsprechenden Übergangswahrscheinlichkeiten in Prozent zur Abschätzung der Zustände nach einem bzw. fünf Jahren.

Unterhaltsmassnahmen: Einheitskosten und Erfolgsvektor

In der Tabelle 73 bis Tabelle 78 sind die Unterhaltsmassnahmen für die Schadensprozesse aufgeführt mit den entsprechenden Einheitskosten. In KUBA-MS sind weitere definiert, die in dieser Arbeit jedoch nicht genutzt werden. Die Unterhaltsmassnahmen sind jeweils in den Zustandsklassen 3, 4 und 5 anwendbar. Sind nur zwei Unterhaltsmassnahmen aufgeführt, wird in den Zustandsklassen 3 und 4 dieselbe ausgeführt, ansonsten in Zustandsklasse 3 die am wenigsten umfassende. In Zustandsklasse 5 ist es immer die Ersatzmassnahme. Alle Informationen stammen aus der im Jahr 2023 verfügbaren KUBA-MS-Version «Cockpit».

Einheitskosten der Massnahmen bei «Korrosion im Stahlbeton»

		Unterhaltsmassnahmen [CHF/Einheit]		
		Vollständige Instandsetzung inkl. Ersatz der korrodierten Bewehrung	Vollständige Instandsetzung inkl. Ersatz der korrodierten Bewehrung und ganzflächiger Oberflächenschutz	Ersatz
Generalisierten Bauwerksteiltyp	Wand, Scheibe	1127	1200	2093
	Vollwandträger	1127	1200	1896
	Kastenträger	1353	1453	1523
	Fachwerkträger	1274	1400	2200
	Fahrbahnplatte	1127	1200	2093
	Decke	1127	1200	2093
	Randborde, Brüstung	1358	1200	2719
	Rahmen	1127	1200	2093
	Bogen, Gewölbe	1127	1200	2019
	Belag	-	-	500
	Rohr, Bachdurchlass	1127	1200	1843
	Widerlager	1127	1200	2093
	Stützmauer, Flügelmauer	1127	1200	2093
	Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben	1274	1386	2541

Tabelle 73: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozess "Korrosion im Stahlbeton".

Einheitskosten der Massnahmen bei «Frostschäden am Beton»

Generalisierten Bauwerksteiltyp	Unterhaltsmassnahmen [CHF/Einheit]		
	Reprofilierung und Reinigung der korrodierten Bewehrung	Reprofilierung und Reinigung der korrodierten Bewehrung und ganzflächiger Oberflächenschutz	Ersatz
Wand, Scheibe	500	1200	2093
Vollwandträger	500	1200	1896
Kastenträger	500	1453	2093
Fachwerkträger	500	1200	2200
Fahrbahnplatte	500	1200	2093
Decke	500	1200	2093
Randborde, Brüstung	500	1200	2719
Rahmen	500	1200	2093
Bogen, Gewölbe	500	1200	2019
Belag	-	-	500
Rohr, Bachdurchlass	500	1200	1843
Widerlager	500	1200	2093
Stützmauer, Flügelmauer	500	1200	2093
Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben	500	1386	2541

Tabelle 74: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozess "Frostschäden am Beton".

Einheitskosten der Massnahmen bei «Ausblühen»

Generalisierten Bauwerksteiltyp	Unterhaltsmassnahmen [CHF/Einheit]	
	Sinterstellen entfernen und wasserführende Risse ausinjizieren	Ersatz
Wand, Scheibe	656	2093
Vollwandträger	656	1896
Kastenträger	656	1523
Fachwerkträger	656	2200
Fahrbahnplatte	656	2093
Decke	656	2093
Randborde, Brüstung	656	2719
Rahmen	656	2093
Bogen, Gewölbe	656	2019
Belag	-	500
Rohr, Bachdurchlass	656	1843
Widerlager	656	2093
Stützmauer, Flügelmauer	656	2093
Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben	656	2541

Tabelle 75: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozess "Ausblühen".

Einheitskosten der Massnahmen bei «Korrosion am Baustahl»

		Unterhaltsmassnahmen [CHF/Einheit]	
		Gesamtinstandsetzung des Korrosionsschutzes und lokale Ergänzung korrodierter Stahlteile	Ersatz
Generalisierten Bauwerksteiltyp	Wand, Scheibe	460	2450
	Vollwandträger	460	1813
	Kastenträger	460	1813
	Fachwerkträger	460	1813
	Fahrbahnplatte	460	1323
	Decke	460	1613
	Randborde, Brüstung	460	2201
	Rahmen	460	2450
	Bogen, Gewölbe	460	2019
	Leitschranke, Geländer	460	500
	Rohr, Bachdurchlass	460	1651
	Stützmauer, Flügelmauer	460	1813
	Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben	460	2541

Tabelle 76: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozess "Korrosion am Baustahl".

Einheitskosten der Massnahmen bei «Schaden am Mauerwerk»

		Unterhaltsmassnahmen [CHF/Einheit]	
		Teilersatz des Mauerwerks und Ausmörteln der Mauerwerksfugen	Ersatz
Generalisierten Bauwerksteiltyp	Wand, Scheibe	500	784
	Vollwandträger	500	933
	Kastenträger	933	933
	Fachwerkträger	933	933
	Fahrbahnplatte	500	933
	Decke	500	1613
	Randborde, Brüstung	500	933
	Rahmen	933	933
	Bogen, Gewölbe	500	933
	Rohr, Bachdurchlass	933	933
	Widerlager	500	840
	Stützmauer, Flügelmauer	500	726
	Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben	500	877

Tabelle 77: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozess "Schaden am Mauerwerk".

