
Zukünftige Einwicklung eines Tools für ein indikatorengestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 196

Zukünftige Einwicklung eines Tools für ein indikatorengestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken

von

Rade Hajdin, Frank Schiffmann,
Tim Blumenfeld, Nikola Tanasić

Infrastructure Management Consultants GmbH
Mannheim

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 196

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Seit 2015 stehen die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 69.0007
Zukünftige Entwicklung eines Tools für ein
indikatorengestütztes, verkehrsträgerübergreifendes
Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbawerken

Fachbetreuung:
Stefan Staub

Referat:
Grundsatzfragen der Bauwerkserhaltung

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Bruderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange: Kommunikation

Druck und Verlag:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53 | Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293 | ISBN 978-3-95606-775-4 | <https://doi.org/10.60850/bericht-b196>

Bergisch Gladbach, März 2024

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen des BMDV-Expertennetzwerks „Wissen – Können – Handeln“ durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) finanziert.

Das BMDV-Expertennetzwerk ist ein verkehrsträger- und behördenübergreifendes Forschungsformat in der Ressortforschung des BMDV. Unter dem Leitmotiv „Wissen – Können – Handeln“ haben sich sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) 2016 zu einem Netzwerk zusammengeschlossen. Ziel ist es, drängende Verkehrsfragen der Zukunft in den Bereichen Klimawandel, Umweltschutz, zuverlässige Infrastruktur, Digitalisierung, erneuerbare Energien und verkehrswirtschaftliche Analysen zu erforschen.

Kurzfassung - Abstract

Zukünftige Entwicklung eines Tools für ein indikatorengestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken

In Hinblick auf die Zustandsbeschreibung und die Beurteilung der Zielerfüllung des Lebenszyklusmanagements von Bauwerken wird zunehmend die Weiterentwicklung von Key Performance Indikatoren (KPI) bzw. Kennzahlen diskutiert. Leistungsindikatoren (Performance Indikatoren) messen diverse, für die Leistungsbeurteilung eines Ingenieurbauwerks maßgebende Eigenschaften. Sie können hierarchisch aufgebaut werden und jene auf der obersten Hierarchieebene werden als Schlüsselindikatoren bezeichnet (KPI). Die Schlüsselindikatoren zeigen, ob ein Bauwerk die Leistungsziele erfüllt.

Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Einführung eines Kennzahlensystems besteht einerseits in der Verknüpfung von Zielen mit Indikatoren sowie deren hierarchischer Aufbau untereinander. Andererseits gilt es, den Erfüllungsgrad der definierten Leistungsziele möglichst mit quantitativen Indikatoren zu ermitteln bzw. zu bewerten. Daher ist bei der Auswahl geeigneter Kennzahlen innerhalb des Lebenszyklusmanagements stets deren Verwendungszweck zu hinterfragen, gemäß folgendem Leitsatz:

“You can have all the indicators you want, but sooner or later you have to think about it.”
(Main Roads Western Australia, 2004)

Hierbei sind auch die vorhandenen Datengrundlagen zu analysieren sowie innovative Erfassungs- und Bewertungsmethoden in den Entscheidungsprozess zu integrieren. Dies bildet die Grundlage, um den optimalen Zeitpunkt von Erhaltungsmaßnahmen, den damit verbundenen Bedarf an die finanziellen und personellen Ressourcen frühzeitig abzuschätzen sowie die langfristigen Kosten zu senken.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird eine Systematik und darauf basierend eine fachliche Konzeption für die Erstellung eines indikatorengestützten Lebenszyklusmanagementtools erarbeitet, das die bestehenden Ansätze des Verkehrsinfrastrukturmanagements unterstützt und somit eine verbesserte Nutzung der vorhandenen Ressourcen ermöglicht.

Dazu erfolgt zunächst eine Zusammenstellung der wesentlichen Grundlagen des Lebenszyklusmanagements von Bauwerken bei dem ein Schwerpunkt auf den aktuellen Entwicklungen zu innovativen Techniken der Zustandserfassung gelegt wird. Es wird anschließend der aktuelle Stand zum Einsatz von Indikatoren bei den drei Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasser erörtert. Die hierzu durchgeführten Literaturrecherchen wurden durch Experteninterviews und die Durchführung eines Workshops mit Infrastrukturbetreibern ergänzt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgte schließlich die Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Konzeption eines verkehrsträgerübergreifenden LZM-Tools. Als Ausgangslage wurde hierbei eine von der Bundesanstalt für Straßenwesen zur Verfügung gestellte Indikatorenliste verwendet und weiterentwickelt. Das entwickelte Kennzahlensystem beinhaltet die Schlüsselindikatoren Zuverlässigkeit, Sicherheit der Nutzer und Dritter, Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit. Die Methodik verfügt über einen modularen Aufbau, sodass durch den Austausch von einzelnen Teilmodellen verkehrsträgerspezifische Anforderungen an das Modell jederzeit berücksichtigt werden können. Die Erprobung des entwickelten Kennzahlensystems innerhalb eines Lebenszyklusmanagements wird schließlich im Rahmen einer prototypischen Anwendung exemplarisch getestet. Dazu werden

die vorhandenen Datengrundlagen von ausgewählten Ingenieurbauwerken zunächst aufbereitet und in den IT-Prototypen integriert. Unter Berücksichtigung von vorhandenen Bauwerksschäden erfolgt die Beurteilung der Zuverlässigkeit der Bauwerke auf Objekt- und Netzebene mit Hilfe eines bayes'schen Ansatzes. In Abhängigkeit der Schadensart wird zudem die Sicherheit der Bauwerke für die Nutzer sowie Dritte bewertet. Die Bewertung der Verfügbarkeit erfolgt anhand von zusätzlichen Reisezeiten, die durch die vom Anwender zu definierenden Erhaltungsmaßnahmen hervorgerufen werden. Der Aspekt der Nachhaltigkeit wird sowohl auf Objekt- als auch auf Netzebene ermittelt. Auf der Objektebene werden die in Abhängigkeit der Maßnahmenart zu erwartenden CO₂-Emissionen ermittelt. Auf der Netzebene hingegen erfolgt die Berechnung der zusätzlichen CO₂-Emissionen anhand der zusätzlichen Reisewege aufgrund von Umleitungen in Abhängigkeit der Verkehrsmengen und -zusammensetzung. Die wirtschaftlichen Kosten berechnen sich schließlich aus der Summe der diskontierten Einzelkosten der gewählten Maßnahmenarten innerhalb eines Erhaltungsszenarios.

Aufgrund der Modularität des entwickelten IT-Tools kann eine stetige Weiterentwicklung bzw. Erweiterung des Kennzahlensystems erfolgen und weitere verkehrsträgerspezifische Anforderungen kontinuierlich ergänzt werden. Damit ist die Grundlage für ein zukünftiges indikatorengestütztes verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken geschaffen.

Future development of an indicator-based life cycle management of infrastructure structures across all modes of transport

The further development of key performance indicators (KPI) is increasingly being discussed for the description of condition and the assessment of target fulfilment. Performance indicators measure various properties that are decisive for the performance assessment of an engineering structure. They can be structured hierarchically and those at the top level of the hierarchy are called key performance indicators (KPI). The key performance indicators show whether a structure meets the performance targets.

One of the main challenges in introducing a performance indicator system is, on the one hand, the linking of objectives with indicators and their hierarchical structure. On the other hand, it is important to determine and evaluate the degree of fulfilment of the defined performance targets with quantitative indicators. Therefore, when selecting suitable indicators within life cycle management, their intended use must always be questioned, in accordance with the following guiding principle:

“You can have all the indicators you want, but sooner or later you have to think about it.”
(Main Roads Western Australia, 2004)

In this context, the existing data basis must be analysed, and innovative recording and evaluation methods must be integrated into the decision-making process. This forms the basis for estimating the optimal timing of maintenance measures and the associated need for financial and human resources at an early stage, as well as for reducing long-term costs.

Within the framework of this research project, a system and, based on this, a technical concept for the creation of an indicator-supported life cycle management tool will be developed, which supports the existing approaches of transport infrastructure

management and thus enables an improved use of the available resources.

First, a summary of the essential basics of life cycle management of structures is given, with a focus on the current developments in innovative techniques of condition assessment. Subsequently, the current status of the use of indicators for the three transport modes road, rail and water is discussed. The literature research carried out for this purpose was supplemented by interviews with experts and the holding of a workshop with infrastructure operators. Based on these results, a methodology for the conception of a cross-modal LZM tool was developed and applied. As a starting point, a list of indicators provided by the Federal Highway Research Institute was used and further developed. The developed indicator system includes the key indicators reliability, safety of users and third parties, availability and sustainability. The methodology has a modular structure so that mode-specific requirements can be considered at any time by exchanging individual submodels. Finally, the testing of the developed key figure system within a life cycle management is exemplarily tested within the scope of a prototypical application. For this purpose, the existing data bases of selected engineering structures are first processed and integrated into the IT prototype. Considering existing structural damage, the reliability of the structures is assessed at the object and network level using a Bayesian approach. Depending on the type of damage, the safety of the structures for the users as well as third parties is also evaluated. The evaluation of availability is based on additional travel times caused by the maintenance measures to be defined by the user. The aspect of sustainability is determined on the object level as well as on the network level. On the object level, the CO₂ emissions to be expected depending on the type of measure are determined. On the network level, on the other hand, the additional CO₂ emissions are calculated based on the additional travel routes due to detours, depending on the traffic volumes and composition. Finally, the economic costs are calculated from the sum of the individual discounted costs of the selected types of measures within a maintenance scenario.

Due to the modularity of the developed IT tool, a continuous further development or extension of the key figure system can be carried out and further traffic mode-specific requirements can be continuously added. This provides the basis for future indicator-based life cycle management of infrastructure structures across all modes of transport.

Summary

Future development of an indicator-based life cycle management of infrastructure structures across all modes of transport

An efficient and safe transport infrastructure forms the backbone of a modern society based on the division of labour. It enables the exchange of goods and people - by road, rail, or water - and is thus the essential prerequisite for social progress. The ageing infrastructure in Germany will continue to require considerable maintenance measures in the coming years. At the same time, the traffic demand is constantly growing. Planning, construction, operation, and maintenance of assets along these transport routes require a significant commitment of both economic and human resources. It is therefore essential to use the available resources in a prudent manner, considering all conceivable scenarios. This requires consideration of the entire life cycle for infrastructure assets to compare different maintenance options at an early stage and to determine the best maintenance option for each asset.

The aim of efficient life cycle management of infrastructure assets is to increase the service life and to optimise the necessary interventions in the traffic flow due to maintenance measures. The decision-making for the selection of maintenance scenarios should be information-driven, for which suitable key figures and indicators are required.

The aim of this research project was to develop a framework for a cross-modal life cycle management tool for transportation infrastructure. In doing so, it was also necessary to clarify which data are collected in the context of maintenance and structure inspection and how they are maintained.

Within the framework of international literature research, the first task was to compile and analyse the existing approaches to the life cycle management of transportation infrastructure. This was accompanied by the expansion and elaboration of an initially incomplete list of indicators provided by the BASt for the development of a performance indicator system. Furthermore, expert surveys were conducted both in the field of research and in practice in the three modes of transport to document the state of knowledge on the use of indicators in the context of life cycle management of infrastructure assets. During workshops with the interviewees and interested users, additional ideas and methodological approaches were discussed together.

Based on these results, a hierarchical and indicator-based key performance indicator system was developed across all modes of transport. This is based on the four key performance indicators (KPI) reliability, safety for users and third parties, availability, and sustainability. The quantitative evaluation of these KPIs is carried out with subordinate performance indicators. In the sense of economic analysis, the degree of fulfilment of the four KPIs is set in relation to the associated life cycle costs. A life cycle management tool (LZM tool) must be able to perform a variety of calculation steps (analysis of damage impacts on condition, condition prediction, etc.) based on the input data, which often provide time-related results. Therefore, it should be possible to evaluate, predict and map the KPI values over the entire life span. The suggested methodology has a modular structure, so that transport mode-specific requirements can be considered at any time by exchanging individual components of the model. Considering existing structural damages, the reliability of the structures is assessed first at an object level with the help of a Bayesian approach and later evaluated on the network level accounting for possible cases of singular or simultaneous asset failure. Depending on the type of damage, the

safety of the analysed assets for users and third parties is also assessed, based on the accident rates. The evaluation of availability is based on additional travel times caused by the disruptions in a network due to user-defined maintenance measures. The aspect of sustainability is determined both at the object level and at the network level. At the object level, the CO₂ emissions to be expected depending on the type of measure are determined. On the network level, the additional CO₂ emissions are calculated based on the additional travel routes due to diversions depending on the traffic volumes and composition. Finally, the economic costs are calculated from the sum of the individual costs of the selected types of measures within a maintenance strategy, using a user-defined discount rate.

The current assessment of the condition of infrastructure assets is mainly based on structural safety and serviceability, traffic safety and durability, which can be understood as key indicators. Although this system has proven itself very well in Germany, it has some deficits from today's perspective. For example, durability indicates the remaining service life, i.e., the point in time at which the criteria for structural safety and/or serviceability are no longer fulfilled. So, if the structural safety and serviceability are adopted as key indicators that change over time, there is no need for the indicator "durability".

The current state-of-the-art research at the national and international levels shows increasing importance of indicator-based assessment methods for infrastructure assets. The increasing demands on engineering structures require methods and concepts for efficient management. The diversity of requirements is reflected in a huge number of performance targets currently in use internationally. Regarding the future development and introduction of life cycle management, the link between performance targets and performance indicators is a challenge. Also, there are vast data requirements to define key indicators. It is apparent that in addition to the condition data collected during inspections, other data groups are of importance. For some key performance indicators, such as availability, a spatially and temporally close-meshed collection of data is recommended so it is advantageous to expand the already used procedures with monitoring data.

The literature research, as well as the performed survey among transportation infrastructure experts, show that the condition score is the most frequently used key indicator so far. It is used as a proxy for the probability of failure, but the associated hazard is not specified. The existing condition data are seen as the most important data basis for the planning of measures across all modes of transport. For the assessment of the condition of an engineering structure, approaches that consider "vulnerable zones" are partly available in the standards. However, except for condition and traffic data, it is often difficult to assign the data exactly to the individual engineering structures or the granularity of the data varies. For future development of an LZM tool, it became clear from the user dialogues and workshops that mostly simple indicators should be used to assess the KPI.

The feasibility of the developed concept for the development of an indicator-based life cycle management tool (LZM tool) was demonstrated by means of a web-based IT prototype. The prototype is envisioned as a decision support tool for infrastructure asset management. The LZM tool provides a quick overview of the evaluation criteria of the different types of structures and enables an indicator-based evaluation at any time within the life cycle of infrastructure assets. The interfaces to existing database systems of the various modes of transport, such as "SIB-Bauwerke", were considered. From the existing databases of engineering structures, the relevant data on road bridges were first processed and integrated into the IT prototype. The proposed framework within the LZM tool was

used to perform calculations both on the object level of individual assets as well as on the network level. The prototype enables comparison of different maintenance strategies over the entire life cycle of infrastructure assets. The modularity of the developed IT tool enables continuous development and extension of a performance indicator system so that future transport mode-specific requirements can be seamlessly added.

The developed methodology offers the basis for an improvement of transport infrastructure management - away from reactive and preventive measures towards a predictive, cognitive life cycle management.

Inhalt

Glossar	14
1 Einleitung	15
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	15
1.2 Ziele	16
1.3 Methodik und Lösungsansatz	17
1.4 Aufbau des Berichts	18
2 Grundlagen des Lebenszyklusmanagements von Bauwerken	20
2.1 Allgemeines	20
2.2 Lebenszyklusmanagement	20
2.2.1 Planung, Entwurf, Ausführung und Inbetriebnahme	21
2.2.2 Bauwerksprüfung/Inspektion	21
2.2.3 Maßnahmen der Instandhaltung und -setzung	22
2.2.4 Rückbau und Recycling der Baustoffe	22
2.3 Erhaltungsmanagement	23
2.4 Zieldefinition	25
2.5 Zustandserfassung: Verfahren der Datengewinnung und -verarbeitung	26
2.5.1 Konventionelle Verfahren – Stand der Technik	26
2.5.2 Innovative Verfahren – Stand der Forschung	30
2.5.3 Datenverarbeitung und Building Information Modeling (BIM)	33
2.6 Zustandsbewertung	35
2.6.1 Straße	35
2.6.2 Schiene	38
2.6.3 Wasserstraße	40
2.7 Zustandsprognose	40
2.8 Maßnahmenplanung	42
2.9 Wirkungsanalyse	43
2.10 Kapitelzusammenfassung	44

3 Indikatoren für ein Lebenszyklusmanagementtool 45

3.1	Allgemeines	45
3.2	Stand der Technik	45
3.2.1	Straße	45
3.2.2	Schiene	49
3.2.3	Wasserstraße	51
3.3	Nationaler Stand der Forschung	51
3.4	Internationaler Stand der Forschung	53
3.5	Kapitelzusammenfassung	56

4 Entwicklung eines Kennzahlensystems 58

4.1	Allgemeines	58
4.2	Begriffsdefinitionen	59
4.2.1	Leistungsziele	59
4.2.2	Schlüssel-Leistungsindikatoren	59
4.2.3	Leistungsindikatoren	59
4.2.4	Eigenschaften	60
4.2.5	Beobachtungen/Messungen/Befunde	60
4.2.6	Symptome	60
4.2.7	Schäden	60
4.2.8	Schadensprozesse	60
4.2.9	Einflussfaktoren	61
4.2.10	Bewertungen	61
4.2.11	Plötzliche Ereignisse	62
4.2.12	Gefährdete Bauteile (-bereiche)	62
4.2.13	Versagensarten	62
4.2.14	Arbeitsprogramm	62
4.2.15	Generalisierte Verbindung der Begriffe – eine Leistungsbewertung	62
4.3	Verknüpfung von Leistungszielen, -indikatoren und bauwerkspezifischen Indikatoren	64
4.4	Bestimmung von Leistungszielen bzw. Schlüsselindikatoren	65
4.4.1	Zuverlässigkeit	65
4.4.2	Sicherheit für Nutzer und Dritte	66
4.4.3	Verfügbarkeit	67
4.4.4	Nachhaltigkeit	68

4.4.5	Wirtschaftlichkeit	68
4.5	Integration in ein Lebenszyklusmanagement	69
4.6	Methodik zur Beurteilung der Zuverlässigkeit	71
4.7	Bewertung und Auswahl von relevanten Indikatoren	73
4.8	Kapitelzusammenfassung	75
5	Datengrundlage	76
5.1	Allgemeines	76
5.2	Methodik und Qualitätskriterien	76
5.3	Datengruppen	77
5.3.1	Inventardaten	77
5.3.2	Zustandsdaten	77
5.3.3	Verkehrsdaten	77
5.3.4	Unfalldaten	77
5.3.5	Umweltdaten	77
5.3.6	Daten zu Naturgefahren	78
5.4	Datenhaltung	78
5.4.1	Straße: SIB-Bauwerke	78
5.4.2	Schiene: SAP	79
5.4.3	Wasserstraße: WADABA, WSVPruf, SIB-Bauwerke, ELWIS	80
5.5	Bewertung der Datengrundlage	81
5.5.1	Inventardaten	81
5.5.2	Zustandsdaten	81
5.5.3	Verkehrsdaten	81
5.5.4	Unfalldaten	82
5.5.5	Umweltdaten	82
5.5.6	Daten zu Naturgefahren	82
5.6	Experteninterviews und -workshop	83
5.6.1	Experteninterviews	84
5.6.2	Expertenworkshop	84
5.6.3	Erkenntnisse und Empfehlungen	85
5.7	Kapitelzusammenfassung	86
6	Entwicklung eines IT-Prototyps	87
6.1	Allgemeines	87

6.2	Konzeption und Vorüberlegungen	87
6.2.1	Anforderungen	87
6.2.2	Indikatoren auf der Objekt- und Netzebene	87
6.2.3	Normierung und KPI Bewertung	88
6.3	Datengrundlage und -aufbereitung	89
6.3.1	Allgemeines	89
6.3.2	Datenquellen und Eingangsdaten	89
6.3.3	Modellierung eines Netzes	90
6.3.4	Datenmodell	91
6.4	Zuverlässigkeit	92
6.4.1	Allgemeines	92
6.4.2	Methodik zur Bewertung der KPI Zuverlässigkeit eines Bauwerks	93
6.4.3	Eingangsdaten, Zwischenergebnisse und Ergebnisse	94
6.4.4	Bewertung des KPI Zuverlässigkeit auf der Netzebene	98
6.5	Sicherheit für Nutzer und Dritte	98
6.5.1	Allgemeines	98
6.5.2	Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Sicherheit eines Bauwerks	99
6.5.3	Eingangsdaten, Zwischenergebnisse und Ergebnisse	99
6.5.4	Bewertung des KPI Sicherheit auf Netzebene	101
6.6	Maßnahmen	101
6.6.1	Allgemeines	101
6.6.2	Eingaben	102
6.6.3	Wirkung der Maßnahmen	102
6.7	Verfügbarkeit	103
6.7.1	Allgemeines	103
6.7.2	Methodik zur Bewertung der Verfügbarkeit einer Erhaltungsstrategie	103
6.7.3	Eingangsdaten, Zwischenergebnisse und Ergebnisse	104
6.8	Nachhaltigkeit	105
6.8.1	Allgemeines	105
6.8.2	Methodik zur Bewertung der Nachhaltigkeit einer Erhaltungsstrategie (Baustoffherstellung)	106
6.8.3	Methodik zur Bewertung der Nachhaltigkeit einer Erhaltungsstrategie (Umleitungstrecke)	108
6.9	Grafisches User Interface	110
6.9.1	Allgemeines	110
6.9.2	Grundfunktionen	110

6.9.3	Anlagedaten	110
6.9.4	Netzdaten	115
6.9.5	KPI Bewertung	118
6.10	Exemplarische Anwendung	121
6.10.1	Festlegen von Schäden	121
6.10.2	Festlegen von Maßnahmenszenarien	124
6.10.3	Festlegen von Erhaltungsstrategien	127
6.10.4	Festlegen von Normierungsparametern	128
6.10.5	Erhaltungsstrategien vergleichen	130
6.10.6	Berechnungseingaben Setup	131
6.11	Kapitelzusammenfassung	132
7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	134
7.1	Allgemeines	134
7.2	Zusammenfassung	135
7.3	Schlussfolgerungen	135
7.4	Empfehlungen und Ausblick	136
	Literatur	138
	Bilder	146
	Tabellen	150
	Anhang	152

Der Teil „a) Indikatorenliste“ des Anhangs zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter: <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

Glossar

AP	Arbeitspaket
BIM	Building Information Modeling
BMS	Bauwerks-Management-System
GPR	Ground Penetrating Radar
IS	Infrarotabtastung
KPI	Key Performance Indikator
LZM	Lebenszyklusmanagement
MCMC	Markov-Chain-Monte-Carlo
PI	Performance Indikator
SK	Schadensklasse
SN	Schweizer Norm
TLS	terrestrisches Laserscanning
UAV	Unmanned Air Vehicle
USV	Unmanned Submersible Vehicle
ZfP	zerstörungsfreie Prüfmethode
ZK	Zustandsklasse/Zustandskategorie
ZN	Zustandsnote

1 Einleitung

Um eine klare Vorstellung der Problemstellung und der Zielsetzung dieses Projekts zu schaffen, werden in diesem Kapitel, nach Beschreibung der Ausgangslage und der Problemstellung, die verfolgten Ziele vorgestellt. Anschließend wird die zur Zielerreichung angewendete methodische Vorgehensweise beschrieben und die Gliederung des Berichtes vorgestellt.

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

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

Die gesellschaftlichen Erwartungen sind schwierig zu definieren, da sie oft widersprüchlich sind. Was die Öffentlichkeit anbelangt sollen die Verkehrswege am besten

- keine oder sehr hohe Gewichtsbeschränkung für die Fahrzeuge,
- keine oder sehr hohe Geschwindigkeitsbeschränkung,
- ein unbeschränktes oder sehr großes Lichtraumprofil,
- eine uneingeschränkte oder sehr hohe Verfügbarkeit,
- absolute Sicherheit für Leib und Leben für alle Verkehrsteilnehmer,
- keinen oder minimalen Lärm und
- eine tadellose, ansprechende visuelle Erscheinung

aufweisen und ihr Betrieb und Unterhalt soll so wenig wie möglich kosten. Diese unterschiedlichen teilweise widersprüchlichen Erwartungen werden in einem politischen Prozess aufgelöst. Schließlich sind diverse Anspruchsgruppen, welche den obigen Erwartungen zum Durchbruch verhelfen wollen, meistens durch Politiker vertreten. Die Suche nach einem Gleichgewicht zwischen den oben aufgelisteten Erwartungen und den verfügbaren finanziellen Mittel ist in der Regel schwierig und kaum objektiv. Die Langlebigkeit der Verkehrsinfrastruktur verleitet dazu Sparmaßnahmen einzuleiten, welche deren Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit und/oder Funktionsfähigkeit mittel bis langfristig gefährden. Katastrophale Ereignisse wie z. B. Tunnelbrände oder Felsstürze mit Toten und Verletzten lösen hingegen viele, teilweise unnötige Maßnahmen zur Beseitigung von tatsächlichen oder angeblichen Sicherheitsdefiziten aus. Der Volatilität der Verkehrsinfrastruktur begegnen die Infrastrukturbetreiber und professionelle Verbände mit Normen, Richtlinien, Handbüchern, Best Practices, usw. Diese Dokumente definieren implizit oder explizit Leistungsziele (Performance Goals), welche ein optimales Gleichgewicht zwischen den Erwartungen und den verfügbaren finanziellen Mitteln sicherstellen sollen.

In Bezug auf Bauwerke definieren diese Dokumente

- maximales Gewicht der Straßenfahrzeuge bzw. deren Achslasten
- maximale Geschwindigkeit
- Lichtraumprofil
- maximal erlaubte Todes- bzw. Verletzungsrate
- zulässiges Erscheinungsbild
- usw.

Die Leistungsindikatoren (Performance Indicators) messen diverse, für die Leistungsbeurteilung eines Bauwerks maßgebende Eigenschaften. Sie können hierarchisch aufgebaut werden und jene auf der obersten Hierarchieebene werden als Schlüsselindikatoren bezeichnet (Key Performance Indicators). Die Schlüsselindikatoren zeigen, ob ein Bauwerk die Leistungsziele erfüllt. Liegt z. B. die zulässige Tragfähigkeit einer Brücke unter dem maximalen Gewicht der Straßenfahrzeuge, so erfüllt die betreffende Brücke die Leistungsziele nicht und ihr Befahren muss eingeschränkt werden. Alternativ kann eine Verstärkungsmaßnahme eingeleitet werden.

Beim Neubau kann man davon ausgehen, dass die Schlüsselindikatoren die Leistungsziele problemlos erfüllen. Der Verfall von Bauwerken durch physikalisch-chemische Prozesse kann einerseits die Leistungsindikatoren allmählich dahingehend verändern, dass sie die Leistungsziele nicht mehr erfüllen. Andererseits kann die Verkehrszunahme oder neue Erkenntnisse in Bezug auf die plötzlichen Ereignisse (z. B. Naturgefahren) zur Anpassung der Leistungsziele führen, so dass die Leistungsindikatoren eines Bauwerks sie nicht mehr erfüllen. Ein wachsamer Betreiber kann diese Szenarien rechtzeitig erkennen und vorbeugend, d. h. noch bei der Einhaltung von Leistungszielen, Gegenmaßnahmen planen und einleiten. In der Regel können dadurch – je nach verfügbaren finanziellen Mitteln – die Gesamtkosten, d. h. Betreiber-, Benutzerkosten und Kosten Dritte, optimiert werden.

Die zentrale Aufgabe der Erhaltungsplanung besteht darin, die optimale Erhaltungsmaßnahme bzw. die optimale Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen für ein Bauwerk oder für ein Bauwerksinventar zu finden. In diesem Zusammenhang ist die Bauwerksprüfung das Schlüsselement der Erhaltungsplanung, deren Aufgabe primär darin besteht, die Schlüsselindikatoren zu bestimmen und deren zeitliche Entwicklung zu prognostizieren.

Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Einführung eines Kennzahlensystems besteht einerseits in der Verknüpfung von Zielen mit Indikatoren sowie deren hierarchischer Aufbau untereinander. Andererseits gilt es, den Erfüllungsgrad der definierten Leistungsziele möglichst mit quantitativen Indikatoren zu ermitteln bzw. zu bewerten. Daher ist bei der Auswahl geeigneter Kennzahlen innerhalb des Lebenszyklusmanagements stets deren Verwendungszweck zu hinterfragen, gemäß folgendem Leitsatz:

"You can have all the indicators you want, but sooner or later you have to think about it."
(Main Roads Western Australia, 2004)

1.2 Ziele

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens ist die Konzeption einer Methodik für die zukünftige Entwicklung eines Tools für ein indikatorgestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken. Der Nutzen der Ergebnisse des

Forschungsvorhabens ist die Verbesserung des Verkehrsinfrastrukturmanagements – weg von reaktiven und vorbeugenden Maßnahmen (GEHLEN et al., 2008) hin zu einem prädiktiv, kognitiven Lebenszyklusmanagement. Durch eine verkehrsträgerübergreifende Betrachtung bzw. Bearbeitung der Aufgabenstellung sollen hierbei Synergien genutzt werden, die zur Einsparung von Ressourcen und zur Steigerung von Kapazitäten führen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, auf der Grundlage einer internationalen Literaturstudie, auf Basis von Expertenbefragungen im Rahmen von Workshops und anhand der vorhandenen Datengrundlagen der drei Verkehrsträger ein indikatorgestütztes Tool zu konzipieren, welches für ein zukünftiges Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken genutzt werden kann. Dazu soll zunächst eine Zusammenstellung bisher verwendeter Indikatoren erstellt bzw. fortgeführt werden. Hierbei sollen insbesondere auch die aktuellen Entwicklungen in Bezug auf neue Formen der Datengewinnung und -verarbeitung bei der Zustandserfassung von Ingenieurbauwerken Berücksichtigung finden. Auf Basis der Sichtung und Bewertung der verfügbaren Datengrundlagen soll schließlich ein IT-Prototyp entwickelt und exemplarisch auf Beispieldatensätzen angewendet werden.

Die Teilziele des Forschungsprojektes LZM-Tool können daher wie folgt zusammengefasst werden:

- Bewertung des Potenzials neuer Formen der Datengewinnung und -verarbeitung
- Analyse und Bewertung der vorhandenen Datengrundlagen
- Weiterentwicklung einer verkehrsträgerübergreifenden Indikatorenliste mit Schlüsselindikatoren (KPI)
- Verknüpfung von Leistungszielen, Leistungsindikatoren (Schlüsselindikatoren) und bauwerksspezifischen Indikatoren zu einem Kennzahlensystem
- Entwicklung eines IT-Prototypen und exemplarische Anwendung zur Nutzung innerhalb eines Lebenszyklusmanagements

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen schließlich ausgewertet und aufbereitet sowie dem Forschungsgeber Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise ausgesprochen werden.

1.3 Methodik und Lösungsansatz

Das Projekt gliedert sich in zwei Bearbeitungsphasen, die insgesamt in sieben Arbeitspakete (AP) unterteilt sind (vgl. Bild 1-1).

Die Bearbeitung der Aufgabenstellung erfolgt zunächst im Rahmen von Projektphase 1. Diese beinhaltet die Zusammenfassung der Grundlagen in Bezug auf den Einsatz von Indikatoren innerhalb des Lebenszyklusmanagements von Bauwerken. Dazu wird in AP 1 anhand einer internationalen Literaturrecherche, eigenen Erkenntnissen aus der Praxisanwendung und Experteninterviews mit den späteren Anwendern der vorgeschlagenen Methodik die Relevanz von Indikatoren beurteilt und mithilfe einer Liste systematisch strukturiert.

In AP 2 erfolgt die Entwicklung eines Kennzahlensystems, dass die verkehrsträgerübergreifenden Anforderungen erfüllt. Hierzu werden zunächst übergeordnete Key Performance Indikatoren (KPI) ermittelt. Weiterhin wird aufgezeigt, wie sich diese Kenngrößen mithilfe von Performance Indikatoren (PI) beschreiben lassen und wie sich deren zeitliche Entwicklung auf die Bewertung eines Bauwerks auswirkt.

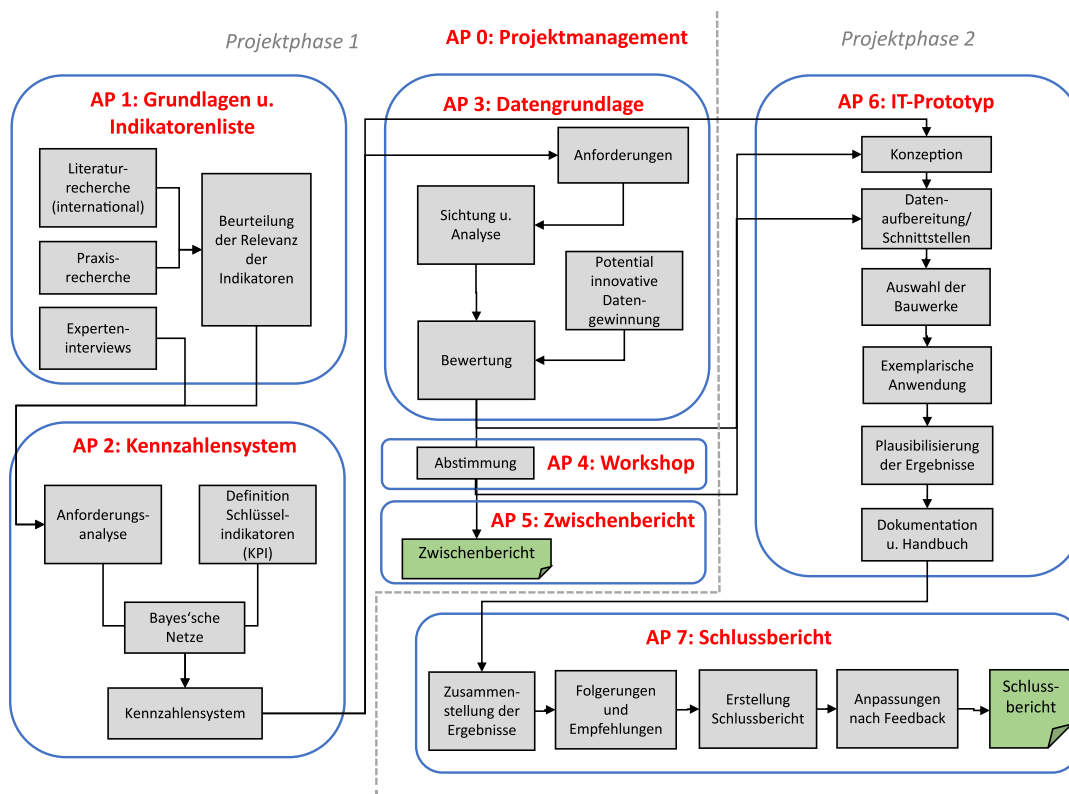


Bild 1-1: Methodische Vorgehensweise

Innerhalb des AP 3 wird die Datengrundlage der einzelnen Verkehrsträger in Bezug auf deren Verwendung innerhalb eines LZM-Tools analysiert. Dies inkludiert die Sichtung und Bewertung der verschiedenen Datenquellen und -gruppen je Verkehrsträger.

In Hinblick auf eine zukünftige Anwendung der Methodik in der Praxis werden die erarbeiteten Erkenntnisse aus den AP 1 bis 3 im Rahmen des AP 4 den Institutionen bzw. Infrastrukturbetreibenden präsentiert und diskutiert. Ziel des Workshops ist es, die vorgeschlagene Methodik des Projektes zu erörtern, die Ergebnisse der in AP 1 durchgeführten Experteninterviews vorzustellen sowie einen generellen Erfahrungsaustausch zum Einsatz von Indikatoren im Rahmen eines Lebenszyklusmanagements zu ermöglichen.

Die Projektphase 1 endet mit der Erstellung des Zwischenberichts (AP 5).

Innerhalb der Projektphase 2 erfolgt die Umsetzung der entwickelten Methodik innerhalb einer prototypischen Anwendung (AP 6). Die gewonnenen Erkenntnisse aus den prototypischen Anwendungsbeispielen werden schließlich zusammenfassend aufbereitet und diskutiert. Die Bearbeitung schließt mit der Zusammenstellung von Schlussfolgerungen sowie Handlungsempfehlungen, die mit der Erstellung des Schlussberichts verschriftlicht werden.

1.4 Aufbau des Berichts

Im Folgenden ist eine Übersicht zum Aufbau des Berichtes sowie der damit in Bezug stehenden methodischen Vorgehensweise zum Erreichen der genannten Zielsetzung dargestellt. Der Bericht gliedert sich in insgesamt sieben Kapitel, deren Inhalt im Folgenden zusammenfassend erläutert wird. Um die gesetzten Ziele erreichen zu können, bedarf es zunächst einer Darstellung der theoretischen und empirischen Erkenntnisse in Hinblick auf die Verwendung von Indikatoren im Rahmen eines Lebenszyklusmanagements. Dazu

werden in Kapitel 2 die Grundlagen des Lebenszyklusmanagements von Infrastrukturbauwerken erläutert. Eine ausführliche Darstellung der bisherigen Erkenntnisse auf internationaler Ebene zu Indikatoren für ein Lebenszyklusmanagement wird in Kapitel 3 gegeben. Dazu wird ein Überblick zum Stand der Technik auf nationaler und internationaler Ebene gegeben sowie der Stand der Forschung erläutert. In Kapitel 4 erfolgt schließlich die Entwicklung eines Kennzahlensystems. Hierzu wird die dafür angewendete Methodik vorgestellt und angewendet. Im Anschluss daran werden in Kapitel 5 die vorhandenen Datengrundlagen der Infrastrukturbetreiber analysiert und in Hinblick auf eine zukünftige Verwendung im Rahmen eines Lebenszyklusmanagements bewertet. Das entwickelte Kennzahlensystem wird schließlich in Kapitel 6 prototypisch umgesetzt. Dazu erfolgt die Entwicklung eines webbasierten IT-Prototyps. Den Abschluss des Berichtes bildet Kapitel 7 mit einer Schlussbetrachtung, in der die wesentlichen Schlussfolgerungen und Empfehlungen zusammengefasst werden. Die Struktur des Berichtes ist in Bild 1-2 zusammenfassend skizziert.

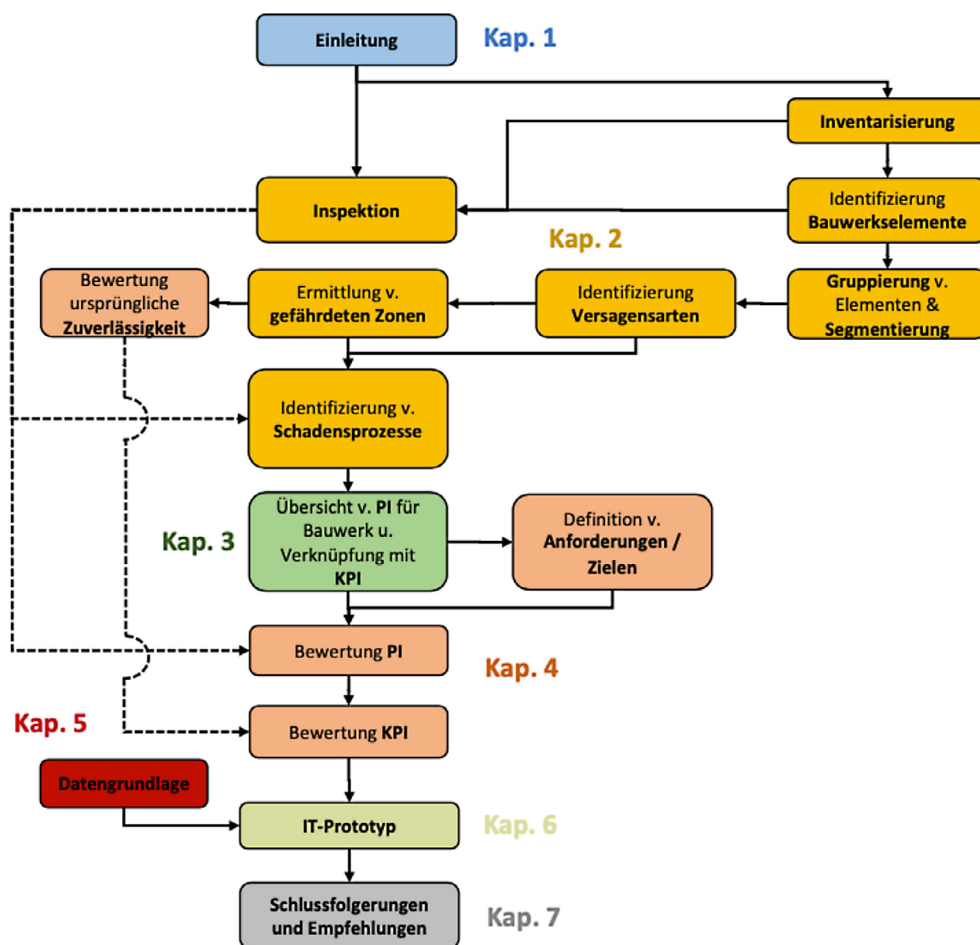


Bild 1-2: Übersicht zur Struktur des Forschungsberichtes

2 Grundlagen des Lebenszyklusmanagements von Bauwerken

2.1 Allgemeines

Im Folgenden werden wesentliche Trends und die relevantesten Beiträge in den Bereichen

- Lebenszyklusmanagement (Kapitel 2.2)
- Erhaltungsmanagement (Kapitel 2.3)
- Zieldefinition (Kapitel 2.4)
- Zustandserfassung: Verfahren der Datengewinnung und -verarbeitung (Kapitel 2.5)
- Zustandsbewertung (Kapitel 2.6)
- Zustandsprognose (Kapitel 2.7)
- Maßnahmenplanung (Kapitel 2.8)
- Wirkungsanalyse (Kapitel 2.9)

mit Bezug zu Infrastrukturbauwerken vorgestellt, welche nach unserer Auffassung im Rahmen eines Lebenszyklusmanagementtools vielversprechend sind und im Projekt vertieft analysiert werden sollen.

2.2 Lebenszyklusmanagement

Unter dem Begriff Lebenszyklusmanagement wird der Transformationsprozess eines Infrastrukturbauwerkes innerhalb der Lebensphasen Planung, Ausführung, Instandhaltung bzw. -setzung, Rückbau und Recycling verstanden. In Anlehnung an PELZETER (2017) sowie LEBHARDT, SEILER, GERDES, BOMBECK, LENNERTS (2020) lässt sich der Begriff Lebenszyklusmanagement als

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit mit dem Ziel einer lebenszyklusphasen-übergreifenden Nutzungs-, Ressourcen- und Informations-Optimierung“ (S. 15) definieren.

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

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

Für den Infrastrukturbetreiber ist daher von Relevanz, die Gesamtkosten zu ermitteln, die ein bestimmtes Bauwerk über alle Lebensphasen generiert (LÜKING, SCHNEIDER, HAFEN, ALBRECHT 2014), um ein zu definierendes Maß der konkurrierenden Zielkriterien zu erfüllen. Damit einhergehend bedient man sich sogenannter Bauwerksmanagementsysteme,

um mithilfe der vorhandenen Finanzmittel den netzweiten Erhalt dieser Bauwerke über den gesamten Lebenszyklus zu managen. Der Lebenszyklus von Infrastrukturbauwerken umfasst die Phasen der Planung, Ausführung, Inbetriebnahme, Instandhaltung bzw. -setzung bis hin zum Rückbau und Recycling der Baustoffe (GEHLEN, MAYER, SCHIEBL 2008).

2.2.1 Planung, Entwurf, Ausführung und Inbetriebnahme

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

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

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

2.2.2 Bauwerksprüfung / Inspektion

Nach Inbetriebnahme eines Infrastrukturbauwerks werden im Rahmen eines langfristigen Überwachungsprozesses als Teil des Erhaltungsmanagements regelmäßig Inspektionen durchgeführt, die Rückschlüsse auf den Zustand des Bauwerks ermöglichen. Die Beurteilung des aktuellen Zustandes erfolgt zumeist anhand von Informationen aus Bauwerksuntersuchungen. Die hierbei erhobenen Daten müssen in Hinblick auf die Erreichung von zuvor definierten Zielen, wie z. B. eine ausreichende Standsicherheit und Funktionalität der

Bauwerke, mithilfe von geeigneten Kennzahlen bewertet werden. Der Begriff Bauwerksprüfung wird für Bauwerke oft als Synonym für die Inspektion verwendet. Zur Feststellung von Leistungsindikatoren können auch Messungen, zerstörungsfreie und zerstörungsarme Untersuchungen vorgenommen werden.

Die Kenntnis zum derzeitigen als auch zum zukünftigen Bauwerkszustand ist für die Auswahl von Maßnahmen der Instandhaltung bzw. -setzung von entscheidender Bedeutung. Auf Basis dieser beiden Informationen sowie weiterer Randbedingungen werden schließlich Entscheidungen zu Art, Umfang und Zeitpunkt von Erhaltungsmaßnahmen getroffen (vgl. Kapitel 2.8).

2.2.3 Maßnahmen der Instandhaltung und -setzung

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

2.2.4 Rückbau und Recycling der Baustoffe

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

In Bild 2-1 sind zusammenfassend die wesentlichen Prozesse innerhalb des Lebenszyklusmanagements beschrieben und in Anlehnung an HAJDIN (2016) aufgezeigt, zu welchen Zeitpunkten Daten bzw. Informationen zu den Bauwerken erhoben werden.

Eine zentrale Komponente des Lebenszyklusmanagements sind Prognosemodelle, welche zur Bestimmung von künftigen Werten der Schlüsselindikatoren verwendet werden (vgl. Kapitel 2.7). Der zeitliche Verlauf von Schlüsselindikatoren hängt von vielen Faktoren ab, welche sich auch mit Monitoringanwendungen messen lassen (vgl. Kapitel 2.5). Es ist naheliegend, dass für ein zielgerichtetes und effizientes Lebenszyklusmanagement die Kenntnisse zu den Einwirkungen, welche die Straßeninfrastruktur kurz- oder langfristig nachteilig beeinflussen könnten, notwendig sind.

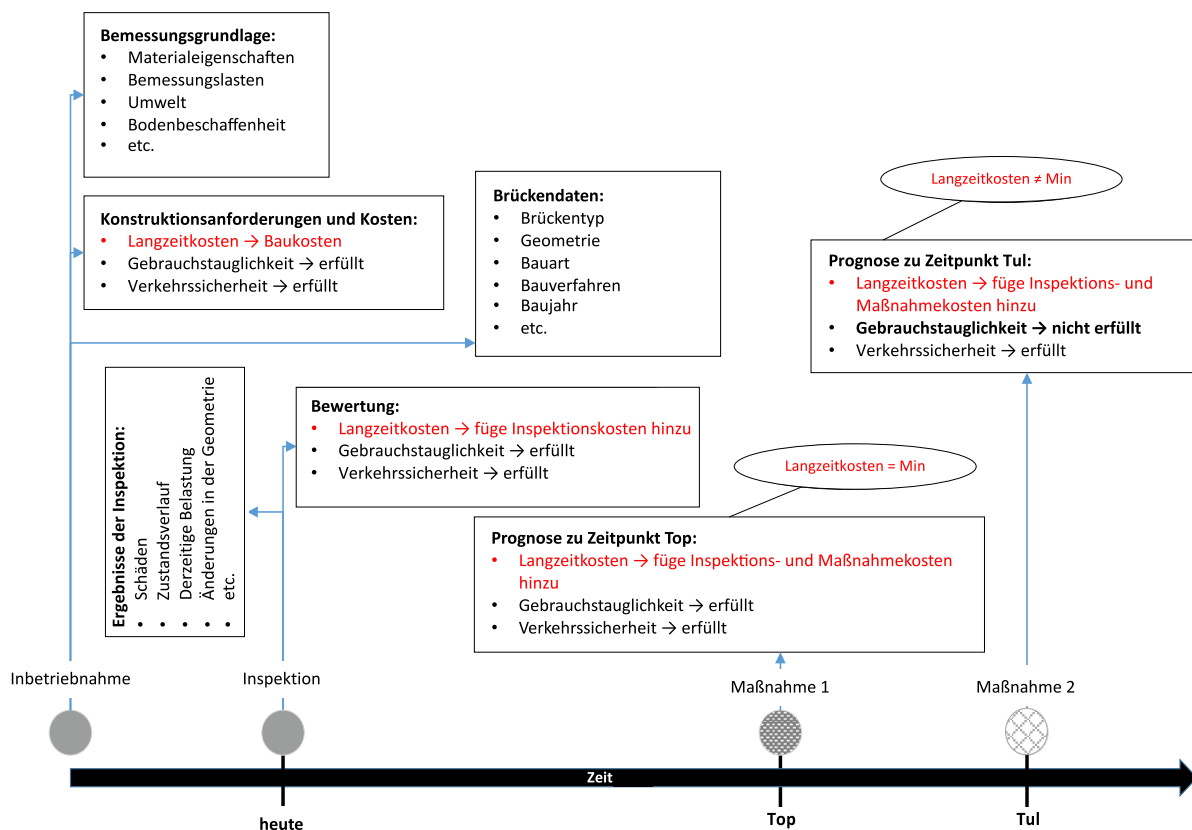


Bild 2-1: Grundsätzlicher Ansatz zur mittel- bis langfristigen Planung von Erhaltungsmaßnahmen innerhalb eines Lebenszyklusmanagements für Infrastrukturbauwerke

2.3 Erhaltungsmanagement

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

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

Das Erhaltungsmanagement wird in einen strategischen und operativen Teil gegliedert. Dies steht im Einklang mit der Asset Management Definition gemäss ISO 55000. Adaptiert man dies für eine Darstellung eines Lebenszyklusmanagements, werden im Rahmen eines strategischen Infrastrukturmanagements jeweils für die Netzplanung, das Betrieb- und Verkehrsmanagement sowie das Erhaltungsmanagement, und weiterführend für das Projektmanagement, Leistungsziele und eine übergeordnete Strategie definiert. Zusätzlich werden die Geschäftsprozesse festgelegt, angepasst und kommuniziert (vgl. Bild 2-2).

Das in Bild 2-2 dargestellte Erhaltungsmanagement verläuft zyklisch im Rahmen einer rollenden Planung und ist unterteilt in die Überwachung, die Erhaltungsplanung, die begleitende Stellungnahme zu den ausgelösten Projekten im Projektmanagement und die

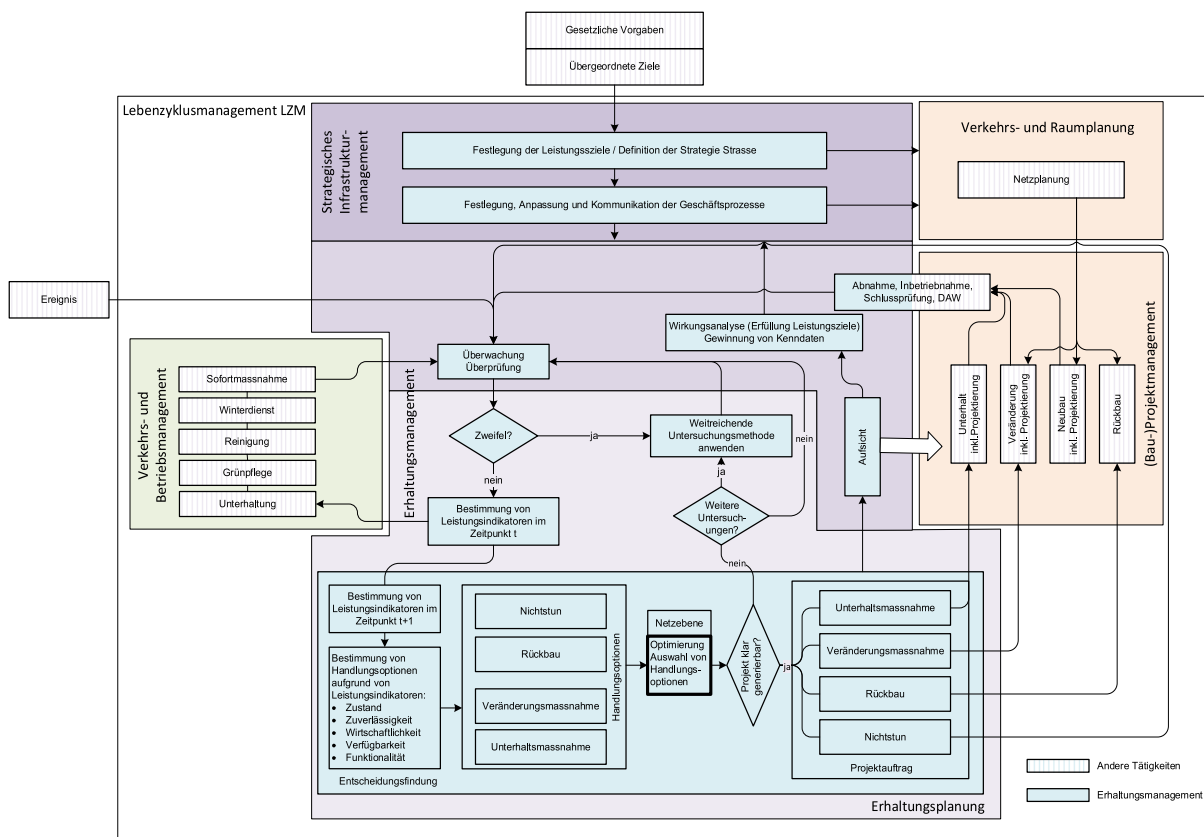


Bild 2-2: Prozesse eines systematischen Lebenszyklusmanagements

Wirkungsanalyse. Bei dieser Wirkungsanalyse erfolgt eine Analyse von angestrebten und erreichten Leistungszielen. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen fließen wieder in die Anpassung von Strategie und Leistungszieldefinition ein (vgl. Kapitel 4). Zusätzlich werden auch die Prozessabläufe analysiert und Schlussfolgerungen für notwendige Anpassungen gezogen.

Bei der Erhaltungsplanung erfolgt auf der Grundlage der vorhandenen Daten aus der Überwachung eine Analyse und Bewertung. Es werden hierbei die relevanten Leistungsindikatoren zu einem Zeitpunkt t bestimmt. Für eine Entscheidungsfindung auf der Grundlage von Analysen über langfristige Betrachtungszeiträume, z. B. sogenannte Lebenszykluskostenanalysen, ist es notwendig diese Leistungsindikatoren auch zu einem Zeitpunkt $t+x$ zu ermitteln. Hierfür werden Prognosemodelle benötigt (vgl. Kapitel 6), welche eine Ermittlung des Erhaltungsbedarfs auf der Grundlage der relevanten Leistungsindikatoren ermöglichen. Zudem können die Konsequenzen von Erhaltungsmaßnahmen; wenn diese für die relevanten Leistungsindikatoren bekannt sind; zu unterschiedlichen Zeitpunkten an jedem Infrastrukturobjekt der Teilsysteme zur Ermittlung von Handlungsoptionen im Rahmen von Szenariensimulationen aufgezeigt werden. Im Anschluss erfolgt auf der Basis der ermittelten Handlungsoptionen aller relevanten Teilsysteme eine übergeordnete Optimierung bzw. Koordinierung auf Netzebene. Ist aus den vorhandenen Informationen am Ende dieses Teilschritts ein Projekt generierbar, erfolgt die Formulierung eines Projektauftrags für das Projektmanagement oder die Entscheidung nichts zu tun, d. h. keine Erhaltungsmaßnahme durchzuführen. Sind die vorhandenen Informationen am Ende dieses Teilschritts für die Projektgenerierung nicht ausreichend, müssen weitere Daten, z. B. durch weitreichende Untersuchungsmethoden, beschafft werden. Dieser generische Prozesskreislauf gilt für alle Teilsysteme der Straßeninfrastruktur, welche im Detail eigene fachspezifische Teilprozesse und Datenstrukturen besitzen.