Einheitskosten der Massnahmen bei diversen Schadensprozessen

Schadensprozess	Generalisierten Bauwerksteiltyp	Ersatzmassnahme in ZK 3, 4 und 5 [CHF/Einheit]
Schäden an Fahrbahnübergängen	Fahrbahnübergang	10000
	Belag	500
Schäden an Lagern	Lager, Gelenke	7500
Schäden am Belag	Belag	300
Schäden an der Abdichtung	Abdichtung	400

Tabelle 78: Einheitskosten für Unterhaltsmassnahmen beim Schadensprozessen «Schäden an Fahrbahnübergängen», «Schäden an Lagern», «Schäden am Belag» und «Schäden an der Abdichtung».

Erfolgsvektoren für die Unterhaltsmassnahmen

Schadensprozess Nr.	Massnahmen Nr.	Anwendung in ZK	Beschreibung	Erfolgsvektor				
				ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5
10	308	3	Lokale Reprofilierung und ganzflächiger Oberflächenschutz	0.9	0.1	0	0	0
	310	4	Vollständige Instandsetzung inkl. Ersatz der korrodierten Bewehrung und ganzflächiger Oberflächenschutz	0.93	0.07	0	0	0
	234	5	Ersatz	0.96	0.04	0	0	0
20	301	3	Lokale Reprofilierung	0.8	0.2	0	0	0
	303	4	Reprofilierung und Reinigung der korrodierten Bewehrung und ganzflächiger Oberflächenschutz	0.89	0.11	0	0	0
	234	5	Ersatz	0.96	0.04	0	0	0
30	304	3	Sinterstellen entfernen	0.96	0.04	0	0	0
	305	4	Sinterstellen entfernen und wasserführende Risse ausinjizieren	0.8	0.2	0	0	0
	234	5	Ersatz	0.96	0.04	0	0	0
40	312	3	Gesamtinstandsetzung des Korrosionsschutzes	0.89	0.11	0	0	0
	313	4	Gesamtinstandsetzung des Korrosionsschutzes und lokale Ergänzung korrodierter Stahlteile	0.89	0.11	0	0	0
	234	5	Ersatz	0.96	0.04	0	0	0
50	314	3	Ausmörteln der Mauerwerksfugen	0.8	0.2	0	0	0
	315	4	Gesamtinstandsetzung des Korrosionsschutzes und lokale Ergänzung korrodierter Stahlteile	0.89	0.11	0	0	0
	234	5	Ersatz	0.89	0.11	0	0	0
60	316	3	Teilinstandsetzung des Fahrbahnüberganges (zugängliche Teile)	0.6	0.4	0	0	0
	317	4	Teilinstandsetzung des Fahrbahnüberganges	0.8	0.2	0	0	0
	234	5	Ersatz	0.89	0.11	0	0	0
70	319	3	Reinigung Lager, Instandsetzung des Korrosionsschutzes und weiche Lagerteile ersetzen	0.8	0.2	0	0	0
	320	4	Reinigung Lager, Instandsetzung des Korrosionsschutzes und Lagerteile ersetzen	0.8	0.2	0	0	0
	234	5	Ersatz	0.96	0.04	0	0	0
80	321	3	Lokaler Ersatz der Deckschicht	0.8	0.2	0	0	0
	323	4	Ersatz der Deckschicht	0.89	0.11	0	0	0
	234	5	Ersatz	0.89	0.11	0	0	0
90	234	3, 4, 5	Ersatz	0.89	0.11	0	0	0

Tabelle 79: Erfolgsvektoren für die Unterhaltsmassnahmen bei allen Schadensprozessen.

AHP-Fragebögen: Fragen, Antworten und Resultate

In Abbildung 125 ist der Aufbau des Fragebogens dargestellt, den die sechs Experten ausgefüllt haben. Für alle weiteren Fragen, die in den Abbildungen nicht zu sehen sind, wurde der gleiche Aufbau für jeden Schadensprozess und jeden generalisierten Bauwerksteiltyp wiederholt. Die Einflussgrössen werden immer paarweise verglichen mit der nach AHP-Methode vorgebenden Skalenwerte. Diese sind: 1 (gleich gross), 2, 3 (etwas grösser), 4, 5 (deutlich grösser), 6, 7 (sehr viel grösser), 8, 9 (maximal grösser, dominierend). Tabelle 80 zeigt eine Übersicht über die Konsistenz der Antworten der Experten, d. h. wie viele der 74 Fragen unter dem vom Entwickler des AHP angestrebten Konsistenzverhältnis (CR) von 0,1 liegen. Gewisse Prozentsätze konsistenter Antworten mögen sehr ungenügend aussehen, sind aber in der Realität differenzierter zu betrachten. Denn oft wurde die Auswahl der Zahlenwerte über alle drei paarweisen Vergleiche nicht möglichst proportional gemacht, sondern mehr aufgrund der sprachlichen Beschreibung eines Zahlenwerts. Ein solches Beispiel wäre: Alter hat einen deutlich grösseren Einfluss als Verkehr (5). Alter hat einen etwas grösseren Einfluss als Umwelt (3). Umwelt hat einen deutlich grösseren Einfluss als Verkehr (5). Wenn das Ziel eine eingehaltene Proportionalität und damit ein perfektes Konsistenzverhältnis wäre, dann könnte man den dritten paarweisen Vergleich weglassen, respektive aus den ersten beiden Antworten ableiten (Im Beispiel: A/V=5, A/U=3, dann müsste U/V=5/3=1.67). Aber das ist nicht das Ziel, weil bewusst jeder paarweise Vergleich angeschaut wird, damit sich aus allen drei Antworten eine akkurate Einschätzung für die Gewichtung bildet. Mangelnde Proportionalität kann schnell erscheinen, wenn die paarweisen Vergleiche zu isoliert und nicht innerhalb der Frage gedacht werden. Diese mangelnde Proportionalität ist zu unterscheiden von tatsächlich widersprüchlichen Antworten, welche ein klar schlechteres Konsistenzverhältnis hervorbringen würden. Bei den ausgefüllten Fragebögen, welche bei gewissen Antworten das angestrebte Konsistenzverhältnis nicht erreichten, handelt es sich, um mangelnde Proportionalität der ausgewählten Werte und nicht um widersprechende Antworten. Diese proportionale Inkonsistenz verschwindet mit dem geometrischen Mittelwert aus mehreren Fragebögen schnell. Die resultierenden geometrischen Mittelwerte aus der Fragenauswertung sind in Tabelle 81 dargestellt und nach Schadensprozess sowie generalisiertem Bauwerksteiltyp sortiert. Der Schadensprozess 100 «Alkali-Aggregat-Reaktion» wurde ebenfalls im Fragebogen berücksichtigt, obwohl dieser nicht für die Abschätzungen von Zuständen und die Prognosen von Unterhaltsmassnahmen verwendet wird. Die zurückerhaltenen Fragebögen sowie die vollständigen Ergebnisse sind im MINERVA-Datensatz zu finden.

Übersicht Antworten AHP-Fragebögen

Fragebogen Nr.	1	2	3	4	5	6	Geometrischer Mittelwert
Anzahl Antworten	74	61	63	74	74	74	74
Konsistente Antworten	12.2%	63.5%	31.1%	93.2%	93.2%	37.8%	100%

Tabelle 80: Anzahl Antworten und Anteil an konsistenten Antworten aus den AHP-Fragebögen.

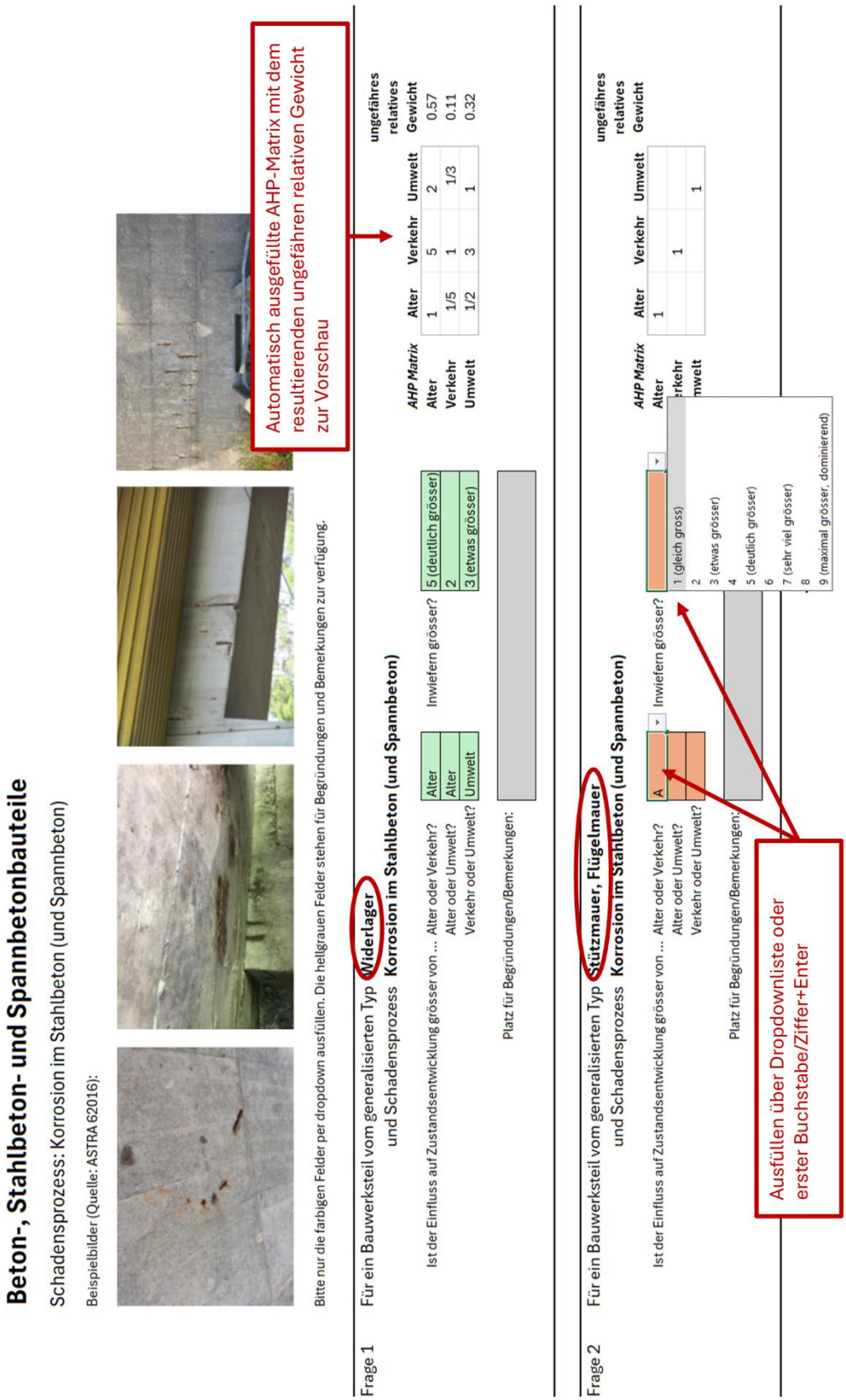


Abbildung 125: Fragebogen für die AHP-Experteninterviews.