2.4 Zieldefinition

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

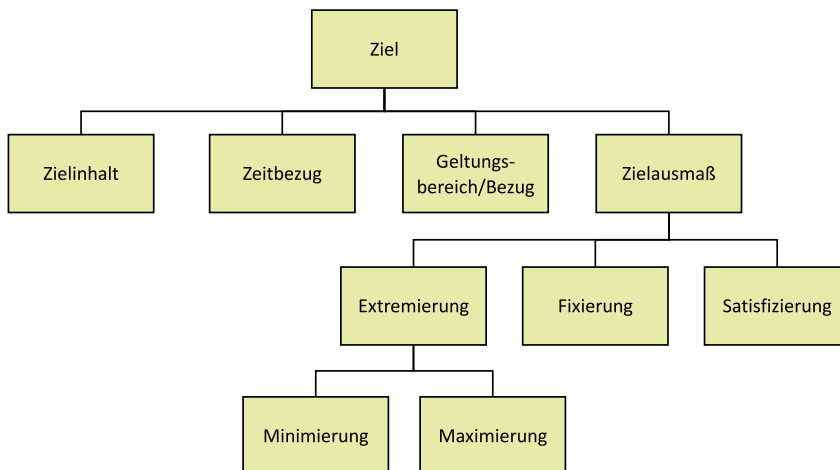


Bild 2-3: Vollständige Zielformulierung

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

Normen, Richtlinien, Handbücher und Best Practices definieren implizit oder explizit Leistungsziele (Performance Goals), welche ein Gleichgewicht zwischen den Erwartungen und den verfügbaren finanziellen Mitteln sicherstellen sollen. Sie sind als benutzer- bzw. gesellschaftsorientiert definiert. In der Literatur werden diese Leistungsziele oft als übergeordnete oder strategische Leistungsziele definiert. Demgegenüber stehen die Leistungsziele auf der Ebene der einzelnen Bauwerke oder Bauwerksteile. Die größte Herausforderung im Erhaltungsmanagement von Infrastrukturanlagen besteht darin, die strategischen

Leistungsziele mit jenen auf der Bauwerksebene rational zu verknüpfen. Dies gestaltet sich in der Regel sehr schwierig, so dass oft auf qualitative Leistungsziele bzw. auf zugehörige ebenfalls qualitative Leistungsindikatoren zurückgegriffen werden muss (HAJDIN 2016).

2.5 Zustandserfassung: Verfahren der Datengewinnung und -verarbeitung

Daten bilden die Grundlage innerhalb eines Lebenszyklusmanagement- bzw. Bauwerks-Management-Systems. Diese Daten entstammen aus unterschiedlichsten Datenquellen und Erhebungsformen. Ziel ist es, die erhobenen Daten systematisch zu speichern und miteinander räumlich und zeitlich miteinander zu verknüpfen. Diese werden im Anschluss als wichtige Informationen innerhalb des Lebenszyklusmanagementprozesses genutzt, um den Erhaltungsbedarf abzuschätzen bzw. Bauprogramme zu entwickeln.

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

- qualitative (z. B. (TRB 2014, ITCR 2012, PIEVC 2011, Transit New Zealand 2004, British Waterways Direction 2008, HOLLAND 2014)),
- hybride (z. B. (CAN/CSA-Q850-97 2002, Florida DOT 2013, US Army Corps of Engineers 2014)) und
- quantitative (z. B. (JCSS Joint Committee on Structural Safety 2008, LoBEG 2011, Transport for London 2011, WESLEY 2012, US Army Corps of Engineers 2014, State Emergency management Committee 2014, Transit New Zealand 2004, Bundesamt für Strassen 2014, BASt 2014, Bundesamt für Strassen 2016))

Methoden eingeteilt werden.

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik sowie innovative Verfahren zur Prüfung von Bauwerken vorgestellt.

2.5.1 Konventionelle Verfahren – Stand der Technik

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

Die RI-ERH-ING (BMVI 2017a), die Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten, enthalten die wesentlichen Richtlinien zu den Bauwerksprüfungen (RI-EBW-PRÜF (BMVI 2017b)), der Planung der Bauwerkserhaltung (RPE-ING), zur objektbezogenen Schadensanalyse (OSA), zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (RI-WI-BRÜ) sowie zur Erhaltung des Korrosionsschutzes von Stahlbauten (RI-ERH-KOR). Für die Prüfung von Ingenieurbauwerken ist insbesondere die RI-EBW-PRÜF, die Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 von Interesse. In dieser Richtlinie ist beschrieben, wie

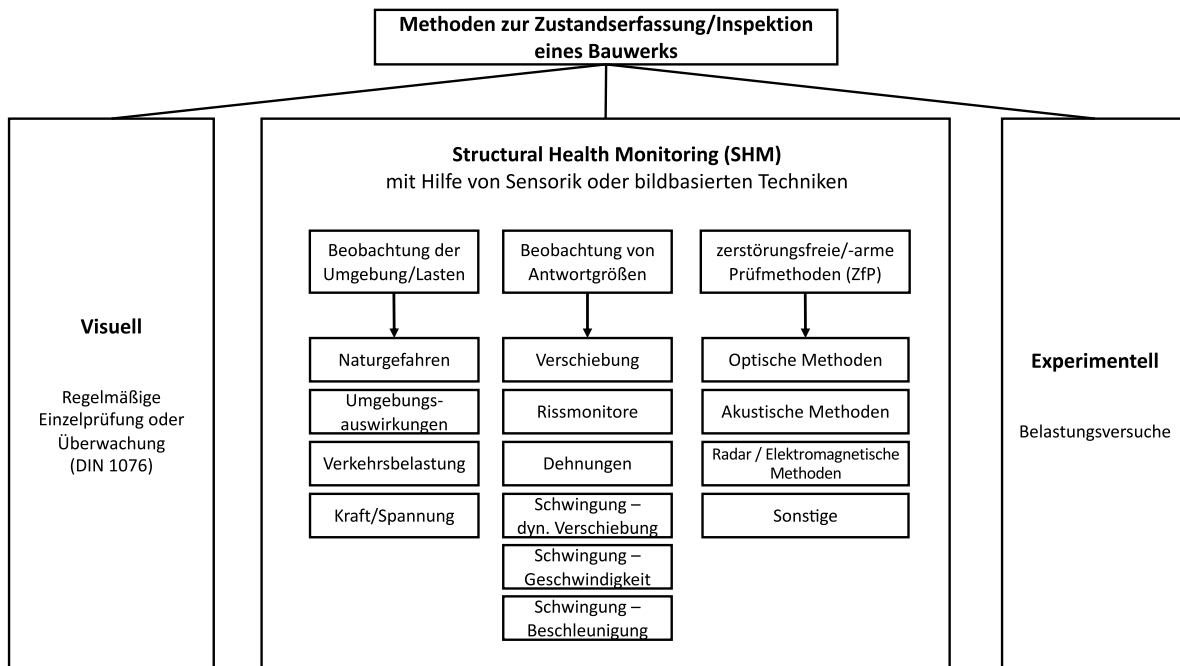


Bild 2-4: Überblick zu Verfahren zur Zustandserfassung eines Bauwerks

die am Bauwerk festgestellten Schäden standardisiert erfasst und bewertet werden sollen. Zusätzlich zur Richtlinie werden Beispiele von Schäden mit den entsprechenden Bewertungen in einer pdf-Datei (BMVI 2017c) gesammelt, um die Schadenserfassung weiter zu vereinheitlichen. Die, aus der Schadensaufnahme gewonnen Daten werden im Programmsystem SIB-Bauwerke erfasst, welches von Bund und Ländern entwickelt wurde. Für eine Bauwerksprüfung müssen die Bauwerksdaten gemäß der Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten (ASB-ING (BMVI 2018)) in SIB-Bauwerke bereits erfasst sein.

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

Nach KRIEGER (2020) sollten jedoch alle Informationen zur Beurteilung der Eigenschaften der Resilienz erfasst und für die weiteren Analyseprozesse geografisch referenziert bereitgestellt werden. Hierzu zählen auch die Verknüpfung und Bereitstellung von Informationen zu verkehrsträgerübergreifenden Wechselwirkungen (HAJDIN, SCHIFFMANN 2019), um einen noch besseren Überblick nicht nur über äußerlich sichtbare Veränderungen zu bekommen, sondern auch darüber, was sich im Inneren der Konstruktionen abspielt und später zu Schäden führen kann (HOLST 2018). Bild 2-4 gibt eine Übersicht zu den Verfahren zur Zustandserfassung eines Bauwerks.

Visuelle Zustandserfassung

Visuell durchgeführte Inspektionen, sog. handnahe Prüfungen gemäß DIN 1076 (vgl. z. B. BORRMANN, FISCHER, DORI, WILD 2014) sind – sofern sie von einem qualifizierten Statiker durchgeführt werden – kostengünstig und eine sehr wertvolle Informationsquelle. Während der Inspektion werden die Beobachtungen aufgezeichnet und ausgewertet. Das Ergebnis der Inspektion ist zunächst ein qualitativer Indikator. Diese Prüfungen werden in

regelmäßigen Abständen durchgeführt. Je nach Zustand werden die Inspektionszyklen angepasst, d. h. eventuell verkürzt.

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

- für das Brückenbauwerk mit bekannt schlechtem Zustand lag die Durchschnittsbewertung aller 49 Inspektoren zwischen 4,3 und 4,9 für die drei Bauteilgruppen. Die Standardabweichung bei den Zustandsbewertungen lag zwischen 0,76 und 0,94 für die drei Bauteilgruppen. Dies spiegelt sich in der Bandbreite der Bewertungen wider, bspw. variierte die Zustandsbewertung für das Brückendeck (vgl. Bild 2-5) von einem Minimum von 2 (kritisch) bis zu einem Maximum von 7.
- für das Brückenbauwerk in bekannt gutem Zustand (vgl. Bild 2-6) lag die durchschnittliche Bewertung für die Bauteilgruppen im Bereich von 6,7 bis 7,2. Die Standardabweichung für die Bauteilgruppen war mit 0,53 bis 0,66 deutlich geringer und der maximale Bereich für die Bewertung des Überbaus lag zwischen 5 und 8.

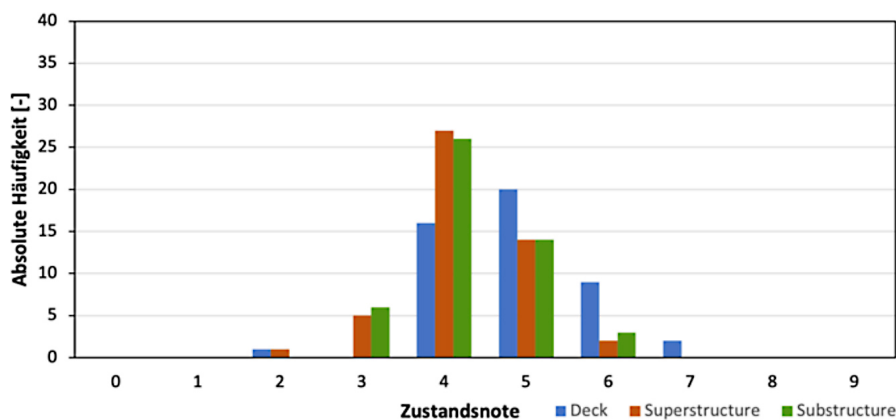


Bild 2-5: Ergebnisse der Zustandsbewertung einer Brücke in schlechtem Zustand

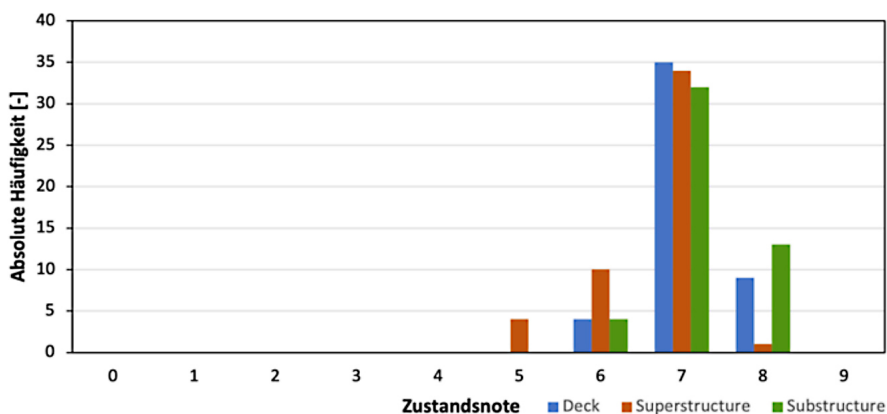


Bild 2-6: Ergebnisse der Zustandsbewertung einer Brücke in gutem Zustand

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

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

Messtechnische Zustandserfassung

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

In einer Studie von KUSAR et al. (2018) wurden zerstörungsfreie Methoden zur Zustandserfassung anhand von sechs Kriterien, u. a. Testdauer, Kosten, Status in Hinblick auf eine Normung des Testverfahrens, Zuverlässigkeit der Ergebnisse, Anwendungsvielfalt (z. B., ob der Test mehr als eine Art von Schäden messen kann) und Komplexität bei der Interpretation der Versuchsergebnisse, bewertet. Diese Kriterien wurden von einer Expertengruppe der COST-Aktion TU1406 bewertet und ein analytischer Hierarchieprozess verwendet, um die Ergebnisse zu quantifizieren und die Wirksamkeit der Verfahren zu bestimmen. Die Methoden wurden schließlich in die drei Kategorien zur Bestimmung von Materialeigenschaften, Schadenserkenntnis und Identifizierung von Korrosion eingeteilt (vgl. Tabelle 2-1).

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

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

Während die visuelle Bauwerksinspektion sowie die vorgestellten messtechnischen Methoden eine punktuelle Beschreibung des Zustands liefern, ermöglichen Monitoring-

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

Tab. 2-1: Beurteilung der Wirksamkeit von zerstörungsfreien Prüfmethode (KUSAR et al. 2018)

Methoden (vgl. Kapitel 2.5.2) eine kontinuierliche Beobachtung von Schädigungsprozessen. Je nach betrachtetem Schadensmerkmal besteht hierbei ein bisher wenig ausgeschöpftes Potenzial von Monitoringdaten.

Experimentelle Zustandserfassung

Das Zustandsverhalten von Bauteilen wird oftmals im Rahmen von experimentellen Untersuchungen im Labor unter kontrollierten Randbedingungen analysiert. Hierbei wird im Rahmen von experimentellen Untersuchungen der Einfluss einzelner Faktoren auf das mechanische und chemische Verhalten der Bauteile untersucht. Zu den wichtigsten Schädigungsprozessen zählen u. a. Karbonatisierung, Chlorideindringung, Bewehrungskorrosion, Spannungsrisskorrosion, Frost-Tausalz-Angriff, Alkali-Kieselsäure-Reaktion und Ermüdung (BORRMANN, FISCHER, DORI, WILD 2014; SCHELLENBACH-HELD, PEETERS, MIEDZINSKI 2015). Des Weiteren lassen sich anhand von experimentellen Untersuchungen neue Konstruktionsmethoden im Labor überprüfen (STUPPAK & MAURER 2018).

2.5.2 Innovative Verfahren – Stand der Forschung

Das vorherige Unterkapitel beinhaltet eine Übersicht zu den am häufigsten eingesetzten Methoden zur Schadenserkennung. Im Folgenden wird ein Überblick zu weiteren innovativen Verfahren gegeben, die derzeit im Rahmen aktueller Forschungsarbeiten entwickelt bzw. erprobt werden. Hierzu zählen u. a. unbemannte Luftfahrzeuge, UAV (Unmanned Air Vehicle)-Photogrammetrie, Laserscanning sowie die Kombination dieser, die vielversprechend erscheinen, um die bisherigen Bauwerksinspektionen zu ergänzen.

Des Weiteren bietet das Monitoring ein bisher wenig ausgeschöpftes Potenzial zur Unterstützung der Bauwerksprüfung. Damit verbunden ist der Wert der Information, welche aus Monitoringdaten gewonnen werden kann, zu analysieren. Die Wirtschaftlichkeit der Monitoringanwendungen wird unter diesem Aspekt geprüft. Dies bedeutet, sofern der Aufwand zur Beschaffung der weiteren Informationen bedeutend sein sollte, wird anhand des Ansatzes zum Wert der Information bestimmt ob dieser lohnenswert ist.

Laser Scanning und UAV Photogrammetrie

In Hinblick auf die Schwächen der visuellen Erfassungsmethoden wurden in den vergangenen Jahren neue Techniken aus dem Bereich des Laser Scannings und der Photogrammetrie für die Bauwerksinspektion entwickelt. Optische Sensoren lassen sich als entweder aktiv oder passiv klassifizieren. Aktive Sensoren emittieren Energie und zeichnen reflektierte Signale auf, um Tiefeninformationen zu liefern. Passive Sensoren nutzen hingegen das Umgebungslicht, um Informationen zu erfassen, die nachbearbeitet werden können (FATHI & BRILAKIS 2011).

Zu den aktiven Systemen zählt die Verwendung von terrestrischen Laserscannern (TLS) oder terrestrisches LiDAR (Light Detection And Ranging), Infrarotabtastung (IS) und Bildgebung mit Rot-Grün-Blau-Tiefe (RGB-D). Zu den passiven Ansätzen zählen z. B. die Nahbereichsphotogrammetrie (CRP) (POPESCU et al. 2019). ADHIKARI et al. (2013) stellten fest, dass 3D-Punktwolken Millionen von 3D-Punkten mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich umfassen können. Diese ermöglichen die Entwicklung von primitiven 3D-Modellen, die die Messung und grafische Darstellung von gescannten Objekten erleichtern (vgl. Bild 2-7 und Bild 2-8). Eine der ersten Anwendungen dieser Techniken erfolgte bei der Entwicklung von Geometriemodellen von historischen Bogenbrücken (vgl. LUBOWIECKA et al. 2009, TRUONG-HONG & LAEFER 2014).

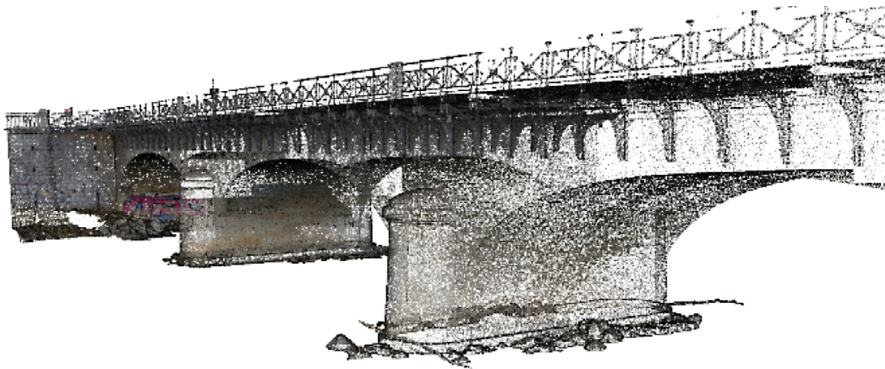


Bild 2-7: Mit LiDAR aufgenommene Punktwolke der historischen Bogenbrücke Pont de Carouge, Geneva, Schweiz



Bild 2-8: Photogrammetrische Rekonstruktion der historischen Bogenbrücke Pont de Carouge, Geneva, Schweiz

Das TLS-Verfahren wurde bereits auch zur Bestimmung der vertikalen Durchbiegungen unter Last von Brückenbauteilen verwendet. Weiterhin eignet sich das Verfahren zur Ermittlung von Abplatzungen und Rissen in Betonbauteilen (TRUONG-HONG et al. 2016) mit erkennbaren Rissbreiten, die dem Doppelten der Abtastrate entsprechen. Zu den Nachteilen zählen jedoch erhöhte Anschaffungskosten, ggf. Einschränkungen eines vollständi-

gen 3D-Scans aufgrund der Sichtlinie und die Notwendigkeit, den Scanner auf ebenem, stabilem Gelände aufzustellen.

Die Kombination aus Laserscanner und Photogrammetrie liefert Informationen, die typischerweise aus Inspektionen gewonnen werden. POPESCU et al. (2019) verglichen drei optische Methoden (TLS, CRP und IS) zur Erstellung von 3D-Brückenmodellen von sechs Eisenbahnbrücken in Schweden. Im Allgemeinen lieferten die mit TLS erstellten Modelle den höchsten Detailgrad, während die mit IS erstellten Modelle den niedrigsten lieferten. Die Hauptabmessungen, Spannweite, Höhe usw. wurden mit allen Methoden erfasst.

Space-borne Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR)

Die sog. Space-borne Synthetic Aperture Radar Interferometrie (InSAR) verwendet elektromagnetische Bilder der Erdoberfläche, die von Satelliten aus gesammelt werden, um relative Deformationen zu überwachen. Aufgrund anfänglicher Restriktionen bei der Auflösung, wurde diese Methode zunächst insbesondere für das Monitoring von großräumigen Prozessen wie Erdbeben und tektonischen Aktivitäten genutzt (COLESANTI & WASOWSKI 2006). Jüngste Entwicklungen ermöglichen es, dass die Auflösungen nun auch für die Überwachung von Infrastrukturen wie z. B. Brückenbauwerken geeignet sind.

MILILLO et al. (2019) stellten eine Methodik zur Interpretation von InSAR-Daten und die Anwendung eines Markov-Chain-Monte-Carlo (MCMC)-Ansatzes vor, um die Verformung vor dem Versagen des Polcevera-Viadukts in Italien zu bestimmen. Die mehrfeldrige Brücke, die 1966 eröffnet wurde, enthält A-förmige Rahmen (Pfeiler Nr. 9 bis 11). Bei einer 1993 durchgeführten Inspektion wurde eine Reihe von Mängeln festgestellt, darunter Schäden an der Oxidation der Metallmembran, die die Litzen von Pfeiler 11 schützt. An diesem Pfeiler wurden umfangreiche Sanierungsarbeiten durchgeführt, während der Austausch der Litzen für den Pfeiler 9 im Oktober 2018 beginnen sollte. Am 14. August 2018 versagte Pfeiler 9, was zum Einsturz eines 240 m langen Abschnitts der Brücke führte und 43 Todesopfer forderte. Die Sichtliniendaten von 2009 bis zum Versagen wurden mit einem MCMC-Ansatz verwendet, um 3D-Verschiebungsfelder an den Pfeilern 9-11 abzuleiten.

An allen Standorten nahmen die Verschiebungen linear mit der Zeit zu (mit Raten von typischerweise unter 10 mm/Jahr). Am Pfeiler 9 kam es im März 2017 jedoch zu einer Verzehnfachung der Verschiebungsrate. Die Studie zeigt, dass InSAR-Daten zwar nicht zwischen Spannungsakkumulation und Materialabbauprozessen unterscheiden können, dass sie aber zur Erkennung von Veränderungen im Verschiebungsverhalten oder von strukturellem Notstand von Brücken eingesetzt werden können.

Unmanned Marine Vehicles (UMVs)

Bathymetrisches LiDAR und die Methode der Mehrstrahlsondierung werden auf unbemannten Seefahrzeugen (UMVs) eingesetzt, um den Meeres-/Flussgrund zu vermessen. MURPHY et al. (2011) beschreiben den Einsatz des Sea-RAI Unmanned Submersible Vehicle (USV), um eine Inspektion des Brückenunterbaus nach dem Einsturz der Rollover-Pass-Brücke in Texas durchzuführen, die während des Hurrikans Ike im Jahr 2008 zusammenbrach. Die Vermessung des Bauwerks lieferte hochaufgelöste Bilder, die zeigten, dass um die vorhandenen Fundamente herum kein Kolk entstanden ist. CLUBLEY et al. (2015) kombinierten die Sonar- und Meereslasertechnologie für die Untersuchung eines Eisenbahnviadukts. Aufgrund eines erhöhten Risikos zur Kolkbildung wurde der Zustand der Brücke mithilfe von Tauchinspektionen alle vier bis sechs Jahre erfasst. Bei diesen Untersuchungen wurden keine Kolke an der Brücke oder nennenswerte Veränderungen des Flussbettprofils im Laufe der Zeit festgestellt. Im Gegensatz dazu identifizierte die Multibe-

am-Sonaruntersuchung erosive Kolke an den Brückenpfeilern, bei der die dunklen Bereiche das Vorhandensein von erosiven Kolkmerkmalen kennzeichnen.

Monitoring des Bauwerkszustands

Das Monitoring von (Teil-)Bauwerken ist eine geeignete Methode, die in Ergänzung zur traditionellen Bauwerksprüfung angewendet werden kann. Es umfasst die temporäre oder dauerhafte Überwachung und Bewertung eines Bauwerks hinsichtlich seiner strukturellen Zustände und deren Veränderung aufgrund von bestimmten Fragestellungen. Mithilfe eines Monitorings ist es möglich, den aktuellen Bauwerkszustand und dessen Entwicklung, das Langzeitverhalten eines Bauwerks, verschiedene Parameter, wie z. B. Kräfte, Verformungen, Dehnungen, Temperatur, Feuchte, Risse und Schwingungen, sowie die vorhandene Restnutzungsdauer abzuschätzen. Aufgrund der i. d. R. kontinuierlichen und in beliebigen Zeitabständen aufgenommenen Daten, eignet sich dieses Verfahren insbesondere für Bauwerke, deren Abschätzung der Zuverlässigkeit nur mit großen Unsicherheiten zu bestimmen ist. Durch den gezielten Einsatz eines Monitorings an ausgewählten Stellen des Bauwerks kann bspw. eine präzisere Schadensentwicklung erfolgen. In Bild 2-9 ist das Prinzip einer verdichteten Datenerfassung mithilfe eines Monitorings im Vergleich zur konventionellen Bauwerksprüfung schematisch dargestellt.

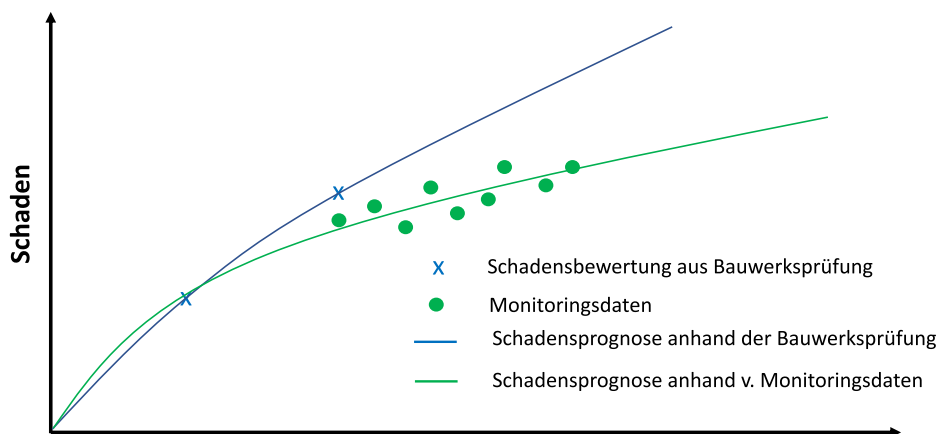


Bild 2-9: Beispielhafter Vergleich zwischen prognostiziertem Schadensverlauf anhand der Bauwerksinspektion und Monitoringdaten

Monitoringanwendungen kommen dementsprechend zum Einsatz, wenn eine Schädigung am Bauwerk bereits festgestellt wurde (anlassbezogen) oder als grundsätzliches Structural Health Monitoring (SHM). Insbesondere in diesen Situationen ist das größte Potenzial des Monitorings zu vermuten, da die Schadensentwicklung und somit die Restnutzungsdauer besser abgeschätzt werden können.