Geometrisch gemittelte Ergebnisse aus den AHP-Interviews

		Einflussgrössen Vergleich			Relatives Gewicht			
Schadensprozess Nr.	Generalisierter Bauwerksteiltyp	Alter-Verkehr	Alter-Umwelt	Verkehr-Umwelt	Alter	Verkehr	Umwelt	Konsistenzverhältnis
10	5	5.14	0.54	0.19	0.36	0.08	0.56	0.02
	7	5.59	0.56	0.18	0.37	0.08	0.56	0.02
	9	5.92	0.73	0.17	0.41	0.08	0.51	0.01
	10	3.66	1.20	0.27	0.47	0.13	0.40	0.00
	11	1.77	2.02	0.57	0.48	0.24	0.28	0.02
	12	1.77	2.02	0.57	0.48	0.24	0.28	0.02
	13	1.34	2.67	0.74	0.48	0.29	0.23	0.05
	14	1.45	1.40	0.69	0.42	0.29	0.30	0.00
	16	5.76	0.35	0.17	0.30	0.07	0.62	0.09
	20	2.41	0.73	0.41	0.37	0.17	0.46	0.01
	22	5.23	0.82	0.19	0.42	0.08	0.49	0.00
	25	2.93	0.72	0.34	0.37	0.13	0.49	0.00
	28	5.77	0.85	0.17	0.43	0.07	0.50	0.00
20	5	4.92	0.33	0.20	0.28	0.07	0.65	0.06
	7	4.92	0.33	0.20	0.28	0.07	0.65	0.06
	9	4.92	0.33	0.20	0.28	0.07	0.65	0.06
	10	5.36	0.35	0.19	0.30	0.07	0.63	0.07
	11	5.36	0.34	0.19	0.29	0.07	0.64	0.07
	12	5.36	0.34	0.19	0.29	0.07	0.64	0.07
	13	4.83	0.38	0.21	0.30	0.08	0.62	0.04
	14	4.92	0.34	0.20	0.29	0.08	0.64	0.07
	16	4.65	0.45	0.21	0.31	0.08	0.61	0.02
	20	5.16	0.34	0.19	0.29	0.07	0.64	0.06
	22	4.92	0.34	0.20	0.28	0.08	0.64	0.06
	25	4.08	0.56	0.25	0.34	0.09	0.58	0.00
	28	5.67	0.63	0.18	0.38	0.07	0.55	0.01
30	5	4.52	1.07	0.22	0.48	0.12	0.41	0.01
	7	5.63	1.07	0.18	0.46	0.07	0.47	0.01
	9	3.81	1.85	0.26	0.55	0.13	0.32	0.00
	10	2.14	1.85	0.47	0.50	0.22	0.28	0.00
	11	2.85	1.12	0.35	0.45	0.17	0.38	0.00
	12	2.85	1.12	0.35	0.45	0.17	0.38	0.00
	13	2.14	1.72	0.47	0.49	0.22	0.30	0.00
	14	2.85	1.07	0.35	0.44	0.16	0.40	0.00
	16	4.27	0.88	0.23	0.40	0.08	0.52	0.02
	20	2.98	1.07	0.34	0.44	0.15	0.41	0.00
	22	2.98	1.07	0.34	0.44	0.15	0.41	0.00

	25	3.54	1.27	0.28	0.44	0.09	0.47	0.08
	28	5.33	1.07	0.19	0.49	0.10	0.41	0.01
40	9	6.01	0.79	0.17	0.42	0.07	0.51	0.00
	10	3.39	1.24	0.30	0.47	0.13	0.40	0.00
	11	1.49	2.05	0.67	0.47	0.25	0.28	0.04
	12	1.93	1.82	0.52	0.48	0.21	0.31	0.03
	13	1.86	1.39	0.54	0.44	0.20	0.36	0.02
	14	1.54	2.26	0.65	0.48	0.24	0.28	0.06
	15	1.77	2.26	0.57	0.50	0.22	0.28	0.06
	16	5.91	0.51	0.17	0.36	0.07	0.57	0.04
	20	2.90	0.95	0.35	0.41	0.14	0.45	0.00
	22	5.23	0.92	0.19	0.44	0.09	0.47	0.00
	25	3.27	0.51	0.31	0.33	0.12	0.55	0.03
	28	6.15	1.04	0.16	0.46	0.07	0.47	0.00
50	5	2.84	0.72	0.35	0.38	0.15	0.47	0.01
	7	3.83	0.81	0.26	0.41	0.12	0.47	0.00
	9	3.04	0.84	0.33	0.40	0.14	0.45	0.00
	10	2.53	0.72	0.40	0.37	0.16	0.46	0.01
	16	2.85	0.66	0.35	0.36	0.14	0.51	0.00
	22	2.37	0.84	0.42	0.39	0.17	0.44	0.00
60	19	1.06	1.51	0.94	0.37	0.43	0.20	0.04
70	18	2.61	1.05	0.38	0.43	0.16	0.41	0.00
80	24	0.71	1.70	1.41	0.31	0.53	0.15	0.03
90	23	2.88	1.89	0.35	0.52	0.16	0.32	0.02
100	5	6.25	0.58	0.16	0.37	0.07	0.56	0.02
	7	6.25	0.58	0.16	0.37	0.07	0.56	0.02
	9	6.25	0.64	0.16	0.39	0.07	0.55	0.01
	10	6.80	0.68	0.15	0.40	0.07	0.53	0.01
	11	6.80	0.64	0.15	0.39	0.07	0.54	0.01
	12	6.80	0.64	0.15	0.39	0.07	0.54	0.01
	13	6.43	0.80	0.16	0.42	0.07	0.51	0.00
	14	6.80	0.61	0.15	0.38	0.06	0.55	0.02
	16	6.80	0.56	0.15	0.37	0.06	0.57	0.02
	20	6.80	0.68	0.15	0.40	0.07	0.53	0.01
	22	6.80	0.68	0.15	0.40	0.07	0.53	0.01
	25	6.43	0.68	0.16	0.40	0.07	0.54	0.01
	28	7.36	0.68	0.14	0.41	0.06	0.53	0.01

Tabelle 81: Geometrisch gemittelte Ergebnisse aus den AHP-Interviews für die Einflussgrössen und das resultierende Konsistenzverhältnis.

Unterhaltsmassnahmen Trassee

Unterhaltsmassnahmen Trassee auf der freien Strecke P1

Periode	Bez.	Details Massnahme			
		Wahrscheinlichkeit	Auslöser	Typ	Kosten $[CHF]$
P1	T2	0.49	I2	ED	40425
	T3	0.65	I0	TB	196350
	T36	0.36	I0	ED	122500
	T37	0.36	I0	ED	122500
	T38	0.60	I0	ED	122500
	T39	0.60	I0	ED	122500
	T40	0.60	I0	ED	147000
	T41	0.60	I0	ED	147000
	T44	0.60	I0	ED	147000
	T45	0.60	I0	ED	147000
	T50	0.29	I0	ED	49000
	T51	0.29	I0	ED	49000
	T60	0.57	I0	ED	183750
	T61	0.51	I0	ED	196000
	T62	0.60	I0	ED	159250
	T65	0.60	I0	ED	24500
	T66	0.59	I0	ED	196000
	T69	0.60	I0	ED	122500
	T70	0.56	I0	EDB	112000
	T73	0.60	I0	ED	24500
	T74	0.57	I0	EDB	336000
	T77	0.56	I0	EDB	112000
	T78	0.57	I0	EDB	56000
	T81	0.56	I0	EDB	168000
	T82	0.57	I0	EDB	112000
	T85	0.56	I0	ED	49000
	T88	0.56	I0	EDB	112000
	T89	0.56	I0	ED	24500
	T90	0.57	I0	EDB	224000
	T93	0.55	I0	ED	24500
	T99	0.57	I0	ED	49000
	T101	0.56	I0	ED	98000
	T124	0.58	I0	ED	147000
	T126	0.57	I0	ED	122500
	T128	0.59	I0	ED	122500
	T130	0.59	I0	ED	122500
	T135	0.58	I0	ED	147000
	T137	0.57	I0	ED	122500
	T139	0.58	I0	ED	122500

	T162	0.31	I0	ED	98000
	T164	0.57	I0	EDB	280000
	T168	0.56	I0	EDB	112000
	T172	0.21	I0	ED	98000
	T173	0.57	I0	EDB	224000
	T175	0.57	I0	EDB	280000
	T179	0.34	I0	ED	49000
	T183	0.28	I0	EDB	224000

Tabelle 82: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmen auf der feien Strecke für die Planungsperioden P1. Für jede Massnahme ist die Wahrscheinlichkeit, der auslösende Index, der Typ und die Kosten angeben.

Unterhaltsmassnahmen Trassee auf der freien Strecke P2-P4

Periode	**Bez.**	**Details Massnahme**			
		Wahrschein-lichkeit	Auslöser	Typ	Kosten $[CHF]$
P2	T115	0.21	I2	ED	12250
	T147	0.26	I4	EDB	392000
P3	T6	0.59	I0	ED	367500
	T7	0.59	I0	ED	367500
	T10	0.59	I0	ED	147000
	T11	0.58	I0	ED	147000
	T14	0.59	I0	ED	220500
	T15	0.59	I0	ED	220500
	T16	0.59	I0	ED	183750
	T17	0.59	I0	ED	183750
	T18	0.59	I0	ED	183750
	T19	0.59	I0	ED	183750
	T20	0.59	I0	ED	183750
	T21	0.59	I0	ED	183750
	T22	0.59	I0	ED	183750
	T23	0.59	I0	ED	183750
	T24	0.59	I0	ED	183750
	T25	0.59	I0	ED	183750
	T26	0.59	I0	ED	183750
	T27	0.59	I0	ED	183750
	T28	0.59	I0	ED	220500
	T29	0.59	I0	ED	220500
	T32	0.59	I0	ED	98000
	T33	0.59	I0	ED	147000
	T56	0.25	I2	ED	142917
	T98	0.39	I4	ED	122500
	T109	0.24	I4	ED	122500
	T111	0.38	I4	ED	73500
	T132	0.59	I0	ED	122500
	T134	0.59	I0	ED	122500