2.5.3 Datenverarbeitung und Building Information Modeling (BIM)

Zukünftig wird es vorrangig darum gehen, im Rahmen der Digitalisierung unterschiedlichste Datenquellen (visuelle Prüfung, Monitoring, ZfP, Drohnen, ...) so zusammenzuführen, dass die Baulastträger zeitnah ein umfassendes Bild der Bauwerke (innen und außen) erhalten. Die Umwandlung von Daten in Informationen und deren Zusammenführung mit weiteren Informationen ist von großer Bedeutung (HAJDIN et al., unveröffentlicht). Dabei wird das Building Information Modeling (BIM) eine bedeutende Rolle spielen und bietet zahlreiche Möglichkeiten sowohl die Arbeit am Objekt als auch die weiteren Arbeiten mit den Dateninformationen zu unterstützen (HAJDIN et al., unveröffentlicht; ISAILOVIC, STOJANOVIC, TRAPP, RICHTER, HAJDIN, DÖLLNER 2020). Die hierfür notwendigen Methoden

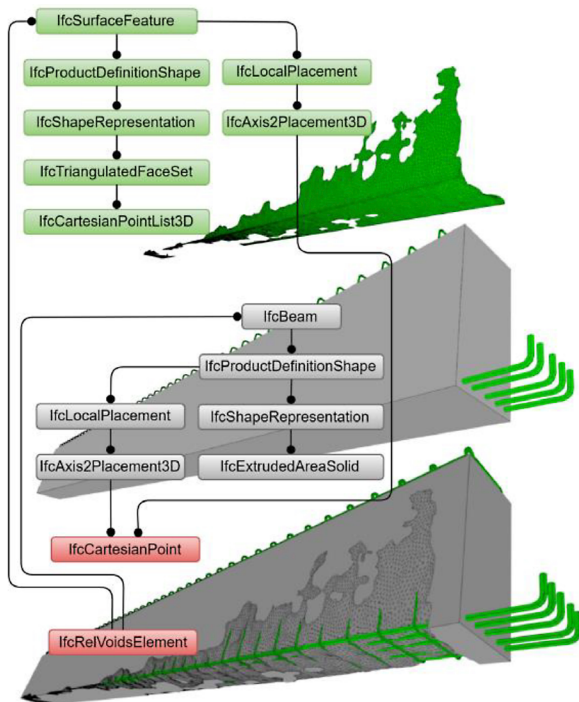


Bild 2-10: IFC-Struktur für die geometrische Darstellung von Schäden (ISAILOVIC et al. 2020)

zur punktwolkenbasierten Erkennung von Abplatzungen sowie zur Integration von Schadenskomponenten in ein BIM durch semantische Anreicherung eines IFC-Modells (Industry Foundation Classes) sind bzw. werden derzeit erarbeitet.

Hierzu entwickelten ISAILOVIC et al. (2020) einen Ansatz zur Generierung eines As-Built-BIM-Modells, das zur geometrischen Rekonstruktion von detektierten Schadstellenclustern und zur semantischen Anreicherung des entsprechenden IFC-Modells genutzt wurde. Die Methodik der Multiview-Klassifikation kann für die Erkennung von Abplatzungsschäden eingesetzt und evaluiert werden. Mithilfe der semantischen Anreicherung von IFC-Modellen im Ist-Zustand eines Bauwerks durch Hinzufügen von klassifizierten und rekonstruierten Schadensclustern in das IFC-Modell, wird ein genaues Verorten von Schäden innerhalb des IFC-Modells möglich, das dabei den Anforderungen der Bauwerksprüfungen im Rahmen eines Bauwerksmanagementsystems entspricht (vgl. Bild 2-10).

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

2.6 Zustandsbewertung

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

Für einen ersten Überblick ist nachfolgend die Zustandsbewertung von Bauwerken der beteiligten Infrastrukturbetreiber auf den relevanten Gliederungsebenen dargestellt. Die in der Bild 2-11 dunkelgrüne Färbung des Feldes bedeutet, dass auf dieser Gliederungsebene eine Zustandsnote direkt erfasst wird. Bei den hellgrün hinterlegten Felder wird die Note aus Noten berechnet, welche in der untergeordneten Gliederungsebene verteilt wurden.

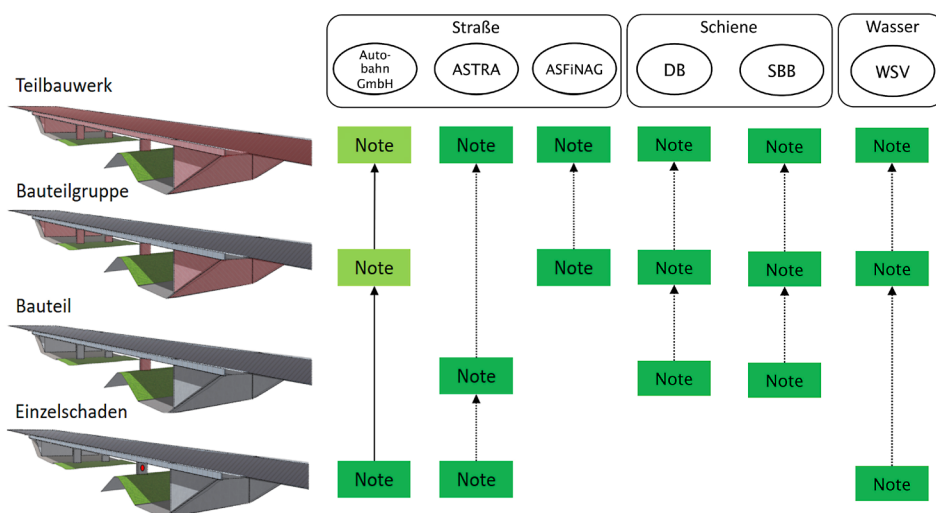


Bild 2-11: Zustandsbewertung von Brücken auf verschiedenen Gliederungsebenen

2.6.1 Straße

Autobahn GmbH/Straßenbauverwaltungen der Länder

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

Basierend auf der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 ist die Bewertungseinheit der Einzelschaden. In einem weiteren Schritt wird in Abhängigkeit der drei Noten für jeden Schaden die Basiszustandszahl aus einer Tabelle ausgelesen. Diese Basiszustandszahl wird in Abhängigkeit des Schadenumfangs (geometrisch) leicht korrigiert. Diese korrigierte Basiszustandszahl wird als Zustandszahl bezeichnet. Aus dieser Note werden dann mittels eines Algorithmus Zustandsnoten für Bauteilgruppen und Teilbauwerke vergeben. Die Zustandsnote kann nicht direkt mittels eines Algorithmus aus den Noten der untergeordne-

Notenbereich	Zustand	Beschreibung
1,0 – 1,4	sehr gut	Die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit des Bauwerks sind gegeben . Laufende Unterhaltung erforderlich.
1,5 – 1,9	gut	Verkehrssicherheit des Bauwerks sind gegeben . Die Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe kann beeinträchtigt sein. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann langfristig geringfügig beeinträchtigt werden. Laufende Unterhaltung erforderlich.
2,0 – 2,4	befriedigend	Die Standsicherheit und Verkehrssicherheit des Bauwerks sind gegeben . Die Standsicherheit und/oder Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe können beeinträchtigt sein. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann langfristig beeinträchtigt werden. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung des Bauwerks , die LANGFRISTIG zu erheblichen Standsicherheits- und/oder Verkehrssicherheitsbeeinträchtigungen oder erhöhtem Verschleiß führt, ist möglich . Laufende Unterhaltung erforderlich. Mittelfristig Instandsetzung erforderlich. Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit können kurzfristig erforderlich werden.
2,5 – 2,9	ausreichend	Die Verkehrssicherheit des Bauwerks kann beeinträchtigt sein. Die Standsicherheit und/oder Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe können beeinträchtigt sein. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann beeinträchtigt sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung des Bauwerks , die mittelfristig zu erheblichen Standsicherheits- und/oder Verkehrssicherheitsbeeinträchtigungen oder erhöhtem Verschleiß führt, ist dann zu erwarten . Laufende Unterhaltung erforderlich. Kurzfristig bis mittelfristig Instandsetzung erforderlich. Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit können kurzfristig erforderlich sein.
3,0 – 3,4	nicht ausreichend	Die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit des Bauwerks sind beeinträchtigt . Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann nicht mehr gegeben sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung kann kurzfristig dazu führen, dass die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben sind. Laufende Unterhaltung erforderlich. Umgehende Instandsetzung erforderlich. Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit oder Nutzungseinschränkungen sind umgehend erforderlich.
3,5 – 4,0	ungenügend	Die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit des Bauwerks sind erheblich beeinträchtigt oder nicht mehr gegeben . Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann nicht mehr gegeben sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung kann kurzfristig dazu führen, dass die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben sind oder dass sich ein irreparabler Bauwerksverfall einstellt. Laufende Unterhaltung erforderlich. Umgehende Instandsetzung bzw. Erneuerung erforderlich. Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit oder Nutzungseinschränkungen sind sofort erforderlich.

Tab. 2-2: Notenbereiche der Zustandsbewertung (RI-EBW-PRÜF)

ten Objekte ermittelt werden. Vielmehr gibt der Gesamtzustand, die Funktionalität und die Sicherheit des Objektes wieder.

ASFiNAG (AT)

Die Bewertung des Erhaltungszustandes von Infrastrukturbauwerken der ASFiNAG erfolgt gemäß Richtlinie 13.03.11 (FSV 2011) nach dem in Tabelle 2-3 dargestellten Notensystem.

Die Bauteilgruppen und das gesamte Bauwerk werden im Wesentlichen separat bewertet. Die Note des Gesamtbauwerks ist nicht direkt von den Noten der einzelnen Bauteilgrup-

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

Tab. 2-3: Notensystem zur Beurteilung des Bauwerkszustands

pen abhängig. Die Objektbewertung, d. h. die Bewertung des gesamten Bauwerks erfolgt gemäß Tabelle 2-3.

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

Note	Beschreibung
1	Sehr guter Zustand
	Keine oder sehr geringe Schäden. Mängel aus der Bauzeit wie Abweichungen der Abmessungen, ästhetische Mängel. Keine Einschränkung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Keine Instandsetzung erforderlich.
2	Guter Zustand
	Geringe, leichte Schäden; Mängel aus der Bauherstellung, die noch keine Verschlechterung zeigen. Keine Einschränkung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Bei Nichtbeheben kommt es erst längerfristig zu einer Verminderung der Gebrauchstauglichkeit bzw. Dauerhaftigkeit Behebung im Zuge von Wartungs- oder Instandsetzungsarbeiten empfohlen.
3	Ausreichender Zustand
	Mittelschwere Schäden, die keine Einschränkung der Tragfähigkeit zur Folge haben. Es sind Anzeichen einer Verminderung der Gebrauchstauglichkeit bzw. Dauerhaftigkeit des Bauwerks zu erkennen. Eine Instandsetzung sollte mittelfristig in Angriff genommen werden, um die Gebrauchstauglichkeit bzw. die Dauerhaftigkeit auf das geplante Maß anzuheben.
4	Mangelhafter Zustand
	Schwere Schäden, die derzeit noch keine Einschränkungen der Tragfähigkeit zur Folge haben. Es ist eine Verminderung der Gebrauchstauglichkeit bzw. Dauerhaftigkeit deutlich erkennbar. Eine Instandsetzung sollte kurzfristig in Angriff genommen werden, um die Gebrauchstauglichkeit bzw. die Dauerhaftigkeit auf das geplante Maß anzuheben. Eine Instandsetzung kann innerhalb der genannten Frist zugunsten einer neuerlichen Prüfung/ Sonderprüfung ausgesetzt werden (Prüfintervall verkürzen).
5	Schlechter Zustand
	Sehr schwere Schäden, die eine Einschränkung der Tragfähigkeit und/ oder Gebrauchstauglichkeit bis zum Abschluss der Instandsetzung/ Erneuerung zur Folge haben. Instandsetzungs-/Erneuerungsarbeiten sind unverzüglich einzuleiten.

Tab. 2-4: Objektbeurteilung gemäß RVS 13.03.11 (FSV 2011)

Bundesamt für Strassen ASTRA (CH)

In der Schweiz regelt und definiert die Norm SN 588 469 (1997) die Terminologie, die Erhaltungsziele, die Erhaltungsmaßnahmen und -tätigkeiten und die Bauwerksakten. Das ASTRA hat in (ASTRA, 2005) die Grundsätze für die Überwachung und den Unterhalt (baulicher Unterhalt und Erneuerung) von Kunstbauten der Nationalstraßen festgelegt. Diese Richtlinie gibt Auskunft über die anzuwendenden Grundlagen, Grundprinzipien und Ziele.

In einem allgemeinen Rahmen gliedert die Richtlinie die Überwachungs- und Unterhaltstätigkeiten für die Erhaltung der Kunstbauten.

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

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

Tab. 2-5: Zustandsklassen mit Beschreibung (SN 588 469)

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

In einem Leitfaden (ASTRA, 2016) werden Beispiele von typischen Schadensbildern gegeben. Sie dienen als Anhaltspunkt für den Inspektor und sollen eine einheitliche Beurteilung sicherstellen. Die Zustandsbewertung erfolgt aufgrund der Einschätzung des Inspektors entlang der Objekthierarchie beginnend mit der kleinsten Einheit bis hin zur Gesamtbeurteilung des Infrastrukturobjekts.

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

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

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

2.6.2 Schiene

Deutsche Bahn (DB Netz AG)

Die Zustandsbewertung von Eisenbahnbrücken in Deutschland im Bereich der DB Netz AG erfolgt nach den Richtlinien 804.800x der DB Netz AG. Die dokumentierten Schäden werden mit einer Schadensklasse gemäß der Richtlinie 804.8001 bewertet. Hierbei wird zwischen folgenden Schadensklassen differenziert:

- SK 1: geringfügige Schäden und Mängel
- SK 2: Schäden und Mängel mittleren Umfangs

- SK 3: Schäden und Mängel großen Umfangs
- SK 4: völlige Verrottung, Zerstörung

Für die Einordnung der Schäden in die Schadensklassen stehen dem Inspekteur Beispielbilder zur Verfügung. Damit „soll das Bewertungssystem der DB Netz AG vereinheitlicht und von dem subjektiven Empfinden der Fachbeauftragten losgelöst werden“ (NARANIECKI & MARX 2019). In Ergänzung zu den Schadensklassen werden die Schäden hinsichtlich der Kriterien Betriebs-, Verkehrs- und Standsicherheit beurteilt. Auf Grundlage der am Bauwerk erfassten Schadensanzahl und deren SK wird jedes Bauwerksteil (Überbauten, Widerlager und Pfeiler) einzeln hinsichtlich seines Zustands durch den Fachbeauftragten bewertet. Dafür werden Zustandskategorien (ZK) 1 bis 4 nach der Richtlinie 804.8001 verwendet (vgl. Tabelle 2-6).

Zustandskategorie	Schadensbeschreibung
1	Punktuelle Schäden am Bauwerk/Bauwerksteil, welche die Sicherheit nicht beeinflussen. Maßnahmen des vorbeugenden Unterhalts sind bei langfristig zu erhaltenden Bauwerken auf ihre Wirtschaftlichkeit hin zu prüfen.
2	Größere Schäden am Bauwerk/Bauwerksteil, welche die Sicherheit nicht beeinflussen. Maßnahmen des vorbeugenden Unterhalts sind bei lang- und mittelfristig zu erhaltenden Bauwerken/Bauwerksteilen auf ihre Wirtschaftlichkeit hin zu prüfen.
3	Umfangreiche Schäden am Bauwerk/Bauwerksteil, welche die Sicherheit noch nicht beeinflussen. Eine wirtschaftliche Instandsetzung ist noch möglich und zu prüfen.
4	Gravierende Schäden am Bauwerk/Bauwerksteil, welche die Sicherheit noch nicht beeinflussen. Eine wirtschaftliche Instandsetzung ist nicht mehr möglich.

Tab. 2-6: Zustandskategorien der Zustandsbewertung für Eisenbahnbrücken (DB Netz AG 2000)

Im Zuge der Inspektion wird ebenfalls für das gesamte Bauwerk eine ZK vergeben. Dabei ist das am schlechtesten bewertete Bauwerksteil maßgebend für den Gesamtzustand.

Schweizerische Bundesbahnen (SBB)

Die Schweizerische Bundesbahnen AG (SBB) unterteilt Eisenbahnbrücken in Bauteile und Bauglieder. Die in der Inspektion aufgefundenen Schäden werden jeweils dem Bauteil zugeordnet und bewertet (SBB 2020a). Die Benotung der einzelnen Bauteile erfolgt anhand von ganzen Zahlen und entspricht der Skala der Zustandsklassen in Anlehnung an den Netzzustandsbericht (R RTE 29900) (vgl. Tabelle 2-7).

Zustandsklasse	Beschreibung
ZK1 «gut»	Neuwertiges Bauwerk, welches keine oder nur unbedeutende Schäden aufweist.
ZK2 «annehmbar»	Das Bauwerk weist Schäden auf, welche in absehbarer Zeit keine Beeinträchtigung für den Betrieb oder Personen darstellen.
ZK3 «schadhaft»	Das Bauwerk weist Schäden auf, welche den Betrieb oder Personen potenziell beeinträchtigen können und/oder bei Nichtbeheben Folgekosten verursachen werden.
ZK4 «schlecht»	Das Bauwerk weist Schäden auf, welche den Betrieb und Personen beeinträchtigen können und/oder bei Nichtbeheben hohe Folgekosten verursachen werden.
ZK5 «alarmierend»	Das Bauwerk weist Schäden auf, die den Betrieb unmittelbar beeinträchtigen können und Massnahmen (Sofortmassnahmen und intensivierete Überwachung) zur Folge haben, um den uneingeschränkten Betrieb zu gewährleisten.
ZK9 «unbekannt»	Das Bauwerk oder wesentliche Teile davon können nicht inspiziert werden. Allfällige Massnahmen müssen auf Grund einer Risikoabschätzung festgelegt werden. Dazu gehört auch eine Massnahme, damit das Bauwerk zukünftig inspiziert werden kann oder alle Risiken behoben werden können. Die Vergabe der ZK9 muss begründet werden.

Tab. 2-7: Zustandsklassen der Zustandsbewertung der SBB (SBB 2020a)

Die Bauteile, welche zu bewerten sind, werden im System als Bauteile ohne statische Relevanz und Bauteile mit statischer Relevanz unterschieden. Das System rechnet die Prozentsätze gemäß der Gewichtung automatisch um. Für mehrfach vorhandene Bauteile (zum Beispiel mehrere Pfeiler) wird nur eine Gesamtnote vergeben. Das schlechteste der vorhandenen Bauteile bestimmt die Bauteilnote. Die Schäden werden wie bisher nach Bauteil und Bauglied getrennt angegeben (z. B. Pfeiler 1, Pfeiler 2 etc.). Die Bauteilnote (CP) wird auf der ersten Position zum jeweiligen Bauteil vergeben.

2.6.3 Wasserstraße

Gestützt auf die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 bzw. VV-WSV 2101 (BMVBS 2010) ist in den Methoden der WSV der Einzelschaden ebenfalls die Bewertungseinheit. Für eine Bewertung des kompletten Bauwerks wird zwischen Tragwerksteilen bzw.- Bauwerksbestandteilen differenziert. Für Wasserbauwerke erfolgt die Bewertung gemäß (BAW 2018) durch die Einteilung in Schadensklassen (SK) 1 bis 4 anhand der Spezifikationen und repräsentativer Fotos für jeden Schadentyp (vgl. Tabelle 2-8). Je nach Mengenangabe des Schadens kann die Schadenklasse leicht modifiziert werden. Die Bewertung der Kriterien erfolgt in Abhängigkeit der Ergebnisse der maßgebenden Standsicherheitsnachweise, der Konstruktionsart sowie dem Ermessen des Inspektors (WEILER 2019).

Schadensklasse	Schadensbeschreibung
1	Punktuelle Schäden am Bauwerk/Bauwerksteil, welche die Sicherheit nicht beeinflussen. Maßnahmen des vorbeugenden Unterhalts sind bei langfristig zu erhaltenden Bauwerken auf ihre Wirtschaftlichkeit hin zu prüfen.
2	Größere Schäden am Bauwerk/Bauwerksteil, welche die Sicherheit nicht beeinflussen. Maßnahmen des vorbeugenden Unterhalts sind bei lang- und mittelfristig zu erhaltenden Bauwerken/Bauwerksteilen auf ihre Wirtschaftlichkeit hin zu prüfen.
3	Umfangreiche Schäden am Bauwerk/Bauwerksteil, welche die Sicherheit noch nicht beeinflussen. Eine wirtschaftliche Instandsetzung ist noch möglich und zu prüfen.
4	Gravierende Schäden am Bauwerk/Bauwerksteil, welche die Sicherheit noch nicht beeinflussen. Eine wirtschaftliche Instandsetzung ist nicht mehr möglich.

Tab. 2-8: Schadensklassen der Zustandsbewertung für Wasserbauwerke (BAW 2015)

2.7 Zustandsprognose

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

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

2008). Die Prognose kann sowohl auf Basis von zusammengesetzten Indizes durchgeführt werden (z. B. MASOVIC, HAJDIN 2014) oder separiert für einzelne Schädigungsprozesse (SCHNELLENBACH-HELD, PEETERS, MIEDZINSKI 2015), wie z. B.

- Karbonatisierung,
- Chlorideindringung,
- Bewehrungskorrosion,
- Alkali-Kieselsäure-Reaktion,

erfolgen.

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

In Hinblick auf ein zuverlässigkeitsbasiertes Erhaltungsmanagement zur Bewertung von Brückenbauwerken empfehlen SCHNELLENBACH-HELD, PEETERS & MIEDZINSKI (2015) die Beschreibung des zeitlich veränderlichen Zustands eines Bauteils mithilfe von Einwirkungs- und Widerstandsfunktionen. Aufgrund der bei den Einwirkungen und Widerständen vorhandenen Streuungen sollte die Modellierung mithilfe von probabilistischen Methoden erfolgen (FISCHER et al. 2014). Ziel der Zustandsprognose ist es, verschiedene Schädigungsmechanismen über einen zu definierenden Prognosezeitraum abzuschätzen, um daraus schließlich Aussagen zur Eintrittswahrscheinlichkeiten von Schäden treffen zu können. Bild 2-12 zeigt hierzu ein typisches Beispiel einer Prognose der zeitlichen Entwicklung der Kennzahlen Zuverlässigkeit und Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Bauwerk.

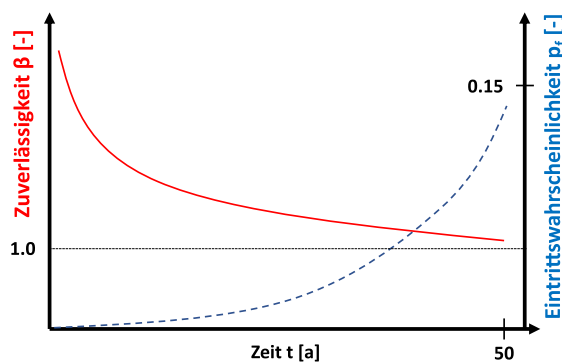


Bild 2-12: Prognose der Kennzahlen Zuverlässigkeit β und Eintrittswahrscheinlichkeit p_f

Im deutschsprachigen Raum kommen für die Zustandsprognose von Bauwerken größtenteils deterministische Prognosemethoden zur Anwendung. In der Schweiz erfolgt bereits seit einigen Jahren ein erfolgreicher Einsatz von probabilistischen Prognosemethoden (Markov-Ketten) in der Praxis zur Zustandsprognose von Bauwerken des Bundesamts für Strassen (ASTRA). Die ASFINAG sowie das BAW haben solche Prognosemethoden ebenfalls bereits zumindest im Rahmen von Forschungsvorhaben erprobt. Im Bereich der elektromechanischen Anlagenteile werden hingegen oftmals standardmäßig probabilistische Methoden eingesetzt (vgl. Tabelle 2-9).

Für die netzweite Anwendung von Prognoseberechnungen kommen i. d. R. Softwaretools zum Einsatz (vgl. z. B. EPING (ZWERGER et al. 2019)). In der Praxis kommen zumeist lineare oder exponentielle Funktionsansätze zur Anwendung. Diese beziehen sich i. d. R. auf das Gesamtbauwerk und nicht auf einzelne Bauteile.

	Bundesamt für Strassen ASTRA	ASFiNAG	Autobahn GmbH – Niederlassung Ost	Landesbetrieb BW	LS Brandenburg	DB Netz AG	SBB	BAW/WSV
deterministisch		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
probabilistisch	✓	(✓) ✓*				✓*	✓*	(✓) ✓*
Legende:								
✓ Stand der Technik								
(✓) Ansatz im Rahmen von Forschungsprojekten erprobt bzw. in Vorbereitung								
✓* Eine Anwendung erfolgt für elektromechanische Anlagen								

Tab. 2-9: Übersicht zu eingesetzten Prognosemethoden für Infrastrukturbauwerke

2.8 Maßnahmenplanung

Für das Ermitteln von Handlungsoptionen zur Maßnahmenplanung ist die Zustandsprognose und die Erhaltungsstrategie, welche im Rahmen des strategischen Erhaltungsmanagements definiert wurde, von Bedeutung. Die Handlungsoptionen für relevante Infrastrukturbauwerke, d. h. Bauwerke mit identifiziertem Erhaltungsbedarf, ergeben sich für einen definierten Zeitraum durch die in der Erhaltungsstrategie definierte Zuordnung der Typen von Erhaltungsmaßnahmen zu einem festgelegten Zustandsniveau. Die Maßnahmenplanung und Priorisierung von Maßnahmen erfolgt bei den verschiedenen Verkehrsträgern zumeist zustandsbasiert. Für die Ermittlung von erhaltungsbedürftigen Bauwerken werden i. d. R. Zustandsgrenzen oder -klassen bzw. Schadenskategorien verwendet. Nachfolgend sind in Tabelle 2-10 für verschiedene Infrastrukturbetreiber einige Kriterien aufgelistet, die zum Einleiten von Vorbereitungen bzw. zum Auslösen einer Erhaltungsmaßnahme herangezogen werden.

Für die Entscheidungsfindung und die netzweite Optimierung bzw. Koordinierung werden zum Teil mehrere Szenarien z. B. für unterschiedlichen Erhaltungsstrategien (bspw. gemäß RPE-ING) oder Budgetvarianten gebildet. Die netz- oder korridorweite Zusammenführung der Erhaltungsmaßnahmen und deren resultierende Kosten ergeben dann das Arbeitsprogramm mit zugehörigem Finanzbedarf je Szenario als Grundlage für die Optimierung bzw. Koordinierung über alle Teilsysteme. Für einzelne Bauwerke erfolgt dies anhand von Wirtschaftlichkeitsberechnungen nach den Vorgaben der RI-ERH-ING und den RI-WI-BRÜ.

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

Tab. 2-10: Kennwerte bzw. Grenzwerte für die Planung u. Einleitung von Erhaltungsmaßnahmen der Infrastrukturbetreiber

Hierbei kommen oftmals vereinfachte Abschreibungsmodelle zum Einsatz. Weiterhin erfolgt derzeit keine Berücksichtigung von volkswirtschaftlichen Kosten.

Die räumliche, zeitliche sowie anlagenübergreifende Koordinierung von Erhaltungsmaßnahmen erfolgt i. d. R. anhand von qualitativen Kriterien im Rahmen von Koordinationsgremien. Wichtige Randbedingungen sind hierbei die Sicherstellung einer möglichst hohen Verfügbarkeit während der Erhaltungsmaßnahmen. Dazu kommen bspw. Vorgaben zur maximalen Länge von Arbeitszonen (ASFiNAG, ASTRA) zum Einsatz. Verkehrssimulationen, die die verkehrlichen Auswirkungen und somit die volkswirtschaftlichen Kosten von Erhaltungsszenarien quantifizieren können, werden in der Regel nicht verwendet.