	T136	0.59	I0	ED	171500
	T141	0.35	I4	ED	122500
	T142	0.58	I4	EDB	280000
	T143	0.52	I4	EDB	280000
	T144	0.55	I4	EDB	280000
	T145	0.33	I4	ED	122500
	T150	0.59	I4	EDB	392000
	T153	0.62	I4	EDB	280000
	T155	0.62	I4	EDB	280000
	T157	0.63	I4	EDB	280000
	T161	0.54	I4	EDB	392000
	T174	0.56	I0	ED	122500
	T176	0.56	I0	ED	122500
	T178	0.56	I0	ED	122500
	T180	0.56	I0	ED	122500
	T185	0.56	I0	ED	122500
	T187	0.56	I0	ED	122500
	T189	0.56	I0	ED	122500
	T191	0.56	I0	ED	122500
P4	T53	0.22	I2	ED	147000
	T57	0.24	I2	ED	132708
	T58	0.23	I2	ED	193958
	T59	0.22	I2	ED	183750
	T94	0.41	I4	EDB	392000
	T96	0.22	I4	EDB	336000
	T100	0.51	I4	EDB	336000
	T104	0.39	I4	EDB	56000
	T105	0.28	I4	EDB	392000
	T107	0.46	I0	ED	147000
	T108	0.30	I4	EDB	336000
	T110	0.41	I0	ED	147000
	T114	0.41	I0	ED	122500
	T116	0.41	I0	ED	122500
	T118	0.41	I0	ED	122500
	T119	0.36	I4	EDB	336000
	T120	0.41	I0	ED	171500
	T121	0.33	I4	EDB	336000
	T125	0.41	I0	ED	122500
	T127	0.41	I0	ED	122500
	T129	0.36	I4	EDB	280000
	T131	0.28	I4	EDB	392000
	T146	0.50	I4	EDB	280000

Tabelle 83: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmen auf der feien Strecke für die Planungsperioden P2-P4. Für jede Massnahme ist die Wahrscheinlichkeit, der auslösende Index, der Typ und die Kosten angeben.

Unterhaltsmassnahmen Trassee auf Brücke und in Tunnel

Periode	Bez.	Details Massnahme			
		Wahrschein-lichkeit	Auslöser	Typ	Kosten $[CHF]$
P1	T4	0.31	I2	TB	374850
	T5	0.31	I2	ED	77175
	T8	0.51	I2	ED	73500
	T9	0.49	I2	ED	73500
	T12	0.43	I2	ED	73500
	T13	0.48	I2	ED	73500
	T31	0.23	I2	ED	220500
	T42	0.61	I0	ED	73500
	T43	0.61	I0	ED	73500
	T47	0.22	I2	ED	122500
	T48	0.56	I0	ED	98000
	T49	0.57	I0	ED	98000
	T63	0.60	I0	ED	49000
	T64	0.27	I4	EDB	112000
	T67	0.57	I0	ED	49000
	T68	0.57	I0	ED	73500
	T71	0.59	I0	ED	49000
	T72	0.57	I0	EDB	224000
	T75	0.59	I0	ED	73500
	T76	0.58	I0	EDB	56000
	T79	0.58	I0	EDB	224000
	T80	0.57	I0	EDB	112000
	T83	0.56	I0	EDB	56000
	T84	0.57	I0	EDB	112000
	T86	0.21	I4	EDB	448000
	T87	0.56	I0	EDB	56000
	T91	0.56	I0	EDB	168000
	T92	0.63	I2	TB	119000
	T95	0.43	I0	ED	49000
	T97	0.32	I0	ED	196000
	T102	0.22	I2	ED	49000
	T103	0.70	I2	TB	119000
	T112	0.26	I2	ED	49000
	T113	0.24	I2	ED	24500
	T122	0.43	I0	ED	134750
	T123	0.24	I2	ED	49000
	T133	0.44	I0	ED	98000
	T140	0.43	I2	ED	49000
	T148	0.29	I2	ED	49000
	T151	0.22	I2	ED	49000
	T154	0.32	I4	EDB	728000

	T156	0.43	I2	ED	49000
	T159	0.38	I2	ED	49000
	T160	0.20	I2	TB	1309000
	T165	0.66	I4	EDB	700000
	T166	0.56	I0	EDB	112000
	T167	0.49	I2	EDB	112000
	T170	0.31	I0	ED	294000
	T177	0.57	I0	EDB	112000
	T181	0.35	I0	ED	294000
P2	T46	0.21	I2	ED	122500
	T152	0.33	I0	ED	98000
	T163	0.29	I0	ED	98000
P3	T34	0.36	I0	ED	49000
	T35	0.36	I0	ED	61250
	T54	0.21	I2	ED	122500
	T55	0.20	I2	ED	122500
	T106	0.24	I2	ED	98000
	T138	0.35	I0	ED	49000
	T149	0.29	I4	EDB	112000
	T158	0.22	I2	TB	1309000
	T169	0.21	I2	TB	1309000
	T171	0.20	I2	TB	1309000
P4	T30	0.21	I2	TB	1011500
	T117	0.24	I2	ED	98000

Tabelle 84: Prognostizierte Unterhaltsmassnahmen für das Trassee auf Brücken und in Tunnel für die Planungsperioden P1-P4. Für jede Massnahme ist die Wahrscheinlichkeit, der auslösende Index, der Typ und die Kosten angeben.

Projektabschluss

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 11.06.2026

Grunddaten

Projekt-Nr.:	TRU_20_04C_01
Projekttitel:	Integrierte Planung von Unterhaltsmassnahmen auf Strassenabschnitten, die aus Anlagen unterschiedlicher Art bestehen
Enddatum:	31.12.2026

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Im Rahmen von MINERVA wurde festgestellt, dass sich der Erhaltungsplanungsprozess des ASTRA durch den Einsatz digitaler Hilfsmittel weiter verbessern lässt. Die entwickelten Methoden zur datenbankgestützten Zustandsabschätzung sowie die auf dieser Grundlage prognostizierten Unterhaltsmassnahmen können zusätzliche Informationen liefern und die Erhaltungsplaner bei ihren Entscheidungen unterstützen. So können diese ressourcenschonend und konsistent vertiefte Untersuchungen anordnen. Die Ergebnisse aus vertieften Untersuchungen stehen jedoch weiterhin nur für eine Anlage zur Verfügung und müssen in ein Massnahmenprogramm überführt werden, das die Arbeiten an Anlagen verschiedener Art bündelt. Der vorgestellte Optimierungsalgorithmus kann hier bereits erste Ideen liefern, wie diese gebündelt werden können, und somit Erhaltungsplanerinnen und Erhaltungsplaner verschiedener Fachgebiete in ihren Diskussionen unterstützen. Die Methoden konnten an den Daten einer Teststrecke validiert und demonstriert werden. Auch wenn die Methoden sich noch auf diverse Annahmen stützen, konnte durch die Anwendung auf reale Daten des ASTRA gezeigt werden, dass eine Implementierung möglich ist.

Die Integration digitaler Hilfsmittel vor allem dann erfolgreich, wenn diese Hilfsmittel auch tatsächlich verwendet werden. Die Umstellung hin zur Verwendung digitaler Hilfsmittel kann dadurch gefördert werden, dass diese intuitiv zu verwenden sind. Hilfsmittel wie BIM und GIS ermöglichen schon heute das Referenzieren von Informationen zu räumlichen Objekten. Aus diesem Grund wurde in MINERVA auch dargestellt, wie Daten, die für die Erhaltungsplanung relevant sind, mit BIM-Modellen verknüpft werden können.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das Hauptziel des MINERVA-Projekts war die Entwicklung eines neuen Prozesses zur integrierten Planung von Unterhaltsmassnahmen für Strassenabschnitte, die aus Anlagen unterschiedlicher Art bestehen. Der aktuelle Erhaltungsplanungsprozess wird durch digitale Hilfsmittel ergänzt, um dessen Effizienz und Effektivität zu erhöhen. „Effektiv" bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Prozess dabei unterstützt, die „richtigen" Massnahmen zu bestimmen, und „effizient" bedeutet, dass Entscheidungen ressourcenschonend getroffen werden können.

Zu diesem Zweck wurden digitale Hilfsmittel unter Verwendung modernster mathematischer Modelle entwickelt, die in die digitale Umgebung von ASTRA eingebettet werden können. Diese wurden an den Daten einer Teststrecke validiert und demonstriert. Sie sind die Methoden, die zur Einhaltung des Hauptziels erforderlich waren. Folgende digitale Hilfsmittel ergaben sich:
- Um aktuelle Zustandsdaten abzuschätzen, für die keine Daten vorliegen, wurde für Brücken ein expertisenbasiertes Bayes'sches Netz und für die Fahrbahn ein ANN-Kriging entwickelt. Mithilfe dieser Methoden kann das Zustandsbild der Infrastruktur zum aktuellen Zeitpunkt vervollständigt werden. Dies konnte durch die Validierung der Methoden bestätigt werden.
- Auf Basis der aktuellen Zustandsdaten kann eine Abschätzung zukünftiger Zustände vorgenommen werden. Für die Brückenbauwerksteile wird das Vorgehen mit Verfallsvektoren, Schadensprozessen und Einflussfaktoren vom ASTRA übernommen, jedoch wird eine probabilistische Berechnung durchgeführt. Bei der Fahrbahn wird ein Extended Kalman Filter verwendet, der eine Punktabschätzung der Zielgrösse sowie eine Unsicherheitsabschätzung liefert. Ein Extended Kalman Filter nutzt dabei eine Verfallskurve, die aus vielen Zustandsdaten ermittelt und unter Berücksichtigung der vergangenen Inspektionen für eine Bewertungsfläche angepasst wird.
-Die Prognose von Unterhaltsmassnahmen für Brücken und Fahrbahnen wurde um die Berechnung des Risikos einer Sofortmassnahme ergänzt, die zu einer Leistungseinschränkung führt. Damit kann die Erhaltungsplanung unter Ressourcenknappheit priorisiert werden.
-Die automatische Bündelung von Massnahmen wird durch eine Optimierung erreicht, bei der die Kosten und der Nutzen aller Anlagenmassnahmen verschiedener Art optimiert werden.
- Für die Visualisierung der Ergebnisse wurde anhand von BIM-Modellen gezeigt, wie die Zustandsabschätzung und die Massnahmenprognose für Brücken anschaulich dargestellt werden kann. Dies ermöglicht eine schnelle Identifizierung kritischer Zustände von Bauwerksteilen mit genauer loklisierung im Raum.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die verschiedenen entwickelten Methoden werden als solche angesehen, die in einem zukünftigen Erhaltungsplanungsprozess des ASTRA entscheidungsrelevante Informationen liefern können. Die Methoden können im Einzelfall anders umgesetzt werden, was den Mehrwert weiterer digitaler Hilfsmittel nicht zunichte macht. Die Einführung neuer digitaler Tools steht jedoch auch vor einem Akzeptanzproblem und es muss erst Vertrauen in den Mehrwert der Tools aufgebaut werden. Es geht nicht darum, die Umsetzung genau den Prozessschritten und deren Berechnungsverfahren folgen zu lassen, sondern darum, Anstösse zu geben, wie sich die digitalen Hilfsmittel (Fachapplikationen) oder die Erhaltungsplanung im Allgemeinen im ASTRA weiterentwickeln lassen und dass es Anwendungsbereiche für computergestützte Methodiken zur Entscheidungsunterstützung gibt.