2.9 Wirkungsanalyse

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

Die Durchführung einer Erhaltungsmaßnahme bewirkt i. d. R. eine Verbesserung des Bauwerkszustands. Für die konkrete Beurteilung der Wirkung einer Maßnahme werden sogenannte Rücksetzwerte verwendet. Der Bauwerkszustand nach Durchführung einer Erhaltungsmaßnahme wird bei allen Verkehrsträgern derzeit erfasst. Diese projektbezogenen Daten bzw. Informationen zur Wirksamkeit einer Erhaltungsmaßnahme werden jedoch zumeist nicht in einer Datenbank abgelegt, sodass deren Auswertung in Bezug auf das Verhältnis zwischen Kosten und Wirkung derzeit nur mit einer manuellen zeitaufwändigen Datenaufbereitung möglich ist. Ziel der Infrastrukturbetreibenden ist es, diese Daten mittelfristig ebenfalls für das Erhaltungsmanagement von Bauwerken bereitzustellen. Tabelle 2-11 zeigt den derzeitigen Stand bei ausgewählten Infrastrukturbetreibenden in Bezug auf die Durchführung einer Erstinspektion nach einer Maßnahme und die Analyse von Kosten und Wirkung der durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen.

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

Tab. 2-11: Übersicht zum Stand der Technik in der Praxis in Bezug auf die Durchführung einer Erstinspektion und die Analyse von Kosten u. Wirkung von durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen

2.10 Kapitelzusammenfassung

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

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

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

Nach Durchführung der Erhaltungsmaßnahmen wird i. d. R. der Zustand des Bauwerks im Rahmen einer Abnahmeprüfung ermittelt. Um einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess innerhalb des Kreislaufs des Erhaltungsmanagements zu ermöglichen, müssen diese Daten von der Projektebene an die strategische Ebene zurückgemeldet werden. Hierbei besteht bei den Verkehrsträgern derzeit noch Verbesserungspotenzial.

Sämtliche Entscheidungsprozesse innerhalb des Lebenszyklus- bzw. Erhaltungsmanagements sollten auf der Grundlage von Daten und daraus abgeleiteten Indikatoren getroffen werden. In dem nachfolgenden Kapitel 3 wird daher ein Überblick zu den bisher verwendeten Indikatoren für ein Lebenszyklusmanagement von Bauwerken gegeben.

3 Indikatoren für ein Lebenszyklusmanagementtool

3.1 Allgemeines

Dieses Kapitel beinhaltet eine Übersicht zu den bisher eingesetzten Indikatoren im Rahmen der Erhaltungsplanung von Bauwerken. Dazu wird der nationale und internationale Stand der Technik präsentiert (vgl. Kapitel 3.2). Weiterhin wird ein Überblick zu den bisherigen Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet gegeben (vgl. Kapitel 3.3 und 3.4).

3.2 Stand der Technik

Mit dem Bundesverkehrswegeplan 2030 (BMVI 2016) gibt die Bundesregierung u. a. definierte Ziele zur Erhaltung und der Weiterentwicklung der Verkehrsinfrastruktur vor. Der Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 zielt dabei primär auf diejenigen Ziele der Verkehrspolitik ab, die durch die Weiterentwicklung der Verkehrsinfrastruktur konkret beeinflusst werden können. Dazu zählen insbesondere eine reibungslose Mobilität im Personenverkehr und ein leistungsfähiger Güterverkehr. Als weitere Ziele werden auch Aspekte der Verkehrssicherheit sowie des Klima-, Umwelt- und Lärmschutzes in den Bewertungen des BVWP abgebildet. Das Bewertungsverfahren des BVWP 2030 besteht aus vier Modulen, welche zahlreiche ökonomische, ökologische und soziale Kriterien umfassen, welche wiederum auf diversen Indikatoren beruhen.

Im Folgenden werden zunächst die wichtigsten Leistungsziele vorgestellt, die derzeit bei den drei Verkehrsträgern zum Einsatz kommen. Weiterhin wird ein Überblick zu den daraus abgeleiteten Leistungsindikatoren für Infrastrukturbauwerke gegeben, die in den jeweiligen technischen Regelwerken und Normen sowie Zustandsberichten der Institutionen enthalten sind.

3.2.1 Straße

Autobahn GmbH/Straßenbauverwaltungen der Länder

In Deutschland ist neben der Leistungsfähigkeit und Sicherheit die Verfügbarkeit der Autobahnen eine der zentralen Prioritäten der Autobahn GmbH. Um die Verfügbarkeit sicherzustellen und Staus zu vermeiden, wird ein auf das Gesamtnetz der Bundesautobahnen ausgerichtetes intelligentes Verkehrsmanagement eingesetzt (Autobahn GmbH 2020). In Bezug auf die Erhaltung von Ingenieurbauwerken ist nach den RPE-ING (2020) das Ziel, die Sicherstellung eines Bauwerkszustandes, der die definierten Anforderungen hinsichtlich der Kriterien

- Tragfähigkeit
- Gebrauchstauglichkeit
- Dauerhaftigkeit

mit einer ausreichenden Zuverlässigkeit erfüllt. Damit einhergehend gilt es, eine hohe Verfügbarkeit der Bauwerke zu gewährleisten, die dem regelmäßigen Verkehrsbedürfnis genügt. Hierbei ist jederzeit ein verkehrssicherer Zustand sicherzustellen. Des Weiteren sind die folgenden qualitativen Ziele bei der Erhaltungsplanung zu berücksichtigen (BMVI 2020):

- Auswirkungen auf den Nutzer (Minimierung von Verkehrseinschränkungen durch z. B. Korridorbetrachtungen),
- Netzsicherheit (Durchlässigkeit des Netzes für den Individual- und Güterverkehr),
- Durchlässigkeit des Netzes für erlaubnis- und genehmigungspflichtige Großraum- und Schwertransporte,
- Ausgleich der Altersstruktur des Bauwerksbestandes.

Zu den sogenannten Leistungszielen von Straßenbauwerken zählen weiterhin:

- Standsicherheit
- Verkehrssicherheit
- Wirtschaftlichkeit
- Umweltverträglichkeit
- Leistungsfähigkeit

Für Straßenbauwerke erfolgt die Bewertung gemäß BMVI (2017b) und BMVI (2017c) anhand der Beschreibung, repräsentativer Bilder oder Schadensbeispielen. Bewertet werden die drei Kriterien Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit. Hierbei wird zunächst nur der aktuelle Zustand des Bauwerks bewertet. Anschließend wird bei Straßenbauwerken mit der Dauerhaftigkeit die Auswirkung des Schadens in zeitlicher Hinsicht beschrieben.

Als Performanceindikatoren (PI) werden die folgenden Kriterien verwendet (BMVI 2020a):

- Zustandsnote
- Substanzkennzahl basierend auf der Bauwerksprüfung nach DIN 1076/RI-EBW-PRÜF
- Traglastindex (gemäß BMVI 2020b), der anhand eines Soll-Ist-Vergleichs die strukturellen Eigenschaften eines Brückenbauwerks bewertet.
- Anlagevermögen (Modernisierungsgrad), welches als Kennzahl zur Erreichung des Ausgleichs der Altersstruktur des Bauwerksbestandes genutzt wird.

In Bezug auf die Verfügbarkeit der Infrastruktur liegt zur Berücksichtigung von Nutzerfolgekosten derzeit kein anwendbares Instrumentarium vor (BMVI 2020a).

Eine Priorisierung von Streckenabschnitten für Erhaltungsmaßnahmen erfolgt in Abhängigkeit der Kriterien

- Bauwerksalter
- letzte Prüfung
- Hinweise auf Schäden
- Verkehrsbelastung
- Traglastindex
- Relevanz für Verkehrsinfrastruktur
- Umleitungsmöglichkeiten

ASFiNAG

In Österreich sind die Leistungsziele der ASFiNAG im Nachhaltigkeitsbericht (ASFiNAG 2020) enthalten. Zu den Leistungszielen bzw. KPI der Verkehrsinfrastruktur zählen:

- Verfügbarkeit
- Verkehrssicherheit
- Recht & Einkauf
- Nachhaltigkeit, Ökologisierung und Klimaschutz
- Personal

Im nachstehenden Bild 3-1 ist die Verknüpfung der Nachhaltigkeits-Handlungsfelder mit den relevanten Strategien dargestellt, sowie die entsprechenden Hauptziele je Teilstrategie.

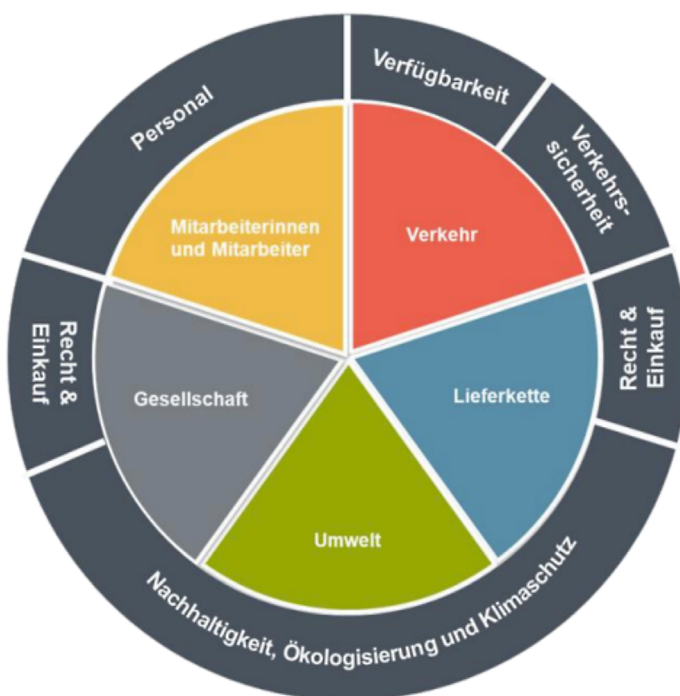


Bild 3-1: Leistungsziele der ASFiNAG (ASFiNAG 2020)

Gemäß den RVS 15.01.11 (FSV 2003) sind bei der Entwurfsplanung von Brücken die Entwurfsziele

- Tragsicherheit
- Gebrauchstauglichkeit
- Dauerhaftigkeit und Robustheit
- Erhaltungs- und Wartungsfreundlichkeit
- Herstellungsfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit

zu berücksichtigen.

Brücken stellen konstruktionsbedingt eine Assetklasse mit einer geringen Resilienz dar. Um im Bauprogramm steuerbar zu bleiben und die Verfügbarkeit aufrecht erhalten zu können, fordert die ASFiNAG den Anteil der Brücken in Zustandsklasse 4 und 5 auf unter 10 % zu halten (ASFiNAG 2019).

Die ASFiNAG definiert sogenannte Schlüsselbauwerke anhand eines Punkteschlüssels, der die Kriterien Bauwerksalter, Bauwerksgröße in Form von Neubaukosten und die Einschränkung der Verfügbarkeit beinhaltet. Bei Überschreiten eines definierten Punkteniveaus wird von einem Schlüsselbauwerk gesprochen. Neben diesem Punktesystem sind auch die Kriterien, ob beide Richtungsfahrbahnen auf einem Tragwerk vorliegen, ob eine sinnvolle Baustellenverkehrsführung mit vertretbarem Aufwand möglich ist oder ob adäquate Umleitungsmöglichkeiten vorhanden sind (ASFiNAG 2019).

Ein weiteres wichtiges strategisches Ziel der ASFiNAG stellt die Reputation der Institution dar. Daher werden regelmäßig Umfragen zur Zufriedenheit der Nutzer durchgeführt. Dies beinhaltet z. B. Umfragen zum allgemeinen Ruf der Firma sowie zum nachhaltigen und umweltbewussten Engagement des Unternehmens.

Bundesamt für Strassen ASTRA (CH)

Das Bundesamt für Strassen (ASTRA) zählt zu den Hauptzielen der Bauwerkserhaltung die Erhaltung der Bausubstanz, die Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit, die Wahrung oder Wiederherstellung der Gebrauchstauglichkeit, die wirtschaftliche Optimierung von Unterhaltungsmaßnahmen, die Erkennung von neuen potenziellen Risiken und die Reduktion von Sofortmaßnahmen (ASTRA 2005).

Unter dem Begriff einer ausreichenden Sicherheit wird ein akzeptierter Gefährdungsgrad verstanden, wobei zwischen den Sicherheitsaspekten

- Tragsicherheit
- Verkehrssicherheit
- Betriebssicherheit
- und Umweltverträglichkeit

differenziert wird (ebd.).

Im Netzzustandsbericht 2020 des ASTRA (ASTRA 2020) werden drei Hauptgrößen zur Beurteilung eines Bauwerks betrachtet (vgl. Bild 3-2):

- **Wiederbeschaffungswert (WBW):** Der Wiederbeschaffungswert bezeichnet jenen Betrag in Franken, der aufgewendet werden müsste, um eine bestehende Infrastruktur heute gleichwertig – das heißt entsprechend dem aktuellen Stand der Technik und den aktuellen gesellschaftlichen Anforderungen – neu zu erstellen.
- **Zustand:** Der Zustand der Infrastrukturen wird je nach Fachbereich auf unterschiedliche Weise erhoben und bewertet (vgl. Kapitel 2.6)
- **Ausgaben oder Kosten für den Unterhalt:** Für das Gesamtnetz wird zudem der jährliche Erhaltungsbedarf ausgewiesen, der nach Schätzungen des ASTRA nötig wäre, um das Nationalstraßennetz langfristig zu erhalten

Als weitere Kennzahl wird aus dem Verhältnis aus dem WBW und der Lebensdauer eines Bauwerks der Erhaltungsbedarf ermittelt:

Erhaltungsbedarf = Wiederbeschaffungswert (WBW)/Lebensdauer

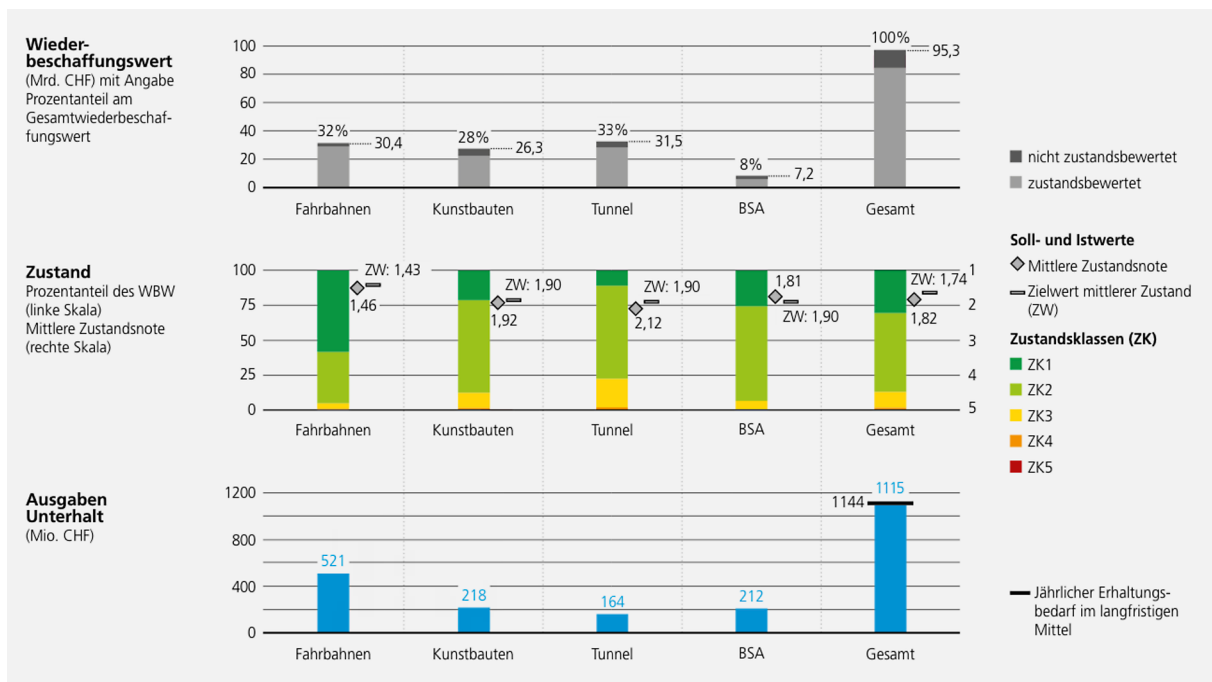


Bild 3-2: Übersicht zu Wiederbeschaffungswert, Zustand und Ausgaben zum Unterhalt 2020 (ASTRA 2020)

3.2.2 Schiene

Deutsche Bahn (DB Netz AG)

In Deutschland verwendet die DB Netz AG ein sehr detailliertes Kennzahlensystem, das in der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV) dokumentiert ist. Dieses beinhaltet u. a. die folgenden Kennzahlen zur Beurteilung von Qualität/Leistung von Bauwerken im Bereich der Schieneninfrastruktur (Deutsche Bahn AG 2021):

- Theoretischer Fahrzeitverlust im Gesamtnetz/Teilnetzen
- Anzahl Infrastrukturmängel
- Zustandskategorie
- Funktionalität der Anlagen
- Störungen und Störbestehenszeiten
- Durchschnittliches Alter
- Netzverfügbarkeit

In Bezug auf die Beurteilung von Infrastrukturbauwerken werden als KPI die folgenden Kriterien bei der DB Netz AG verwendet:

- Standsicherheit
- Verkehrssicherheit
- Betriebssicherheit

Die Zustandsinspektionen erfolgen gemäß der Modulreihe 800 der Richtlinie 804 der DB Netz AG (804.800x). Diese Richtlinien beschreiben detailliert die zu untersuchenden Bauwerksteile sowie die durchzuführenden Überwachungs-, Untersuchungs-, Begutachtungs- und Inspektionsarbeiten. Die Begutachtung von Ingenieurbauwerken findet im Regelfall

alle 3 bzw. 6 Jahre statt (siehe Ril 804.8001A02). Je nach Zustand werden die Inspektionszyklen angepasst, d. h. eventuell verkürzt.

Eine Priorisierung von Streckenabschnitten für Erhaltungsmaßnahmen erfolgt in Abhängigkeit von:

- Menge an Zügen (Belastungssituation)
- Gewichte und Schnelligkeit auf der Strecke
- Umfahrungsmöglichkeiten (baubetriebliche Umsetzbarkeit)
- Anlagenverfügbarkeit
- historisches Qualitätsverhalten

Schweizerische Bundesbahnen (SBB)

Die Schweizerische Bundesbahnen (SBB) definieren insgesamt neun Kriterien, die als Konzern- bzw. Leistungsziele verwendet werden (vgl. Bild 3-3). Die Leistungsziele Kundenzufriedenheit, Sicherheit und Jahresergebnis (Wirtschaftlichkeit) werden hierbei mit einer doppelten Gewichtung angesetzt.

Definition Konzernziele

Konzern, Gewichtung Teilziele (), gewichteter Durchschnitt: ■ Einfache Gewichtung ■ Doppelte Gewichtung

Kunden-zufriedenheit	Konzern-image	Personal-motivation	Kunden-pünktlichkeit ^A	Sicherheit ^A	Jahres-ergebnis ^A	Free Cashflow	Markt-leistung ^B	Ökologische Nachhaltigkeit
Index aus Kundenzufriedenheitsumfragen bei: P-Kunden (50%), Bahn-hofs-Kunden (30%), Cargo-Kunden (20%).	Repräsentative Online-Umfrage zum spontan geäußerten Gesamtimage (1 Frage) bei jährlich 7'200 Einwohner/-innen der Schweiz.	Motivationsbefragungen bei den Mitarbeitenden SBB und SBB Cargo (jährliche Vollbefragung)	Anteil der pünktlichen Kunden (<3 Min) im Personenverkehr (80%) und pünktlichen Sendungen ^C (<10 resp. <20 Min) im Güterverkehr (20%).	Sicherheitsindex aus drei Komponenten, welche in allen Divisionen gemessen werden. ^D	Differenz aus Erträgen und Aufwand entspricht dem Jahresergebnis (Gewinn / Verlust) des Konzerns.	Erwirtschaftete Geldmittel, welche nicht für Investitionen und Finanzierungen verwendet werden.	P: Pkm P-FV (30%) P-RV (15%) P-IPV (5%) Ntkm Cargo CH (20%) Zkm Cargo INT (5%) Mietertrag Dritte IM (25%).	Index aus: - Energieeffizienz P (40%) und G (10%) - CO ₂ -Effizienz P (7.5%) und G (42.5%)

Bild 3-3: Leistungsziele der Schweizer Bundesbahnen (SBB)

Die Grundsätze für den Unterhalt von Ingenieurbauten leiten sich aus dem sogenannten Prozess der Substanzerhaltung ab. Innerhalb dieses Prozesses sollen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit folgende Ziele erreicht werden (SBB 2020b):

- Bewahrung einer ausreichenden Sicherheit (Trag- und Betriebssicherheit)
- Erfüllung der Nutzungsanforderungen
- Erfüllung von gesetzlichen Anforderungen
- Erhaltung des kulturellen Wertes

Die Bewertung der Bauwerke erfolgt bauteilbezogen mithilfe einer Gesamtnote. Hierbei erfolgt eine Differenzierung zwischen Bauteilen ohne und mit statischer Relevanz (SBB 2020a).

3.2.3 Wasserstraße

Das Erhaltungsmanagement der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) basiert auf den folgenden Leistungszielen:

- Zuverlässigkeit
- Sicherheit
- Verfügbarkeit
- Funktionsfähigkeit
- Wirtschaftlichkeit (effizienter Einsatz von personellen und finanziellen Ressourcen)
- umweltschutztechnische und baubetriebliche Aspekte

Bei Wasserbauwerken gilt die Richtlinie (BMVBS 2010), welche vorschreibt, dass Schäden mit einer Schadensklasse unter implizierter Berücksichtigung zweier Kriterien Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu bewerten sind. Hierbei wird jedoch nur der aktuelle Zustand bewertet.

Gestützt auf die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 bzw. VV-WSV 2101 ist in den Methoden von BAW/WSV der Einzelschaden ebenfalls die Bewertungseinheit. Für Wasserbauwerke erfolgt die Bewertung gemäß (BMVBS 2010) durch die Einteilung in Schadensklassen (SK) 1 bis 4 anhand der Spezifikationen und repräsentativer Fotos für jeden Schadentyp. Es werden Teilnoten für folgende Kennwerte vergeben bzgl.

- Konstruktion
- Stahlbau
- Ausrüstung
- Korrosionsschutz
- Sonstiges

Je nach Mengenangabe des Schadens kann die Schadenklasse leicht modifiziert werden. Die Prüfnote wird als Kennzahl genutzt.

3.3 Nationaler Stand der Forschung

Auf nationaler Ebene entwickelten LEBHARDT et al. (2020) Konzepte zur Erstellung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems, welches für das Lebenszyklusmanagement von Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur genutzt werden kann. Die vorgeschlagene Methodik differenziert hierbei zwischen drei Teilprojekten:

- TP Objekt: Betrachtung eines Einzelobjekts als Bauwerk innerhalb eines Netzes
- TP Netz: Betrachtung der strategischen Planung von Prävention-, Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen auf der übergeordneten Netzebene
- TP Schnittstelle: Verknüpfung der Netzebene mit der Objektebene mit dem Ziel der Abstimmung zwischen strategischen und operativen Maßnahmen im Rahmen von LZM

Auf Objekt- und Netzebene wurden jeweils Kriterienkataloge erstellt, um eine indikatorgestützte Bewertung zu ermöglichen. Für die Objektebene wurden im Wesentlichen Kriterien für die Beschreibung des baulichen Objektzustands verwendet (vgl. Tabelle 3-1).

Dauerhaftigkeitskriterium	Indikator(en)	Messgröße(n)	Messmethode(n)
Korrosionswiderstand gegen Carbonatisierung	Überschneidung Integral Carbonatisierungstiefe/Bewehrungsüberdeckung	<ul style="list-style-type: none"> Carbonatisierungstiefe (Abstand von der Betonoberfläche) Bewehrungsüberdeckung Porosität/Permeabilität 	<ul style="list-style-type: none"> Phenolphthaleintest FerroScan Thermogravimetrie Röntgendiffraktometrie
Korrosionswiderstand gegen Chloride	Überschneidung Integral Chlorideindringtiefe/Bewehrungsüberdeckung	<ul style="list-style-type: none"> Chlorideindringtiefe (Abstand der nachweisbaren Chloride von der Betonoberfläche) Bewehrungsüberdeckung 	<ul style="list-style-type: none"> Ionenchromatografie Ionenselektive Elektrode FerroScan Porosität/Permeabilität
Sulfatwiderstand lösender Angriff	Lokaler Festigkeitsverlust	<ul style="list-style-type: none"> Druckfestigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Schmidthammer
Sulfatwiderstand treibender Angriff	Rissbildung	<ul style="list-style-type: none"> Anteil sulfathaltiger Minerale in der Zementmatrix 	<ul style="list-style-type: none"> Röntgendiffraktometrie
Widerstand gegen Auslaugung	Auslaugungsgrad	<ul style="list-style-type: none"> Calciumhydroxid-/Calciumcarbonatgehalt 	<ul style="list-style-type: none"> Thermogravimetrie Röntgendiffraktometrie
Widerstand gegen Frost-Tau-Angriffe	Luftporenanteil	<ul style="list-style-type: none"> Porosität (Porengrößenverteilung), Kapillarporenanteil Betonfeuchte Niederschlagsmenge 	<ul style="list-style-type: none"> Quecksilberdruckporosimetrie Elektronenmikroskopie
Alkali-Kieselsäure-Reaktions-Risiko	Gefügeveränderungen (Rissbildung, Ausblühungen und Gelausscheidungen)	<ul style="list-style-type: none"> Charakteristische Reaktionsränder an der Gesteinskörnung Innere Gelbildung (in Poren und Mikrorissen) 	<ul style="list-style-type: none"> Werkstoff- und Zuschlagsuntersuchungen mittels Dünnschliffmikroskopie

Tab. 3-1: Kriterienkatalog – baulicher Objektzustand (LEBHARDT et al. 2020)

Für eine Bewertung der Verkehrsinfrastruktur auf Netzebene wurden die in Tabelle 3-2 dargestellten Kriterien zur Funktions- und Leistungsfähigkeit vorgeschlagen.

Kriterium	Ziel	Indikator(en)	Datenquelle(n)
Zustandsnote	Bewertung des baulichen Zustands bei fehlender Dauerhaftigkeitsbewertung	Quantilwerte der festgestellten Zustandsnoten	Bestehende Systeme, bspw. ASB-ING oder WADABA
Dauerhaftigkeit	Einstufung der baulichen Zustandsbewertung auf Objektebene für das Netz	Quantilwerte der prognostizierten Restlebensdauer aller Objekte	Ergebnisse der Objektkriterien
Engpässe	Engpasswirkungen reduzieren	Zahl der Engpässe gemäß der im BVWP 2030 festgelegten Kriterien, siehe Kapitel 3.1.3	Behördeninterne Statistik
Verbindungszuverlässigkeit ¹	Externe Kosten (ökonomisch, sozial, ökologisch) durch Funktionsbeeinträchtigungen reduzieren	Standardabweichung der Reise- bzw. Fahrtzeit auf der Route	
Sperrungen	Funktionsbeeinträchtigungen durch Sperrungen reduzieren	Sperrungen pro Jahr	Behördeninterne Statistik

¹ Gemäß Methodenhandbuch wird unter [...] Zuverlässigkeit bzw. Unzuverlässigkeit in erster Näherung die Abweichung von einem erwarteten Mittelwert der Reise- oder Transportzeit bzw. einem Abweichen von der erwarteten Ankunftszeit verstanden (DAHL et al., 2016, S. 343–344)

Tab. 3-2: Bewertungskriterien auf Netzebene (LEBHARDT et al. 2020)

Das entwickelte Bewertungssystem stützt sich auf einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess (PDCA-Zyklus). Bei der Erprobung der entwickelten Methodik stellte sich die dafür benötigte Datengrundlage als kritischer Knackpunkt heraus. Es zeigte sich, dass der

barrierefreie Austausch, die Verarbeitung und die Interpretation der erhobenen Daten von Objekt- auf Netzebene noch Verbesserungspotenzial aufweisen, sodass diesbezüglich noch erheblicher Forschungsbedarf besteht (LEBHARDT et al. 2020).

Für Wasserbauwerke schlägt WEILER (2019) die Robustheit als wichtige Kennzahl zur Bewertung der Bauwerke an Wasserstraßen vor. Diese beschreibt die strukturelle Leistungsfähigkeit und ermöglicht die Vielzahl an verschiedenen Konstruktionsarten qualitativ effizient zu bewerten. In Verbindung mit den auslösenden Szenarien kann die Vulnerabilität von Bauwerken abgebildet werden.

3.4 Internationaler Stand der Forschung

Im Rahmen der COST-Action 1406 erarbeiteten mehrere Arbeitsgruppen (STRAUSS, MANDIC & IVANKOVIC 2016; HAJDIN, KUSAR, MASOVIĆ, LINNEBERG, AMADO, TANASIĆ 2018) eine Methodik für die Einführung von Key Performance Indikatoren (KPI) zur Anwendung innerhalb des Bauwerk-Managements.

Das Ziel der Arbeitsgruppe 1 (STRAUSS, MANDIC & IVANKOVIC 2016) war es, im Rahmen einer internationalen Forschungskoooperation diejenigen Leistungsindikatoren für Brückenbauwerke zu erforschen, die die mechanischen und technischen Eigenschaften und das Abnutzungsverhalten erfassen, die bereits teilweise in den Vorschriften und Regelwerken enthalten sind. Zu den Überlegungen gehörten auch Aspekte zu folgenden Punkten:

- natürliche Alterungsprozesse,
- Qualität des Materials,
- Methoden zur Bemessung der Lebensdauer,
- nachhaltige Indikatoren,
- umweltbezogene, wirtschaftliche und soziale Indikatoren,
- und Leistungsprofile.

Ziel der Arbeitsgruppe 1 war die Definition von Leistungsindikatoren für Brückenbauwerke, die Folgendes berücksichtigen können:

- a) Sicherheit: Lastfaktor, Zuverlässigkeitsindex
- b) Gebrauchstauglichkeit: Zustandsindex, Zuverlässigkeitsindex
- c) Verfügbarkeit, Robustheit
- d) Wirtschaftlichkeit: LCC-Analysen, Kriterien in Bezug auf Aspekte der Dauerhaftigkeit
- e) Umweltaspekte: CO₂-Fußabdruck

Das Ergebnis der Forschungsarbeit war die Erstellung einer Datenbank für Leistungsindikatoren für Europa, die flexibel genug ist, um länderspezifische Anforderungen zu berücksichtigen.

Im Rahmen der Arbeitsgruppe 2 wurde daraufhin eine Übersicht zu den Leistungszielen, für die zuvor in der Arbeitsgruppe 1 ermittelten Indikatoren erarbeitet. Dazu wurden technische Empfehlungen entwickelt, die die Leistungsziele spezifizieren. Diese Ziele können je nach technischen, ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Faktoren variieren.

Im Rahmen von europaweiten Expertenbefragungen sowie einem zuvor entwickelten Forschungsansatzes des niederländischen RAMSSHEEP-Projektes (RIJKSWATERSTAAT 2012, WAGNER & VAN GELDER 2014) konnten die in Bild 3-4 dargestellten Key Performance Indikatoren für das Bauwerksmanagement identifiziert werden. Zu erkennen ist, dass die KPI Zuverlässigkeit, Erhaltungsfreundlichkeit, Sicherheit, baulicher Zustand und Wirtschaftlichkeit am häufigsten bei den Infrastrukturbetreibern Anwendung finden.

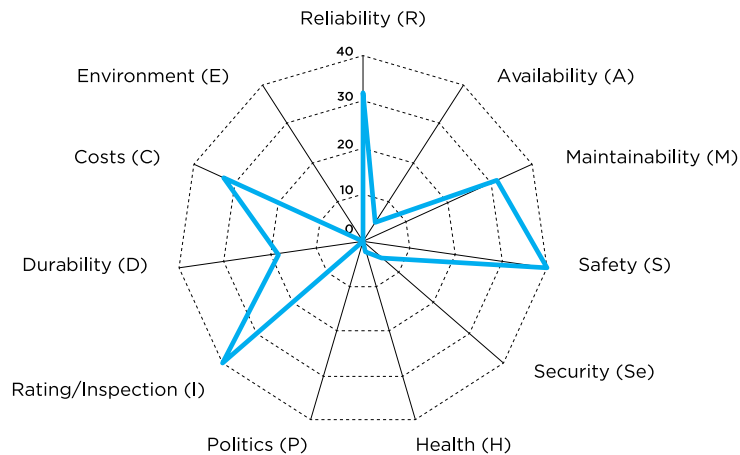


Bild 3-4: Absolute Häufigkeiten von verwendeten Key Performance Indikatoren (KPI) für das Bauwerksmanagement in Europa (STRAUSS et al. 2016)

Aufbauend auf den Ergebnissen der Arbeitsgruppen 1 und 2 sowie einer Untersuchung der in der Praxis bestehenden Ansätze erfolgte durch Arbeitsgruppe 3 (HAJDIN et al. 2018) die Entwicklung einer Methodik für die Erstellung von Qualitätssicherungsplänen (QS-Pläne) für verschiedene Brückentypen. Hierbei lag u. a. der Fokus auf der Berücksichtigung von Zustandsentwicklungen und Unsicherheiten innerhalb der Prozesse, die die Leistungsfähigkeit von Brücken erheblich beeinträchtigen können.

Als Ergebnis der Forschungsarbeit wurde eine Methodik zur Bewertung von Lebenszykluskosten eines Bauwerkes entwickelt, die sich auf die folgenden KPI stützt:

- Zuverlässigkeit
- Verfügbarkeit
- Sicherheit
- Wirtschaftlichkeit
- Umwelt

Mithilfe eines dreidimensionalen Spider-Diagramms konnte der zeitliche Verlauf der KPI grafisch dargestellt werden (vgl. Bild 3-5).

Die Autoren stellten fest, dass in Hinblick auf die Verbreitung einer anspruchsvollen Methode wie RAMSSHEEP sowie die praxisbezogene Anwendung dieser Kennzahlen die größte Hürde in der Datenverfügbarkeit besteht, welche derzeit noch spärlich ist und auch das fehlende Bewusstsein, um die Daten in guter Qualität zu erfassen (HAJDIN 2016). Eine direkte Bewertung der Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit wird als nicht kosteneffizient angesehen, da allgemein davon ausgegangen wird, dass sie immer eine eingehende Materialuntersuchung und Strukturanalyse erfordert (HAJDIN et al. 2018).

In einer weiteren Umfrage der PIARC zu innovativen Ansätzen innerhalb des Asset Managements wurden insgesamt 64 Experten aus 37 Ländern zur Verwendung von Leistungs-

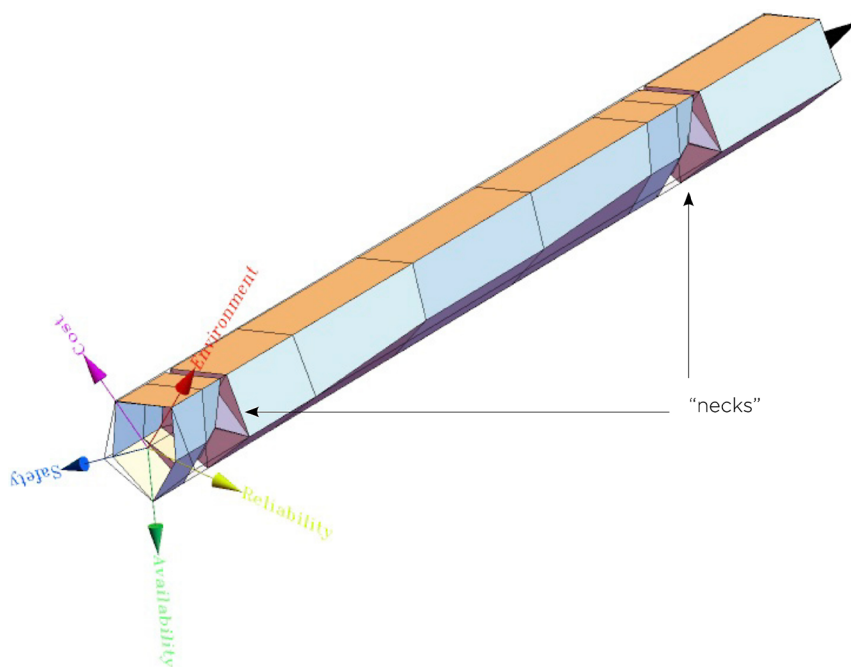
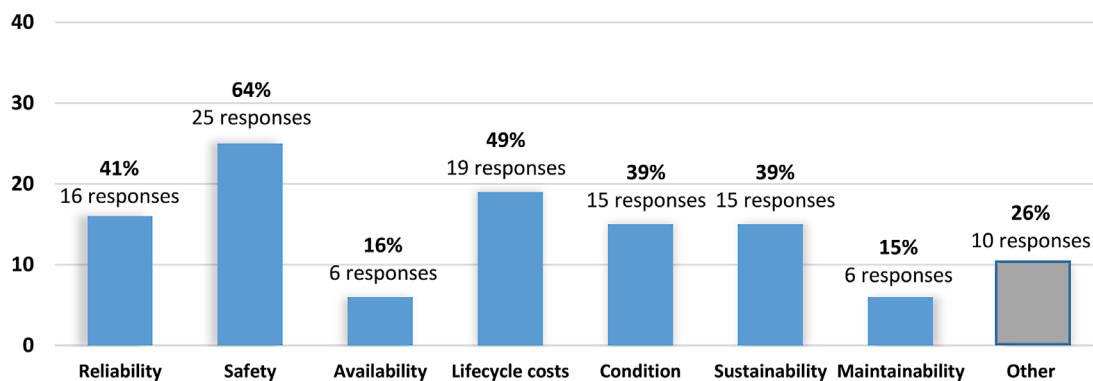


Bild 3-5: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der KPI Zuverlässigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Umwelt (HAJDIN et al. 2018)



“Other” (1 response per category, excl. Comfort which had 2 responses):

Comfort	Serviceability	Asset value	Value for money & Innovation	Accessibility & integration
	Environmental	Resilience and Prosperity	Budget	Customer care & Travel information

Bild 3-6: Absolute Häufigkeiten der PIs (HAJDIN 2019)

zielen und -indikatoren befragt. Hierbei zählten die Leistungsziele Sicherheit und Lebenszykluskosten zu den am häufigsten genannten Kriterien (vgl. Bild 3-6).

Die Ergebnisse der Umfrage zeigten, dass sich die befragten Institutionen zur Beurteilung ihrer Zielerreichung zumeist auf zustandsbasierte Ansätze stützen. Es ist jedoch zunehmend zu erkennen, dass neben dem rein zustandsbasierten Lebenszyklusmanagement zunehmend auch Ansätze mit weiteren KPI sowie Risiko-/Verletzlichkeitsmethoden eingesetzt werden.

3.5 Kapitelzusammenfassung

Im Rahmen der Zustandsbewertung der Infrastrukturbauwerke wird derzeit vor allem die Standsicherheit, die Verkehrssicherheit und die Dauerhaftigkeit herangezogen (SCHNELLENBACH-HELD, PEETERS & MIEDZINSKI 2015), welche als Schlüsselindikatoren verstanden werden können. Dieses System hat sich in Deutschland zwar sehr gut bewährt, weist aber aus heutiger Sicht einige Defizite auf. Die Standsicherheit (Tragsicherheit) und die Verkehrssicherheit gehören sicherlich zu Schlüsselindikatoren. Die Dauerhaftigkeit weist jedoch auf die verbleibende Nutzungsdauer hin, d. h. auf den Zeitpunkt, ab welchen die Standsicherheit nicht mehr gewährleistet ist. Versteht man die Standsicherheit als zeitlich veränderlichen Schlüsselindikator, so entfällt die Notwendigkeit für den Indikator Dauerhaftigkeit.

Die Literaturrecherche sowie die Befragung von Experten zeigt, dass die Zustandsnote bisher der am häufigsten verwendete Schlüsselindikator ist. Diese wird als Stellvertreter für die Versagenswahrscheinlichkeit genutzt, wobei jedoch die zugehörige Gefährdung nicht spezifiziert wird.

Ein weiterer Nachteil des gegenwärtigen Systems besteht darin, dass nur diejenigen Befunde, die visuell sichtbar sind, bei der Bewertung berücksichtigt werden. Verdeckte Mängel oder Aussagen zu Veränderungen in der inneren Konstruktion können nicht oder nur in sehr beschränktem Umfang erkannt und bewertet werden. Es gibt zwar Möglichkeiten, z. B. über eine objektbezogene Schadensanalyse (OSA) bzw. mithilfe der Nachrechnungsrichtlinie weitere Defizite zu identifizieren, bzw. Schäden besser einzugrenzen, dies erfolgt jedoch in der Regel nur im Einzelfall und ohne Zuordnung zur Netzebene.

Weiterhin besteht bisher keine systematische Herangehensweise wie Monitoringdaten bei der Bewertung berücksichtigt werden. Insbesondere finden die Monitoringanwendungen statt, wenn eine Schädigung bereits festgestellt wird. Gerade in diesen Situationen ist das größte Potenzial des Monitorings zu sehen, da die Restnutzungsdauer besser abgeschätzt werden kann.

Zur Bewertung von Infrastrukturbauwerken reichen die Standsicherheit und die Verkehrssicherheit nicht mehr aus, da auch weitere Aspekte berücksichtigt werden müssen. Das Bewertungsverfahren des BVWP 2030 besteht aus vier Modulen, welche zahlreiche ökonomische, ökologische und soziale Kriterien umfassen, welche wiederum auf diversen Indikatoren beruhen. Unabhängig davon, ob alle diese Kriterien praktisch anwendbar und für Brücken relevant sind, ist der Bedarf nach ökologischen und sozialen Schlüsselindikatoren offensichtlich. Die auf der Grundlage der von der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen entwickelten Methoden wurden im Rahmen von zahlreichen Forschungsvorhaben weiterentwickelt, um die Grundlage für ein Indikatorensystem zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Straßeninfrastrukturen zu schaffen (SCHMELLEKAMP 2016).

Der derzeitige Stand der Forschung auf nationaler und internationaler Ebene zeigt eine zunehmende Bedeutung von indikatorengestützten Bewertungsverfahren von Infrastrukturbauwerken. Die zunehmenden Anforderungen an die Bauwerke erfordern Methoden und Konzepte für ein effizientes Management der Infrastrukturbauwerke. Die Vielfalt an Anforderungen spiegelt sich in der großen Anzahl an Leistungszielen wider, die derzeit international zum Einsatz kommen. In Hinblick auf eine zukünftige Entwicklung und Einführung eines Lebenszyklusmanagements zeigt sich zum einen, die Verknüpfung zwischen Leistungszielen und Leistungsindikatoren als Herausforderung. Zum anderen ist der Datenbedarf zur Bestimmung von Schlüsselindikatoren recht groß. Es zeigt sich, dass

neben den im Rahmen von Inspektionen erhobenen Zustandsdaten, weitere Datengruppen von Bedeutung sind. Für einige Key Performance Indikatoren, wie z. B. die Verfügbarkeit, wird eine räumlich und zeitlich engmaschige Erhebung von Daten empfohlen, so dass es von Vorteil ist, wenn man die bereits eingesetzten Verfahren mit Monitoringdaten erweitert.

4 Entwicklung eines Kennzahlensystems

4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel erfolgt die Entwicklung eines Kennzahlensystems für die Anwendung innerhalb eines Lebenszyklusmanagements für Bauwerke. Ziel ist es, neben der generellen Forschungs- und Entwicklungstätigkeit an dem Bewertungssystem vor allem auch ein wissenschaftlich fundiertes und dennoch für die praktische Anwendung taugliches Werkzeug zu erarbeiten, mit dem die externen Effekte wirkungsvoll in das Gesamtkonzept integriert werden können (SCHMELLEKAMP 2016).

Die Systematik der Indikatoren für eine zuverlässigkeits- und risikobasierte Bewertung von Infrastrukturbauwerken baut auf den Ergebnissen der bisher erarbeiteten Indikatorenliste der BASt auf und wird im Folgenden weiterentwickelt bzw. konkretisiert. Diese soll um Zuverlässigkeits-, Risiko- und Resilienzindikatoren erweitert werden. Aufgrund des Umfangs der bereits erfassten Daten der Datenbanken, wie z. B. SIB-Bauwerke, ist es wichtig, dass die zu entwickelnde Systematik auf dieser Grundlage aufbaut. Die Bewertung der einzelnen Schäden, welche in den Informatikanwendungen erfasst werden, bietet eine gute Grundlage für die zuverlässigkeits- und risikobasierte Bewertung der Infrastrukturbauwerke.

Zunächst erfolgt die Definition von wichtigen Begriffen, die im Kontext des Kennzahlensystems Verwendung finden (Kapitel 4.2). Im Anschluss daran wird in Kapitel 4.3 die Systematik zur Verknüpfung von Leistungszielen, Leistungsindikatoren und Indikatoren erläutert sowie in Kapitel 4.4 die verwendeten Schlüsselindikatoren des Kennzahlensystems vorgestellt und deren Integration in ein Lebenszyklusmanagement aufgezeigt (Kapitel 4.5).

Darauf aufbauend wird in Kapitel 4.6 die in dieser Forschungsarbeit angewendete Methodik zur Beurteilung der Zuverlässigkeit eines Bauwerks konkretisiert. Mit geeigneten Mitteln, wie z. B. Bayes'schen Netzen, kann man die Daten in den Informatikanwendungen, welche teils qualitativ und teils quantitativ sind, wesentlich besser nutzen. Es soll beachtet werden, dass die visuellen Bauwerksprüfungen durch gut geschultes Personal in absehbarer Zeit die wirtschaftlichste Methode zur Bewertung von Bauwerken bleiben wird. Der Wert der Information, welche durch die visuelle Bauwerksprüfung gewonnen wird, übersteigt v. a. bei einfacheren Bauwerken jenen, welcher durch andere aufwendigere Prüfungen (z. B. Monitoring) erhalten werden kann. Dies bedeutet, dass der Einsatz von bspw. Drohnen die visuelle Bauwerksprüfung keineswegs ersetzen, sondern vielmehr unterstützen kann. Andererseits wird es als zweckmäßig erachtet ebenfalls zu analysieren, aufgrund welcher weiterer (nicht in den Daten der SIB-Bauwerke enthaltenen) Informationen die Qualität der Zuverlässigkeits- und Risikoindikatoren verbessert werden kann. Anhand von Sensitivitätsanalysen soll eruiert werden, welche Informationen/Daten die maßgebenden sind. Da die Betrachtungen probabilistischer Natur sind, ist es wichtig dies in der Sensitivitätsanalyse mit zu berücksichtigen. Hierzu werden Bayes'sche Netze genutzt, zu deren Bildung das Fachwissen der Experten des Projektteams verwendet wird. Die Bedeutung einzelner Indikatoren wird bestimmt, indem die Auswirkungen eines Informationsupdates berechnet werden. Sofern der Aufwand zur Beschaffung der weiteren Informationen bedeutend sein sollte, wird anhand des Ansatzes zum Wert der Information bestimmt ob dieser lohnenswert ist. Durch die Verwendung des beschriebenen probabilistischen An-

satzes wird sichergestellt, dass die Systematik einerseits für Einzelbauwerke aber auch für Bauwerksnetze anwendbar ist.

Das Kapitel endet mit einer Zusammenstellung und Verknüpfung von Indikatoren für die einzelnen Schlüsselindikatoren. Dazu werden die durchgeführten Arbeitsschritte an der Indikatorenliste erläutert und die Ergebnisse zusammenfassend aufbereitet (Kapitel 4.7).

4.2 Begriffsdefinitionen

In diesem Abschnitt werden die für die weiteren Ausführungen wichtigsten Begriffe definiert. Dies ist erforderlich, da gewisse Begriffe und Konzepte unter Fachleuten oft unterschiedlich verwendet bzw. verstanden werden. Im Folgenden werden wichtige Begriffe und deren inhaltliche Bedeutung erläutert, die innerhalb dieses Berichtes Verwendung finden.

4.2.1 Leistungsziele

Leistungsziele (engl. Performance Goals) sind als benutzer- bzw. gesellschaftsorientiert definiert. In der Literatur werden diese Leistungsziele oft als übergeordnete oder strategische Leistungsziele definiert. Demgegenüber stehen die Leistungsziele auf der Ebene der einzelnen Bauwerke oder Bauwerksteilen. Die größte Herausforderung im Lebenszyklusmanagement besteht darin die strategischen Leistungsziele mit jenen auf der Bauwerksebene rational zu verknüpfen. Dies gestaltet sich in der Regel als sehr schwierig, so dass man oft auf qualitative Leistungsziele bzw. auf zugehörige Leistungsindikatoren zurückgreift. Leistungsziele sollten ein optimales Gleichgewicht zwischen den Erwartungen des Infrastrukturbetreibers, den Nutzenden sowie Dritten und den mittel- bis langfristig verfügbaren finanziellen Mitteln sicherstellen.

4.2.2 Schlüssel-Leistungsindikatoren

Schlüsselindikatoren (engl. Key Performance Indicator (KPI)) bilden die oberste Hierarchieebene der Leistungsindikatoren (PI), wobei in der Praxis keine klare Unterscheidung zwischen KPIs und PIs vorhanden ist. KPIs zeigen an, ob ein Bauwerk die definierten Leistungsziele erfüllt.

Liegt z. B. die zulässige Tragfähigkeit einer Brücke unter dem maximalen Gewicht der Straßenfahrzeuge, so erfüllt die betreffende Brücke die Leistungsziele nicht und ihr Befahren muss eingeschränkt werden. Alternativ kann eine Verstärkungsmaßnahme eingeleitet werden. Zum Zeitpunkt des Neubaus kann man davon ausgehen, dass die Schlüsselindikatoren die Leistungsziele problemlos erfüllen.

4.2.3 Leistungsindikatoren

Leistungsindikatoren (engl. Performance Indicators (PI)) messen diverse, für die Leistungsbeurteilung eines Bauwerks maßgebende Eigenschaften und können hierarchisch aufgebaut werden. Insbesondere bei Bauwerken wird die Zustandsnote als Leistungsindikator verwendet. Ein Leistungsziel bezieht sich immer auf einen Leistungsindikator aber Leistungsindikatoren müssen nicht unbedingt einen direkten Bezug zu einem Ziel haben. Leistungsindikatoren können zur Bestimmung von Schlüsselindikatoren verwendet werden, wobei es sich in vielen Fällen semantisch um keine Leistungsindikatoren handelt, sondern um Beobachtungen und Befunde (HAJDIN 2016).

4.2.4 Eigenschaften

Inhärente bauwerksspezifische Merkmale beschreiben Eigenschaften von Netzen, Bauwerken oder einzelnen Bauteilen (z. B. geometrische Eigenschaften, verwendete Materialien, Bauweise).

4.2.5 Beobachtungen/Messungen/Befunde

Unter einem Befund wird eine Information aus einer primären Quelle, die durch Beobachtungen oder durch Messungen/Aufzeichnungen einiger Eigenschaften mithilfe geeigneter Instrumente erfasst werden kann. Beobachtungen können qualitativ sein, d. h. es wird nur das Fehlen oder Vorhandensein einer Eigenschaft vermerkt, oder quantitativ, wenn ein Zahlenwert durch Zählen oder Messen an das beobachtete Phänomen gekoppelt wird. Die Beobachtung ist eine menschliche Sinneswahrnehmung oder mit einem Instrument gemessene Daten, die im Kontext der Untersuchung als relevant angesehen werden. Ein Betonriss ist bspw. kein Leistungsindikator, sondern ein Befund, welcher zur Bestimmung eines Leistungsindikators, z. B. der Zuverlässigkeit, von Bedeutung ist.

4.2.6 Symptome

Symptome leiten sich aus Beobachtungen ab. Sie zeigen zwar eine bestimmte Eigenschaft am Bauwerk an, lassen jedoch nicht direkt, d. h. nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, auf einen Schaden bzw. eine Schadensursache schließen. Sie geben vielmehr einen Hinweis darauf, dass ein oder mehrere Schadensprozesse am Bauwerk ablaufen.

4.2.7 Schäden

Ein Schaden im Sinne der Bauwerksprüfung ist die Änderung des Bauwerks- oder Bauteilzustandes und kann zu einer Beeinträchtigung der Standsicherheit, der Verkehrssicherheit im Laufe der Zeit führen. Die Bewertung von Schäden sollte nach den drei Kriterien Schadensart, Ort des Schadens und Schadensausmaß erfolgen (BMVI 2017b). Eine Schadeigenschaft ist eine im Laufe der Zeit sich verändernde Kenngröße zur Beschreibung der Geometrie und Ausmaß von Schäden (z. B. Risslänge, Rissbreite, betroffene Fläche).

4.2.8 Schadensprozesse

Im Verlauf der Nutzungsdauer existiert eine Vielzahl an Prozessen, die sich schädigend auf ein Bauwerk auswirken können (vgl. Tabelle 4-1). In Anlehnung an HAJDIN et al. (2018) werden solche Prozesse als Schadensprozesse bezeichnet, die einzeln oder in Kombination zu Sicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsproblemen führen können. Die Informationen über Schadensprozesse sind entscheidend für eine Leistungsvorhersage, die Planung der vorbeugenden Instandhaltung sowie für die Planung einer eventuellen Sanierung. Einige Schadensprozesse sind allmählich und beobachtbar (z. B. Korrosion bei Baustahl). Diese können mit einer geeigneten Inspektionsstrategie erkannt werden. Andere Schadensprozesse sind allmählich und nicht beobachtbar (z. B. Korrosion von Spannstahl). Diese sollten durch eine geeignete Instandhaltungsstrategie behandelt werden. Durch zuverlässige Informationen über die Prozesse können Inspektions- und Instandhaltungsstrategien optimiert werden (z. B. Reduzierung der Lebenszykluskosten und der Verkehrsbeeinträchtigung). BIEN, GLADYSZ-BIEN, KUZAWA & KAMINSKI (2016) verwendeten drei Kategorien, die physikalische, chemische oder biologische Schadensprozesse beinhalten.

Nummer	Schadensprozess	Material			Auswirkung			
		Beton	Stahl	Mauerwerk	Geometrieänderung	Änderung der Integrität	Änderung von Materialeigenschaften	Verhaltensänderung
1	Abnutzung	X	X	X	X	X		
2	Aggradierung	X	X	X				X
3	Erosion	X	X	X	X	X		X
4	Lochfraß Korrosion	X	X		X	X	X	
5	Änderung der geotechnischen Eigenschaften	X	X	X	X	X		X
6	Materialalterung	X	X	X	X	X	X	
7	Alkali-Kieselsäure-Reaktion	X			X	X	X	
8	Chemische Reaktionen	X	X	X	X	X	X	
9	Korrosion von vorgespannten Stahlbauteilen	X	X		X	X	X	
10	Korrosion der Bewehrung	X			X	X	X	
11	Korrosion des Baustahls		X		X	X	X	
12	Ermüdung	X	X			X	X	
13	Sulfat Reaktion	X			X	X	X	
14	Korrosion von Equipment aus Stahl	X	X		X	X	X	
15	Korrosion von Befestigungs- und Verbindungsbauteilen	X	X		X	X	X	
16	Überladung eines Elements	X	X	X	X	X		X
17	Pflanzenbewuchs	X	X	X	X	X	X	X
18	Frost-Tau-Wechsel	X		X	X	X	X	
19	Hohe Temperaturen		X		X	X	X	

Tab. 4-1: Übersicht an Schadensprozessen (HAJDIN et al. 2018)

4.2.9 Einflussfaktoren

Aufgrund der ständigen mechanischen und klimatischen Beanspruchung von Bauwerken sind diese einem Verschleiß unterworfen, der zu einer Schädigung des Bauwerks führen kann. Zu den bedeutendsten Ursachen bzw. Einflussfaktoren zählen die Verkehrsbelastung bzw. die Lastwechselanzahl. Weiterhin wirken die vorhandenen Randbedingungen, wie z. B. klimatische Bedingungen, Grundwasserströmungen und die

Baugrundeigenschaften, auf die Schädigungsrate eines Bauwerks bzw. einzelner Bauteile ein.