Es wird empfohlen, die Methoden in Pilotanwendungen, beispielsweise in einer Filiale, zu testen – am besten in Kombination mit den KUBA- und TRA-Fachapplikationen aber auch BIM Modellen, um die grundsätzliche Akzeptanz zu ermitteln.

Publikationen:

Hässig, S., Adey, B. T., Hajdin, R., & Meier, J. (2026). Understanding the Road Intervention Planning Process to Improve Efficiency and Effectiveness Using Digital Tools. Journal of Infrastructure Systems, 32(1), 04025038. https://doi.org/10.1061/JITSE4.ISENG-2739

Meier, J., Adey, B. T., Hajdin, R., & Hassig, S. (2025). Integrating risk estimates into the planning of preventive maintenance for large portfolios of bridges. 35th European Safety and Reliability & the 33rd Society for Risk Analysis Europe Conference. https://doi.org/doi:%52010.3850/978-981-94-3281-3_ESREL-SRA-E2025-P2915-cd

Weitere in Vorbereitung.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Adey Vorname: Bryan Tyrone

Amt, Firma, Institut: ETHZ-IBI

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Zürich 15.07.2026

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die vorliegende Forschungsarbeit widmet sich einem hochkomplexen und für das Infrastrukturmanagement des ASTRA strategisch äusserst relevanten Thema: der datengetriebenen, prädiktiven Erhaltungsplanung. Die Autoren präsentieren eine durchgängige Pipeline, mit eindrücklicher Prozessanalyse, die sehr detailliert und umfassend gestaltet ist. Die Wichtigkeit das zukünfte Erhaltungsmanagement datengetrieben zu gestalten nimmt dabei eine zentrale Rolle ein. Weiter werden Themen von der Datenimputation über stochastische Degradationsmodelle bis hin zur mathematischen Optimierung von Baustellenprogrammen und deren Visualisierung in BIM bzw. GIS gründlich bearbeitet. Besonders hervorzuheben ist der methodische Mut der Autoren, ein breites Arsenal an modernen Analyseverfahren aus den Bereichen Operations Research und Data Science zu kombinieren. Die Arbeit überzeugt als akademische Machbarkeitsstudie (Proof of Concept) - sie zeigt aber auch die momentan existierenden Grenzen durch unzureichende Daten auf. In der Arbeit wird die Erhaltungsplanung der Zukunft skizziert und gleichzeitig offenbaren die angewandten Algorithmen in den Fallstudien jedoch die Diskrepanz zwischen idealisierten mathematischen Modellen und der physikalischen sowie ökonomischen Realität des Strassenunterhalts und der aktuellen Datenhaltung. Die Autoren diskutieren reflektiert die Limitierungen ihrer Modelle (z. B. die unzureichenden a priori-Funktionen beim Trassee oder die grobe Berechnung der Nutzerkosten) kritisch und transparent.

Umsetzung:

Die Ergebnisse der Fallstudien dürfen nicht als fertige Management-Entscheidungen verstanden werden, sondern als Sensitivitätsanalysen. Bevor die entwickelten Algorithmen im ASTRA produktiv gesetzt werden können, ist ein intensives Data Engineering notwendig, um die Modelle mit der physikalischen Realität und wirtschaftlich plausiblen Parametern zu kalibrieren. Trotz der exzellenten theoretischen Fundierung stösst die Methodik bei der Anwendung auf historische reale Daten (KUBA/MISTRA) auf Grenzen, die für eine spätere Implementierung zwingend adressiert werden müssen: Der Versuch, den zukünftigen Zustand des Trassees mittels eines Extended Kalman Filters (EKF) vorherzusagen, scheiterte an der Datenrealität. Das Modell wurde dadurch gezwungen, auf starre Standardkurven zurückzufallen. Um die strategischen ASTRA-Vorgaben (z. B. 15 Jahre baustellenfreie Zeit) in der MILP-Optimierung einzuhalten, wählt der Algorithmus den Weg des systematischen Vorziehens aller Massnahmen. Dies führt zur Vernichtung von intakter Bausubstanz und widerspricht den Prinzipien der LCC. Als Blaupause für die digitale Transformation der Erhaltungsplanung hat die Arbeit ihr Ziel jedoch vollumfänglich erreicht.

weitergehender Forschungsbedarf:

Aktuelle Normen und Erhaltungsrichtlinien arbeiten oft mit harten Schwellwerten bzw. Zustandsklassen - bei deren Erreichen werden Massnahmen zwingend. Anstatt eines deterministischen Schwellenwerts müssen Normen/Richtlinien/... Vorgaben machen wie: "Die Wahrscheinlichkeit, dass das Bauteil in den kommenden t Jahren in Zustandsklasse z abfällt, darf x% nicht überschreiten." Die Erhaltungsplanung der Zukunft muss diese stochastische Sprache sprechen, um ihre maximale Wirkung zu entfalten. Der Forschungsbedarf liegt somit in der (Weiter-)Entwicklung von hybriden Modellen, die hart codierte physikalische Restriktionen mit maschinellem Lernen verbinden und nicht-lineares Alterungsverhalten optimal in Mehrjahrespläne für die Erhaltung übersetzen.

Einfluss auf Normenwerk:

Das Normenwerk der Zukunft muss probabilistische Nachweisformate für die Gebrauchstauglichkeit integrieren. Dies stellt jedoch ein Paradigma-Wechsel dar, der zahlreiche Normen beeinflussen wird.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Herrmann Vorname: Thomas

Amt, Firma, Institut: ZHAW - Institut für Data Science

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Winterthur 07.07.2026 T. Herrmann