4.2.10 Bewertungen

Unter Bewertungen sind Kennzahlen zu verstehen, die aus Messgrößen oder Beobachtungen berechnet bzw. hergeleitet werden. Dazu zählt bspw. das voraussichtliche Nutzungsende eines Bauwerks bzw. die daraus abgeleitete Restnutzungsdauer. Eine Bewertung kann ein PI sein, wenn es eine Verknüpfung mit der Versagensart gibt (z. B. via Verlust der Tragfähigkeit).

4.2.11 Plötzliche Ereignisse

Zu plötzlichen, nicht planbaren Ereignissen zählen Extremwetterereignisse wie z. B. Hoch- oder Niedrigwasser, Eis oder auch Unfälle, die zu Ausfallzeiten an den betroffenen Anlagen führen können. Diese resultieren aus den Einwirkungen der zuvor genannten Einflussfaktoren.

4.2.12 Gefährdete Bauteile (-bereiche)

Dies sind die Segmente und/oder Elemente einer Brückenkonstruktion, in denen Schäden den größten Einfluss auf die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit haben. Gefährdete Bauteile (-bereiche) können mit mehreren Versagensarten verbunden sein.

4.2.13 Versagensarten

Versagensarten sind quasi-permanente oder transiente Situationen, die gegen die Vorschriften der Regelwerke oder die Bestimmungen des Eigentümers/Betreibers verstoßen. Dies beinhaltet, ist aber nicht beschränkt auf den Gesamteinsturz der Brücke. Einige dieser Situationen, z. B. Grenzzustand der Tragfähigkeit und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, sind im Brückenentwurf festgelegt. Aufgrund von langsamen (Verschlechterung) und plötzlichen (z. B. Naturereignis) Prozessen können Schäden auftreten, die zu zusätzlichen Versagensarten führen. Schließlich können Eigentümer/Betreiber Situationen definieren (z. B. Abplatzungen, Korrosionsspuren usw.), die als Versagensmodi betrachtet werden, da sie die öffentliche Wahrnehmung der Sicherheit umfassen können.

4.2.14 Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm definiert Ort, Art, Dauer, Kosten und andere Daten, die die darin enthaltenen Maßnahmen definieren. Auf Basis der aktuellen und zukünftigen Werte der PI und KPI werden Erhaltungsmaßnahmen an den Anlagen geplant, um die Leistungsziele zu erfüllen.

4.2.15 Generalisierte Verbindung der Begriffe – eine Leistungsbewertung

Jeder der oben genannten Begriffe spielt eine Rolle bei der Leistungsbewertung, die im Allgemeinen auf zwei Ebenen durchgeführt wird: auf der Ebene der Anlagen und auf der Netzebene. Die Bewertung auf der Anlagenebene kann sowohl statisch (d. h. eine Bewertung der Qualität zu einem Zeitpunkt) als auch dynamisch (Bewertung der Qualität über mehrere Zeitpunkte) erfolgen, während die Leistung auf der Netzebene nur im Zeitverlauf bewertet werden sollte.

Die Leistungsbewertung auf der Anlagenebene ist in Bild 4-1 dargestellt und wird im Folgenden kurz erläutert. Allen Infrastrukturanlagen gemeinsam ist die Inspektion, deren Ziel es ist, Schäden oder Symptome als mögliche Ursachen für aktuelle oder zukünftige Leistungsdefizite einer Anlage zu identifizieren. Die Entwicklung von Schäden/Symptomen wird durch einen oder mehrere Schadensprozesse, die Zeit und (lokale) Einflussfaktoren bestimmt. Die an den gefährdeten Zonen eines Bauwerks identifizierten Schäden wirken sich auf ein oder mehrere Ausfallszenarien aus, was durch Leistungsindikatoren (Bewertungen) ausgedrückt wird. Ein oder mehrere Leistungsindikatoren können wiederum für die Bewertung eines KPI verwendet werden. Die KPI-Bewertung kann auf die gleiche Art und Weise sowohl für aktuelle als auch für prognostizierte Schäden durchgeführt werden. Zu den wichtigsten KPIs zählen die Zuverlässigkeit und die Nutzersicherheit (siehe Kapitel 4.4.1 und 4.4.2).

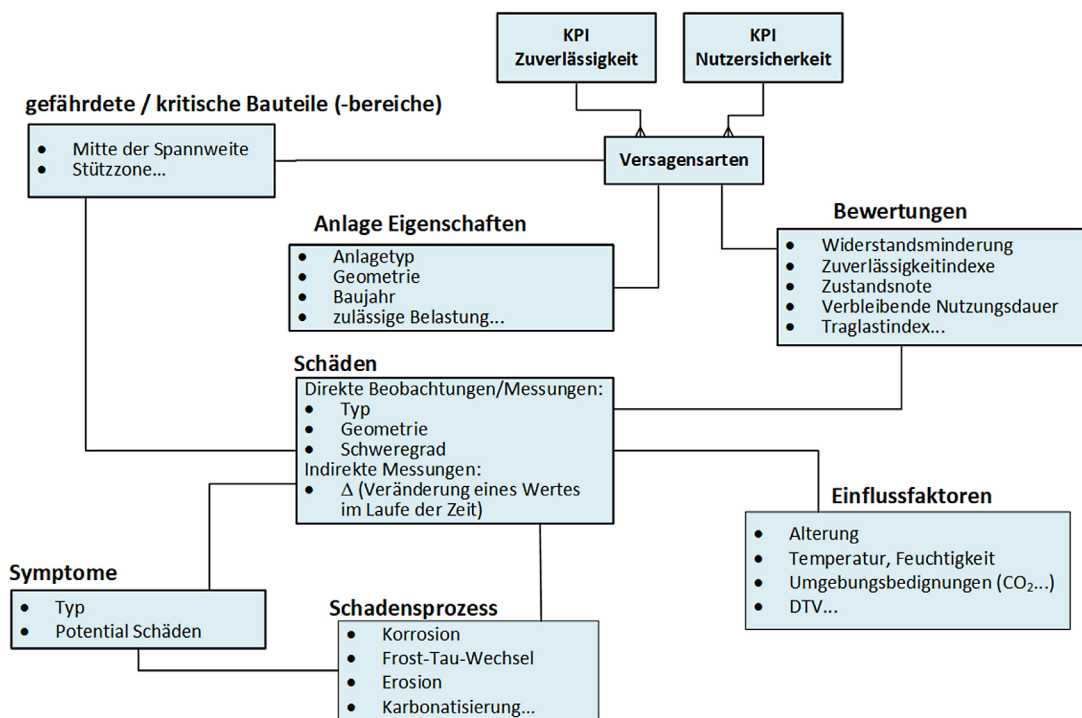


Bild 4-1: Begriffsverknüpfung auf der Ebene einer Anlage

Beispielsweise sei ein Riss mit einer bestimmten Breite in der Mitte der Spannweite eines Brückenhauptträgers festgestellt worden. Der beobachtete Schaden befindet sich in einer gefährdeten Zone des Trägers, die mit einem Durchbiegeversagen verbunden ist. Es ist unter Umständen sinnvoll, die Widerstandsminderung des Trägers aufgrund dieses Risses zu modellieren, um die Auswirkungen auf das Versagenszenario und damit auf den KPI der Zuverlässigkeit zu bewerten. Dies kann auf verschiedene Methoden erfolgen, eine Möglichkeit ist die Bewertung eines Zuverlässigkeitsindexes. In diesem Fall kann der Zuverlässigkeitsindex als Leistungsindikator verstanden werden, da sich sein Wert im Laufe der Zeit ändern kann und er direkt den KPI Zuverlässigkeit bestimmt. Ein weiteres Beispiel ist, dass der erwähnte Riss zu einer Ablösung führen kann, wodurch ein Betonteil auf die Straße unter der Brücke fällt, was als Versagensart im Zusammenhang mit dem KPI Nutzersicherheit angesehen werden kann.

Es kann jedoch auch andere Schäden an der Brücke geben, die sich auf verschiedene Versagensarten desselben KPIs beziehen (z. B. ein Biegebruch), und in solchen Fällen sollte eine dominante Versagensart ermittelt oder ein Gewichtungsverfahren angewendet werden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass nur eine angemessene Folgenanalyse, d. h. ein risikobasierter Analyseansatz, die Kombination verschiedener KPI ermöglicht, was jedoch nicht Gegenstand des Projekts ist.

Die Leistungsbewertung auf Netzebene ist in Bild 4-2 dargestellt. Die Instandhaltungsplanung basiert zunächst auf der Prognose zweier KPI (Zuverlässigkeit, Nutzersicherheit) für jedes der betrachteten Anlagenteile. Das Erhaltungsprogramm für das analysierte Netz umfasst dabei Instandhaltungsmaßnahmen pro Anlage, die geplant werden, um die zugehörigen KPI-Werte über ein Zeitintervall innerhalb gewünschter Schwellenwerte zu halten. Die Wirksamkeit der Maßnahmen sollte bekannt sein, um die zeitliche Entwicklung der Anlagen-KPIs zu definieren. Die Instandhaltungsmaßnahmen an Anlagen können gleichzeitig oder nicht gleichzeitig durchgeführt werden. Die Erhaltungsaktivitäten verursachen Verkehrsstörungen mit Auswirkungen auf Verkehrsteilnehmer, Sozioökonomie und Ökologie. Die Verkehrsbeeinträchtigung in einem Netz wird im Vergleich zum Zustand ohne

Maßnahmen bewertet. Es gibt verschiedene Methoden zur Bewertung der Störungen, d. h. entweder direkt durch Messungen und/oder indirekt durch Simulationen, und die erhaltenen Werte werden zur Bewertung relevanter KPI für die Netzebene verwendet. Die beiden in der Praxis gebräuchlichen KPI sind Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit (siehe Kapitel 4.4.3 und 4.4.4).

Als Beispiel wird angenommen, dass es ein Teilnetz gibt, das aus mehreren Anlagen besteht, von denen ein analysierter Teil einer Brücke, eine Fahrbahn und einen Tunnel umfasst. Wenn ein Fahrstreifen auf einer Brücke temporär gesperrt wird, um eine Erhaltungsmaßnahme durchzuführen, führt dies zu einer zusätzlichen Reisezeit für die Verkehrsnutzer aufgrund der reduzierten Geschwindigkeit/Kapazität innerhalb des Baustellenbereichs. Die zusätzliche Reisezeit kann als Leistungsindikator verwendet werden, der den Wert des KPI für die Verfügbarkeit bestimmt, es können aber auch andere Indikatoren zusätzlich oder stattdessen verwendet werden. Wenn es aufgrund der durchgeführten Tätigkeit zu Beeinträchtigungen kommt, kann es sein, dass die Verkehrsnutzer mit ihren Fahrzeugen mehr CO₂ emittieren als üblich, d. h. im Vergleich zu dem Fall, dass keine Instandhaltung stattfindet. Außerdem kann es vorkommen, dass sich einige Verkehrsnutzer für eine Umleitungsstrecke entscheiden, um Staus zu umgehen, was zu einer höheren Lärmbelastung und zu einer längeren Fahrtstrecke führen kann. Die letztgenannten und ähnliche Auswirkungen (Umweltverschmutzung) können zur Bewertung des KPI der Nachhaltigkeit herangezogen werden.

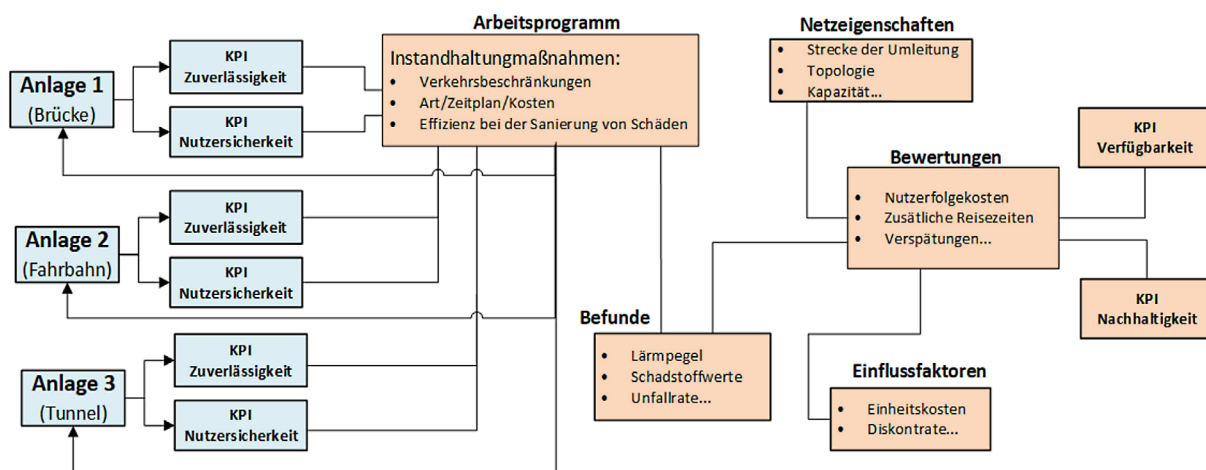


Bild 4-2: Begriffsverknüpfung auf der Netzebene

4.3 Verknüpfung von Leistungszielen, -indikatoren und bauwerkspezifischen Indikatoren

Im Zuge der Ermittlung der relevanten bauwerksspezifischen Indikatoren müssen diese mit Leistungszielen und -indikatoren verknüpft werden. Dies erfolgt auf Basis der folgenden Arbeitsschritte, die in den anschließenden Unterkapiteln erläutert werden:

1. Definieren von entscheidenden Leistungszielen (z. B. Verkehrssicherheit, Gebrauchstauglichkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit etc.), die für eine netzweite Bewertung verwendet werden können (Kapitel 4.4).
2. Kategorisierung der Leistungsindikatoren in Bezug auf die Leistungsziele (auf verschiedenen Ebenen: Bauteil/Bauteilgruppe, Bauwerk, Netzwerk; unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte: technisch, nachhaltig, sozioökonomisch) (Kapitel 4.7). Dies umfasst sogenannte Schlüsselindikatoren (Kapitel 4.4), d. h. netzbezogene Indika-

toren, die den Erfüllungsgrad von definierten Kriterien messen. Die Erfüllung dieser Kriterien ist wiederum die Voraussetzung, um die verkehrspolitischen Ziele zu erreichen.

3. Indikatoren für bauwerksspezifische Eigenschaften

Auf der Bauwerksebene sind entsprechende Indikatoren zu ermitteln, die bspw. für eine Beurteilung des Bauwerkszustandes oder zur Beschreibung einer inhärenten Bauwerkeigenschaft verwendet werden können. (Kapitel 4.7)

Bild 4-3 zeigt die Vorgehensweise für eine generische Verknüpfung von bauwerksspezifischen Eigenschaften mit Leistungsindikatoren (PI) sowie mit zu definierenden Schlüsselindikatoren (KPI).

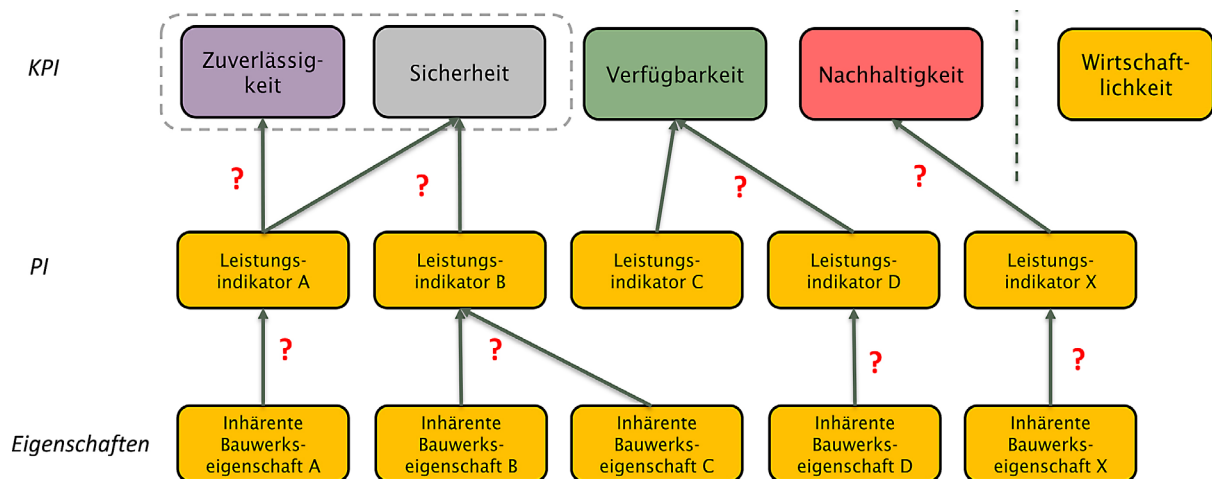


Bild 4-3: Verknüpfung von Eigenschaften zu Indikatoren (PI) und zu Schlüsselindikatoren (KPI)

4.4 Bestimmung von Leistungszielen bzw. Schlüsselindikatoren

Im Folgenden werden die ausgewählten Key Performance Indikatoren (KPI) sowie anschließend in Kapitel 4.7 untergeordnete Performance Indikatoren (PI) vorgestellt. Die verwendeten Schlüsselindikatoren sind:

- Zuverlässigkeit (Kapitel 4.4.1)
- Sicherheit für Nutzer und Dritte (Kapitel 4.4.2)
- Verfügbarkeit (Kapitel 4.4.3)
- Nachhaltigkeit (Kapitel 4.4.4)

Die Wirtschaftlichkeit (Kapitel 4.4.5) wird aus dem Bewertungssystem separiert, um eine Trennung zwischen Wirksamkeit von Maßnahmen und Kosten zu ermöglichen. Diese beinhaltet neben den reinen Baukosten auch Planungs- und Betriebskosten sowie indirekte (volkswirtschaftliche) Kosten.

4.4.1 Zuverlässigkeit

Unter Zuverlässigkeit wird die Wahrscheinlichkeit verstanden, dass ein Objekt (z. B. ein Brückenbauwerk) während seiner Nutzungsdauer funktionsfähig ist. Sie ist der Gegensatz zur Wahrscheinlichkeit eines strukturellen Versagens (Sicherheit), eines betrieblichen Versagens (Gebrauchstauglichkeit) oder einer anderen Ausfallart.

Die Funktion eines Bauwerks kann durch sehr unterschiedliche Szenarien teilweise oder vollständig eingeschränkt werden. Diese Funktionsfähigkeit kann für alle denkbaren Szenarien

narien als Grenzfunktion beschrieben werden und ergibt sich als Differenz der Auswirkung einer oder mehrerer Einwirkungen $E_{s,f}(x)$ und des Widerstandes $R_{s,f}(x)$:

$$G_{s,f}(x) = R_{s,f}(x) - E_{s,f}(x)$$

Ist diese Differenz kleiner als Null, erfüllt das Bauwerk die Funktion f nicht. Im Laufe der Zeit gerat ein Bauwerk in mannigfaltige Situationen und gewisse Situationen können zum teilweisen oder vollständigen Versagen führen. Die Wahrscheinlichkeit eines Versagens innerhalb einer bestimmten Zeitdauer hängt von der Auftretenshäufigkeit der Situationen ab, welche die Funktionserfüllung eines Bauwerks beeinträchtigen können.

Die probabilistische Gegenüberstellung von Einwirkung und Widerstand (vgl. Bild 4-4) bildet die Grundlage zur Beurteilung der Zuverlässigkeit eines Bauteils, eines Bauwerks oder eines Netzabschnittes.

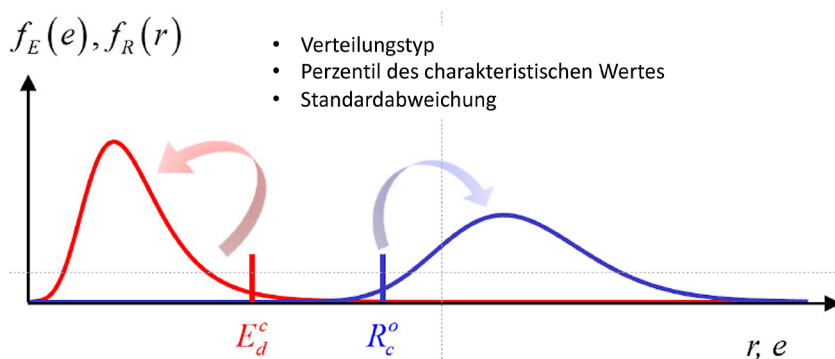


Bild 4-4: Grafische Gegenüberstellung von Einwirkung (E) und Widerstand (R) mithilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit p beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Realisierung, d. h. bei einem Ereignis die Einwirkungen die Widerstände überschreiten. Die Zuverlässigkeit eines Bauwerks innerhalb einer bestimmten Zeitdauer T in Jahren wird anhand der berechneten Versagenswahrscheinlichkeit berechnet zu:

$$Z = (1 - p)^T$$

Die Versagensrate (Failure rate) ergibt sich schließlich aus dem Kehrwert der jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit:

$$T = \frac{1}{p}$$

Die Zuverlässigkeit kann auch mit einer Versagens-Wiederkehrperiode ausgedrückt werden. Je größer die Versagenswiederkehrperiode ist, desto zuverlässiger ist das Bauwerk. Die Zuverlässigkeit kann sowohl für einzelne Bauteile und Bauteilgruppen sowie für ganze Bauwerke und Streckenabschnitte ermittelt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik zur Ermittlung der Zuverlässigkeit ist Kapitel 4.6 zu entnehmen. Berücksichtigt man neben der Zuverlässigkeit eines Bauwerks bzw. eines Streckenabschnittes auch die Konsequenzen seines Versagens, kann man das Risiko ermitteln, welches als Schlüsselindikator genutzt werden kann.

4.4.2 Sicherheit für Nutzer und Dritte

Die Sicherheit für Nutzer eines Bauwerks und Dritte ist ein Maß für die Bauwerksausbildung nach anerkannten Regeln der Technik zum jeweiligen Prüfungszeitpunkt, welche die Anforderungen an Sicherheit und Ordnung hinsichtlich der gefahrlosen und bestimmungsgemäßen Nutzung des Bauwerkes beinhaltet. Sie umfasst daher sowohl die

Sicherheit für Verkehrsteilnehmende und Fahrzeuge als auch die Sicherheit für Personen und Sachen im Bauwerksumfeld. Dabei wird eine verständige, unter Würdigung der äußeren Umstände gebotene Vorsicht und die im Verkehr übliche Sorgfalt der Verkehrsteilnehmer vorausgesetzt.

Die Verkehrssicherheit ist gegeben, wenn das Bauwerk keine oder lediglich geringfügige Mängel/Schäden aufweist, die keinen Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben und im Rahmen der planmäßigen Bauwerksunterhaltung behoben werden können. Sie ist weiterhin gegeben, wenn der Bauwerksnutzende die Gefährdung rechtzeitig erkennen kann bzw. wenn die Verkehrsteilnehmenden in geeigneter Weise auf Gefährdungen besonders hingewiesen und damit zu erhöhter Vorsicht angehalten werden.

Die Verkehrssicherheit ist hingegen nicht mehr gegeben, wenn das Bauwerk Mängel bzw. Schäden aufweist, von denen eine für Nutzer nicht erkennbare Gefahr bei der planmäßigen Bauwerksnutzung ausgeht.

4.4.3 Verfügbarkeit

Unter Verfügbarkeit wird der prozentuale Anteil an Zeit innerhalb eines Zeitintervalls verstanden, in der ein Bauwerk die ihm zugewiesene Funktion erfüllt. Es ist hierbei unerheblich, ob die Funktionsausfälle infolge von geplanten Wartungsarbeiten oder infolge eines Versagens verursacht werden. Die Verfügbarkeit lässt sich wie folgt berechnen:

$$\eta = \frac{\tau - t_{\text{Ausfall}}}{\tau}$$

Das betrachtete Zeitintervall ist τ und t_{ausfall} steht für die Ausfallzeit. Geht man davon aus, dass das System nur durch Versagen, d. h. nicht durch die geplanten Wartungsarbeiten, nicht verfügbar ist, und dass es immer wieder vollständig instandgesetzt oder ersetzt wird, dann lässt sich eine Beziehung zwischen der Versagensrate/Wiederkehrperiode und der Verfügbarkeit ableiten:

$$\eta = \frac{T}{T + t_r}$$

Die Wiederkehrperiode eines Versagens T ist bereits im Kapitel 4.4.1 definiert und t_r bezeichnet die Dauer der Instandsetzung bzw. des Ersatzes. Diese Verfügbarkeit wird als stationäre Verfügbarkeit bezeichnet und lässt sich durch

- die Reduktion der Versagensrate bzw. die Verlängerung der Wiederkehrperiode und/oder
 - die Verkürzung der Dauer der Instandsetzung
- günstig beeinflussen.

Bei Infrastrukturbauwerken wird die Verfügbarkeit als ein leicht zu kommunizierender Indikator oft als Zielvorgabe verwendet. So werden in den Vereinbarungen im Rahmen von Public-Private-Partnerships (PPP) oft Anforderungen an die Verfügbarkeit definiert. Es gilt allerdings zu berücksichtigen, dass bei Bauwerken die Nutzung aus verschiedenen Gründen oft eingeschränkt wird, so dass sie beispielsweise nur für bestimmte Fahrzeuge zur Verfügung stehen.

Alternativ kann die Verfügbarkeit auch als zusätzliche Reisezeit aufgrund von z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen auf dem Brückenbauwerk ermittelt werden. Durch Verkehrseinschränkungen entstehen für die Nutzer externe Kosten in Form von zusätzlichen Aufwendungen in Form von Zeitverlusten, dem Mehrverbrauch von Kraftstoffen oder durch ein verändertes Unfallgeschehen (SCHMELLEKAMP 2016; SCHIFFMANN et al. 2020).

4.4.4 Nachhaltigkeit

Der Begriff Nachhaltigkeit umfasst ökologische, ökonomische und soziokulturelle sowie funktionale Aspekte. Alle drei Kriterien sollten mit geeigneten Indikatoren quantifiziert werden. Zu den ökologischen Aspekten zählen bspw. die Möglichkeit des Recyclings von Baustoffen/-teilen und die Minimierung der Umweltbelastung während der Nutzungsdauer eines Bauwerks. Soziokulturelle und funktionale Kriterien umfassen z. B. den Wunsch nach Mobilität oder eine geringe Lärmbelastung, wobei in der Literatur kontrovers diskutierte Meinungen zu Inhalt und Bedeutung von Indikatoren für soziale und technisch-funktionale Aspekte vorherrschen.

In den vergangenen Jahren wurde in zahlreichen Forschungsarbeiten geprüft, anhand welcher Indikatoren eine Bewertung der Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken möglich ist. Hieraus ging insbesondere hervor, dass die etablierten Bewertungsansätze aus dem Hochbau kaum auf Infrastrukturbauwerke übertragbar sind. Es zeigte sich u. a., dass einige der Kriterien nicht bewertet werden konnten, da derzeit kein geeigneter Bewertungsmaßstab vorliegt sowie die Gewichtung der Einzelkriterien variabler gestaltet werden sollte. Ein Kennzahlensystem für die Nachhaltigkeit wurde in einem weiteren Forschungsprojekt (SCHMELLEKAMP 2016) überarbeitet und aktualisiert, indem der Umfang von denkbaren Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit deutlich reduziert wurde.

Eine erste Anwendung des Bewertungsverfahrens auf Brückenbauwerke erfolgte schließlich im Rahmen eines weiteren Forschungsprojektes (SCHMIDT-THRÖ et al. 2016). Es zeigte sich, dass die Durchführung der Methodik zeitintensiv und die Beschaffung der notwendigen Datengrundlagen aufwendig war. Hinsichtlich der Bewertung der ökologischen Qualität von Bauwerken waren einige Bauteile nicht in der Datenbank (Ökobau.dat) enthalten und mussten mithilfe von Ersatz- und Hilfswerten ersetzt werden. Weiterhin wurde festgehalten, dass im Gegensatz zur Nutzungsphase vielmehr Planungsphase entscheidend für die Berücksichtigung und Steuerung von Nachhaltigkeitsaspekten ist.

In einer weiteren Forschungsarbeit (FIEDLER et al. 2016) empfehlen die Autoren zudem Nachhaltigkeitskriterien möglichst bereits im Rahmen der Ausschreibung und Vergabe, von Bau und Erhaltung von Infrastrukturbauwerken, zu berücksichtigen. Dies kann bspw. über festgelegte Zuschlagskriterien erfolgen.

Im Rahmen von zusätzlichen Untersuchungen eines weiteren Forschungsprojektes (MIELECKE et al. 2010) wurde ein weiteres Planungswerkzeug entwickelt. Dieses kann als ergänzendes Verfahren für die Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien verwendet werden. Es unterstützt dabei, die Strategien der Erhaltungs- und Erhaltungmaßnahmen von Straßenbrücken umzusetzen.

4.4.5 Wirtschaftlichkeit

Das Leistungsziel Wirtschaftlichkeit bezieht sich auf die Minimierung der langfristigen Kosten von baulichen Maßnahmen, d. h. insbesondere von Instandhaltungsmaßnahmen über die Nutzungsdauer eines Bauwerks, da während der Nutzungsdauer die meisten Kosten entstehen. Darin sind die Nutzerkosten, die durch Umwege und Verspätungen entstehen, nicht enthalten (vgl. Kapitel 4.4.3). Diese werden stattdessen auf der Netzebene für einzelne Korridore bzw. Teilnetze bestimmt. Eine Schwierigkeit bei der Ermittlung der Erhaltungskosten über den gesamten Lebenszyklus zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit liegt u. a. in der Prognostizierbarkeit des Erfordernisses und des Ausmaßes von Erhaltungsmaßnahmen (Kapitel 4.5).

4.5 Integration in ein Lebenszyklusmanagement

Ein Lebenszyklusmanagement-Tool muss in der Lage sein, auf Grund der gespeicherten Daten eine Vielzahl von Fragestellungen zu beantworten. Ein sehr großer Teil dieser Fragestellungen sind zeitbezogen (ROSENTHALER, KOCH, HAJDIN, BOTZEN 2015). Da zudem der Betrachtungszeitraum innerhalb des Lebenszyklusmanagements essenziell für den Vergleich verschiedener Erhaltungsstrategien ist, soll das zu entwickelnde Kennzahlensystem im Anschluss in einen ganzheitlichen Lebenszyklusmanagement integriert werden. Dazu wird der zeitliche Verlauf des Erfüllungsgrades der Leistungsziele anhand der KPIs über die gesamte Lebensphase abgebildet. Im Sinne eines Lebenszyklusmanagements sind jedoch nicht nur die Betriebsphase eines Bauwerks zu bewerten, sondern, soweit möglich, alle Phasen von Planung, Bau, Betrieb und Rückbau/Ersatzneubau und deren Wechselwirkung mithilfe von entsprechenden Kennzahlen zu integrieren. Es ist vorgesehen die zeitliche Entwicklung anhand eines dreidimensionalen Spinnendiagramms zu visualisieren (vgl. Bild 4-5).

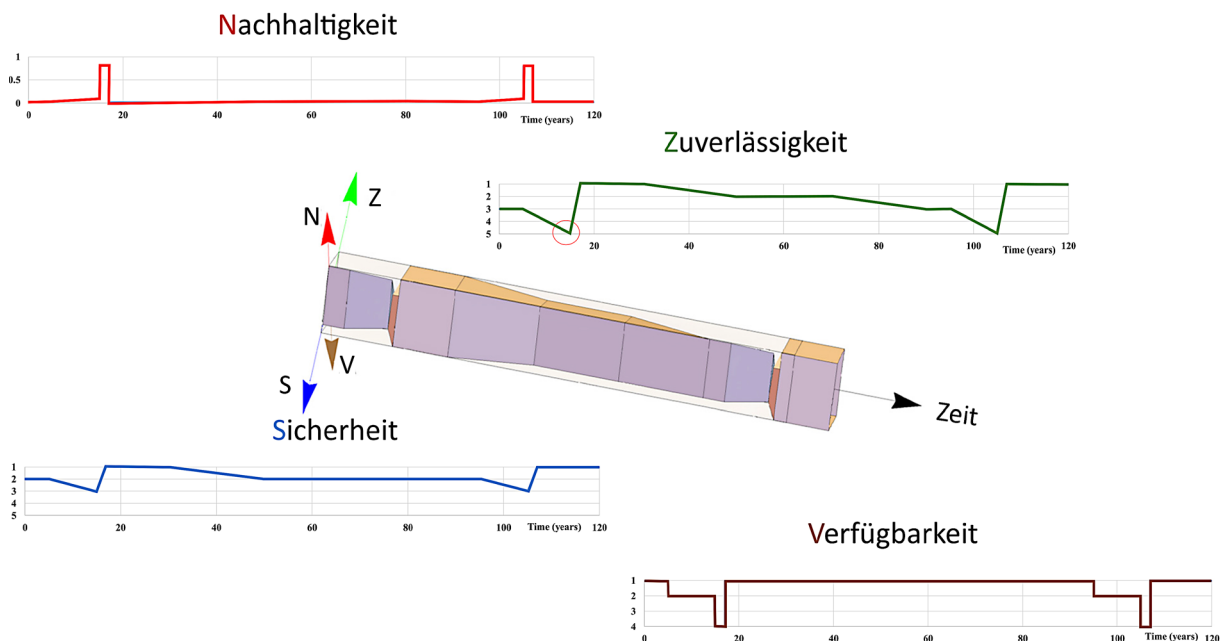


Bild 4-5: Zeitliche Entwicklung der KPIs Zuverlässigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit eines Brückenbauwerks

Die KPIs Zuverlässigkeit und Sicherheit für Nutzer und Dritte werden folglich auf der Grundlage von Inspektionen zu einem Zeitpunkt bewertet (d. h. statische Qualitätsbewertung), jedoch auch im Zeitverlauf mithilfe eines Prognosemodells vorhergesagt (d. h. dynamische Qualitätsbewertung). Auf der anderen Seite können die KPIs Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit nur in Abhängigkeit von der Zeit sinnvoll angewendet werden (HAJDIN et al. 2018).

Mithilfe dieses systematischen Ansatzes ist es möglich unterschiedliche Erhaltungsstrategien für ein Bauwerk über den gesamten Lebenszyklus bzw. zu beliebigen Zeitpunkten miteinander zu vergleichen, wobei nach dem am besten geeigneten Szenario gesucht wird. In Bild 4-6 ist exemplarisch der Vergleich von zwei Erhaltungszenarien dargestellt. Das Referenzszenario sowie das Szenario mit einer präventiven Erhaltungsmaßnahme unterscheiden sich in der Maßnahmenart bzw. -abfolge.

Durch den Vergleich der Szenarien zu beliebigen Zeitpunkten können die Auswirkungen auf die KPI kontinuierlich analysiert werden. Im Idealfall sind alle Indikatoren vollständig

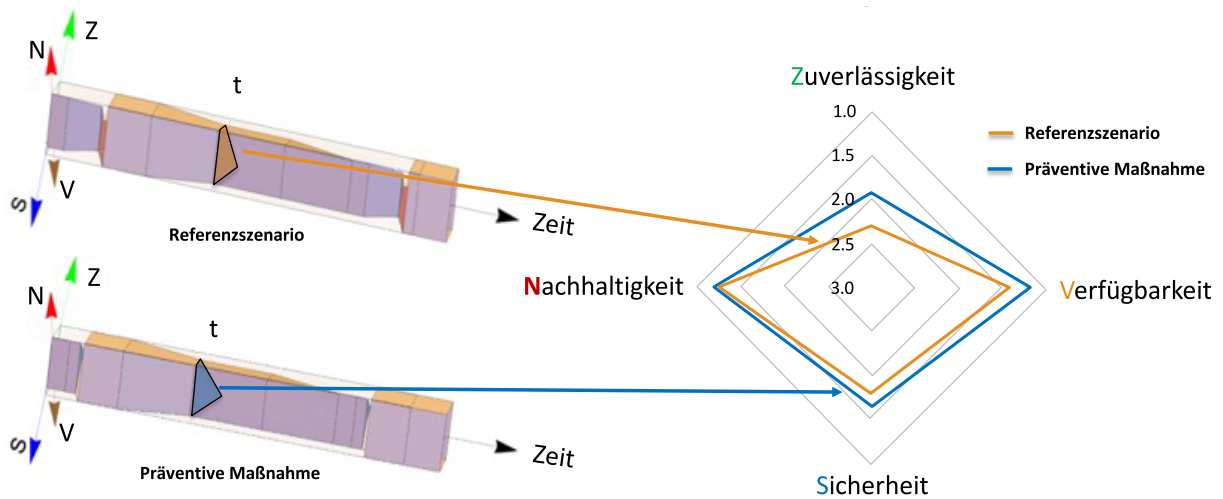


Bild 4-6: Differenzenvergleich von Szenarien als Bewertungskriterium der Resilienz

erfüllt, sodass das Volumen des 3D-Körpers maximal ausgefüllt ist. Im Allgemeinen wird die Strategie, die das größte Volumen des 3D-Körpers über das Analyseintervall ergibt, als die bessere angesehen, jedoch müssen die damit verbundenen Kosten bei der Entscheidungsfindung ebenfalls berücksichtigt werden. Da dieser Zustand jedoch praktisch nicht zu erreichen ist, können Auswertungen anhand der Unterschiede zwischen den betrachteten Szenarien und dem Idealfall durchgeführt werden. Diese Differenzen dienen als Maß zur Bewertung der Resilienz.

Der vorgestellte Ansatz zur Berücksichtigung der vier KPI bei der Entscheidungsfindung kann weitere Anwendungen haben. Da die KPI die Leistung des Netzes widerspiegeln, kann das Volumen des 3D-Körpers für ein Jahr (d. h. $\text{Vol}(t)$) als Indikator für die Qualität verstanden und als Maß für die Einschätzung der Resilienz des analysierten Netzes gegenüber plötzlichen Ereignissen verwendet werden. Das Volumen $\text{Vol}(t)$ entspricht der Fläche des Querschnitts in Bild 4-7 multipliziert mit der Dauer von einem Jahr. Das maximale Volumen $\text{Vol}(t)$ wird also erreicht, wenn alle $\text{KPI}(t)$ die maximalen Werte aufweisen. Wie in Bild 4-7 dargestellt, wirkt sich die Zustandsverschlechterung der Anlagen in einem Netz auf

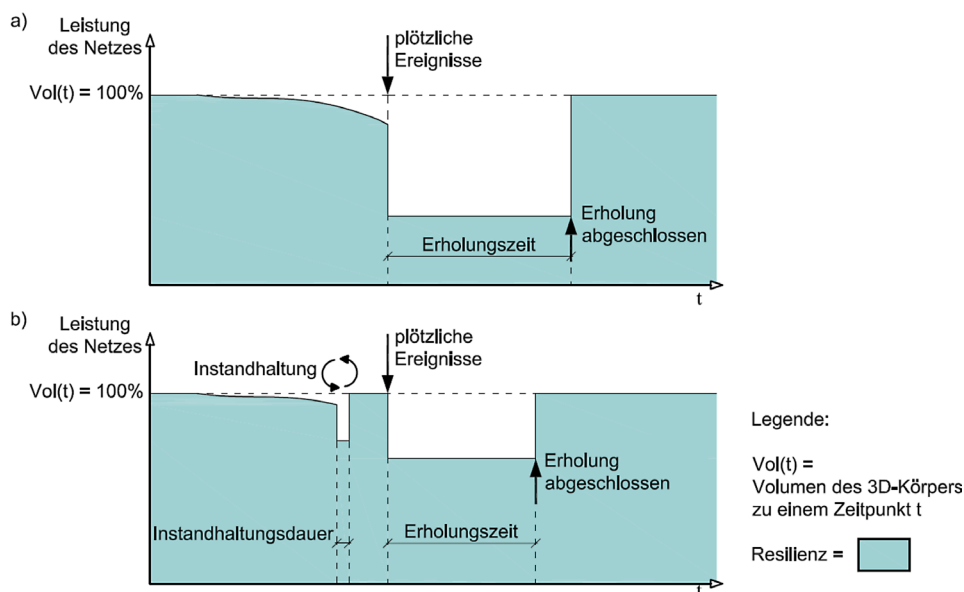


Bild 4-7: Beispiel für die Berechnung der Resilienz für die Fälle ohne Instandhaltung (oben) und mit Instandhaltung (unten)

die KPI-Werte aus, so dass sich das Volumen $\text{Vol}(t)$ im Laufe der Zeit verringert. Wenn ein plötzliches Ereignis eintritt, sinkt der Wert von $\text{Vol}(t)$ plötzlich ab, da eine oder mehrere Anlagen ausfallen. Während des Erholungszeitraums können die Werte von $\text{Vol}(t)$ sinken, steigen oder wie in diesem Beispiel konstant bleiben. Eine vollständige Erholung würde bedeuten, dass die KPI-Werte wieder den Maximalwert erreichen, was sich in einem sprunghaften Anstieg von $\text{Vol}(t)$ bis auf 100 % widerspiegelt. Wird rechtzeitig eine Instandhaltungsmaßnahme an den Anlagen durchgeführt, um eine weitere Zustandsverschlechterung zu verhindern, wäre das Volumen $\text{Vol}(t)$ nur für eine kurze Zeit betroffen. Dies könnte jedoch möglicherweise die Auswirkungen eines zukünftigen plötzlichen Ereignisses verringern (z. B. weniger Ausfälle und kürzere Erholungszeiten als im Falle einer nicht durchgeführten Instandhaltung). Die Bewertung der Resilienz gegenüber plötzlichen Ereignissen auf der Grundlage des Volumens des 3D-Körpers liegt außerhalb des Rahmens dieses Projekts. Es kann jedoch festgestellt werden, dass durch die Maximierung des Volumens des 3D-Körpers (Bild 4-6) auch die Resilienz gegenüber plötzlichen Ereignissen erhöht wird.

4.6 Methodik zur Beurteilung der Zuverlässigkeit

Mit geeigneten Mitteln, wie z. B. Bayes'schen Netzen, kann man die Daten in den Informatikanwendungen, welche teils qualitativ und teils quantitativ sind, wesentlich besser nutzen. Es soll beachtet werden, dass die visuellen Bauwerksprüfungen durch gut geschultes Personal in absehbarer Zeit die wirtschaftlichste Methode vor allem zur Bewertung von Bauwerken bleiben wird. Anders ausgedrückt, der Wert der Information, welche durch die visuelle Bauwerksprüfung gewonnen wird, übersteigt v.a. bei einfacheren Bauwerken jene, welche durch andere aufwendigere Prüfungen (z. B. Monitoring) erhalten werden können.

Andererseits wird es als zweckmäßig erachtet, ebenfalls zu analysieren, aufgrund welcher weiterer (nicht in den Daten der SIB-Bauwerke enthaltene) Informationen die Qualität der Zuverlässigkeits- und Risikoindikatoren verbessert werden kann.

Die Identifikation der maßgebenden Indikatoren für eine zuverlässigkeits- bzw. risiko-basierte Bauwerksprüfung innerhalb eines Lebenszyklusmanagements soll anhand der Modellierung eines möglichst vollständigen Bayes'schen Netzes erfolgen. In Bild 4-8 wird ein solches Bayes'sches Netz beispielhaft für eine bewehrte Winkelstützmauer – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – gezeigt. Es wurde das Beispiel einer Winkelstützmauer gewählt, da bei diesem extremen Anwendungsfall einleuchtend ist, dass eine visuelle Prüfung – für das Versagenszenario infolge einer Bewehrungskorrosion am Stützenfuß – wenig aufschlussreich ist und folglich mit Versagenswahrscheinlichkeiten gearbeitet werden sollte. Die vorgestellte Methode ist auf beliebige Infrastrukturbauwerke innerhalb des Forschungsprojektes anwendbar.

Innerhalb eines Bayes'schen Netzes werden drei Knotentypen unterschieden, welche jeweils die Leistungsindikatoren (bzw. Befunde), die Ereignisse und die Konsequenzen darstellen. In Bild 4-8 ist nur das Ereignis Versagen des Fußquerschnittes dargestellt. Im Diagramm ist ersichtlich, dass dieses Ereignis durch die Bewehrungskorrosion verursacht wird. Die Versagenswahrscheinlichkeit hängt vom Korrosionsfortschrittsgrad, dem Stützmauertyp, dem Baujahr (verwendete Normen als Proxy für den Tragwiderstand und die Betonüberdeckung), den Bodenkennwerten (aktiver oder Ruhedruck), Wasser-Sättigungsgrad und den Abmessungen ab. Diese sind Risikoindikatoren, welche das Versagen des Fußquerschnittes direkt beeinflussen. Die Bewehrungskorrosion hinterlässt Spuren, welche – sofern sie entdeckt werden können – als Risikoindikatoren gelten. Die Ergebnisse der elektrochemischen Untersuchungen (Puls- und coulometrische Oxidationsmessung, Poten-

zialfeldmessung und galvanometrische Pulsmessung) sowie der visuellen Inspektion (Bodeneinsenkungen und defekte Drainage) sind diagnostische Leistungsindikatoren (bzw. Befunde), in welche zu ihrer Kennzeichnung grüne Pfeile münden. Dies bedeutet, dass die Untersuchungen die Bewehrungskorrosion – um ein Beispiel zu nennen – nicht beeinflussen, aber ihre Existenz nachweisen können. Mit diesen Knoten lässt sich die Zuverlässigkeit der Stützmauer in Bezug auf das Versagen des Fußquerschnittes bestimmen.

Im Sinne einer Resilienzbewertung sind die Konsequenzen des Versagens, welche zur Risikoermittlung erforderlich sind, von den Stützmauerabmessungen (v. a. der Höhe) abhängig. Dies betrifft insbesondere das Ausmaß der Verkehrsbeeinträchtigung (Anzahl gesperrter Spuren/Gleisabschnitte), aber auch die Dauer der Verkehrsbeeinträchtigung (vgl. ERATH, BIRDSALL, AXHAUSEN 2009). Hinzu kommen die Personenschäden, welche bei stark befahrenen Verkehrswegen nicht vernachlässigt werden können. In diesem Zusammenhang sollen auch Indikatoren zur Beschreibung der Robustheit, der Schnelligkeit bis zur Wiedererlangung der ursprünglichen Systemleistung und das damit verbundenen Reaktionsvermögen der Infrastrukturbauwerke ermittelt werden.

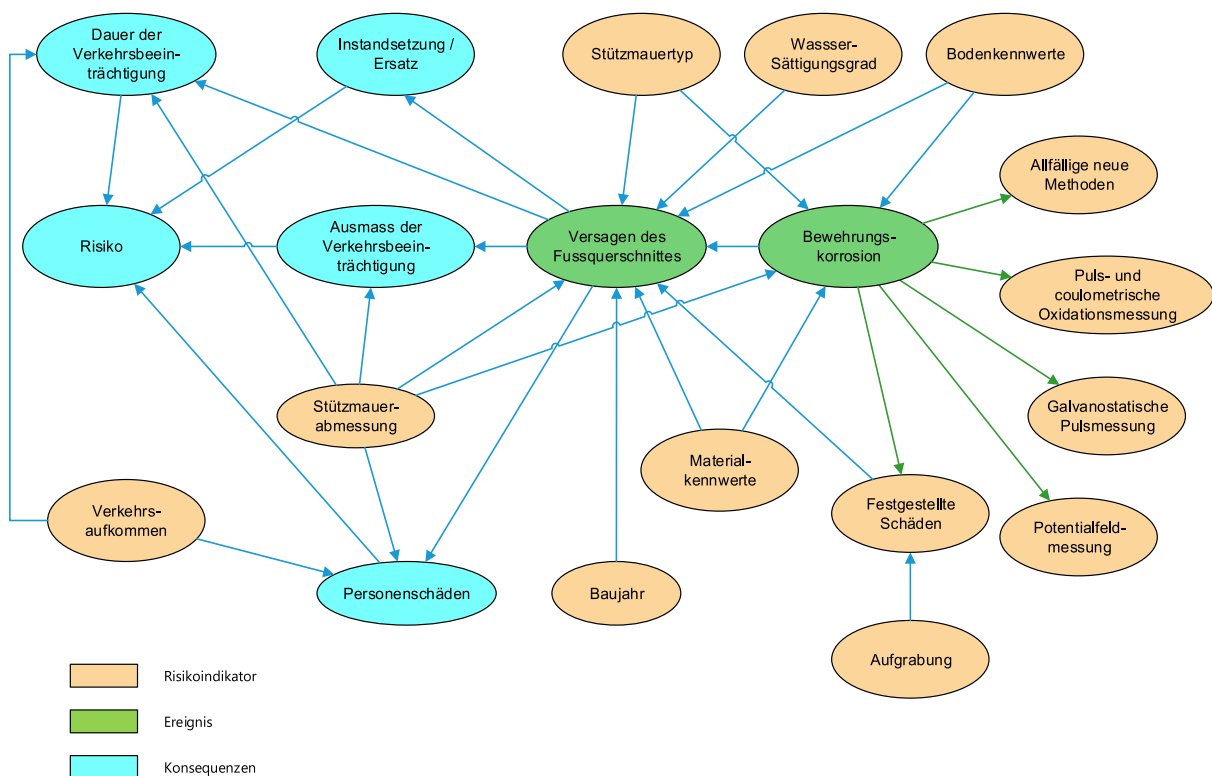


Bild 4-8: Bayes'sches Netz für eine Winkelstützmauer

Das in Bild 4-8 dargestellte Bayes'sche Netz skizziert die methodische Vorgehensweise. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden die kausalen Zusammenhänge detailliert beschrieben. Im Weiteren werden auch andere Versagensarten – sofern relevant – näher untersucht und es werden entsprechende Bayes'sche Netze entwickelt.

Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen kann schließlich die Bedeutung der Knoten innerhalb des Bayes'schen Netzes berechnet werden. Diejenigen Knoten, welche zu großen Unterschieden hinsichtlich der Varianz der Eintrittswahrscheinlichkeit führen, entsprechen den maßgebenden Eigenschaften (und jene von diesen, welche im Rahmen einer Bauwerksprüfung aufgenommen werden, den maßgebenden Indikatoren). Anhand von Sensitivitätsanalysen soll eruiert werden, welche Informationen/Daten die maßgebenden sind. Da die

Betrachtungen probabilistischer Natur sind, ist es wichtig dies in der Sensitivitätsanalyse mit zu berücksichtigen.

Diese Systematik wird in einem IT-Prototyp (Kapitel 6) umgesetzt werden, in dem das Entfernen/Nichtberücksichtigen von Knoten simuliert und die Ergebnisse dargestellt werden. Damit kann ein schneller Überblick gewonnen werden, welche Indikatoren maßgebend sind.

4.7 Bewertung und Auswahl von relevanten Indikatoren

Die Systematik der Indikatoren für eine zuverlässigkeits- und risikobasierte Bewertung von Infrastrukturbauwerken baut auf den Ergebnissen der bisher erarbeiteten Indikatorenliste der BAST auf und wird im Rahmen des AP 1.3 weiterentwickelt bzw. konkretisiert. Diese tabellarische Zusammenstellung soll um Zuverlässigkeits-, Risiko- und Resilienzindikatoren erweitert werden. Aufgrund des Umfangs der bereits erfassten Daten der Datenbanken, wie z. B. SIB-Bauwerke, ist es wichtig, dass die zu entwickelnde Systematik auf dieser Grundlage aufbaut. Die Bewertung der einzelnen Schäden, welche in den Informatikanwendungen erfasst werden, bietet eine gute Grundlage für die zuverlässigkeits- und risikobasierte Bewertung der Infrastrukturbauwerke.

Ausgangspunkt für die Entwicklung der Indikatorenliste war eine Liste der BAST, die mit den relevanten Begriffen aus der Literaturrecherche aktualisiert wurde, die verschiedene Quellen umfasste, darunter technische Vorschriften in Deutschland für die drei Verkehrsträger (DIN 1076/RI-EBW-PRÜF, RPE-ING/ARS 09/2020, RVS 15.01.11, Richtlinien 804.800x, BAW-MSV 2010/WSV-Pruf/VV-WSV 2101/2602), nationale und internationale Forschungsprojekte/Berichte (COST TU1406, Horizon SAFEWAY, KIT, PIARC-Bericht) sowie Informationen aus Expertenbefragungen (siehe Anhang) und damit zusammenhängenden Vorschriften.

Ziel der Arbeit war es, die unterschiedlichen Erfahrungen und Methoden zu berücksichtigen, die zur Definition und Bewertung der Leistung von Infrastrukturbauwerken und Verkehrsnetzen verwendet werden, die Verbindungen zwischen den verschiedenen in Kapitel 4.2 beschriebenen Begriffen zu klären und schließlich die relevanten Leistungsindikatoren zu identifizieren, die in dem entwickelten allgemeinen Ansatz und den vier KPI (Kapitel 4.2.2) angewendet werden. Die Begriffe, die sich auf das Budget und die Investitionen beziehen, wurden direkt mit der Wirtschaftlichkeit verbunden.

Die Begriffe aus den oben genannten Quellen wurden zunächst zusammengetragen und anschließend die folgenden Bearbeitungsschritte durchgeführt:

- Identifizierung von Duplikaten und ähnlichen Begriffen (Quellen wurden beibehalten)
- Identifizierung der Schadenseigenschaften (sowohl in Bezug auf die strukturellen Elemente als auch auf die Ausrüstung eines Bauwerks)
 - z. B. für den Begriff Risse wurden zehn verschiedene Eigenschaften identifiziert (Abstand, Ausrichtung, Breite, Muster, Länge... usw.)
- Umgruppierung
 - z. B. die Begriffe, wie Setzung, Verschiebung, Neigung, Ausrichtung/Schiefstellung, Durchbiegung und ähnliche, wurden unter einem Begriff Änderungen in der Geometrie für die Ebene des Bauwerkes gruppiert,
 - z. B. die Begriffe, wie Fehlende Komponente, Funktionsfähigkeit, schadhafte Entwässerung/Leitungen Wasserstau, Dichtigkeit, schadhafte Elastomer und ähnliche, wurden unter einem Begriff Schäden an Ausrüstung (Bauteilebene) gruppiert

- Differenzierung der PIs bzgl. Typ und Ebene,
- Differenzierung zwischen Schäden und Symptomen (Bedeutung des Schadensausmaßes)
 - z. B. die Begriffe, wie Verlust der Betondeckung, Verzunderung, Benetzung/Leckage wurden als Symptome betrachtet
- Verknüpfung der PI mit den vier KPI

Insgesamt wurden 56 PIs identifiziert (vgl. Bild 4-9). In den meisten Fällen beziehen sich die PI auf Schäden in Bezug auf den strukturellen Zustand einer Anlage (auf der Ebene eines Bauteils oder eines Bauwerks). Weiterhin gibt es auch eine große Anzahl von Indikatoren, die sich auf die Netzebene beziehen. Die strukturellen Schäden (z. B. Risse) sind als Leistungsindikatoren der unteren Stufe zu betrachten. Ihre Mengen und Eigenschaften, die in den gefährdeten Zonen eines Bauwerks erfasst werden, können indirekt mit dem KPI für die Zuverlässigkeit und die Nutzersicherheit in Verbindung gebracht werden. In die Gruppe der Bewertungen werden jene PI eingeordnet, die aus einem oder mehreren Parametern und Beobachtungen abgeleitet werden und einen direkten Bezug zu einer KPI-Bewertung (z. B. ein Zuverlässigkeitsindex (beta-Index) zur Zuverlässigkeit und Nutzersicherheit) hergestellt haben.

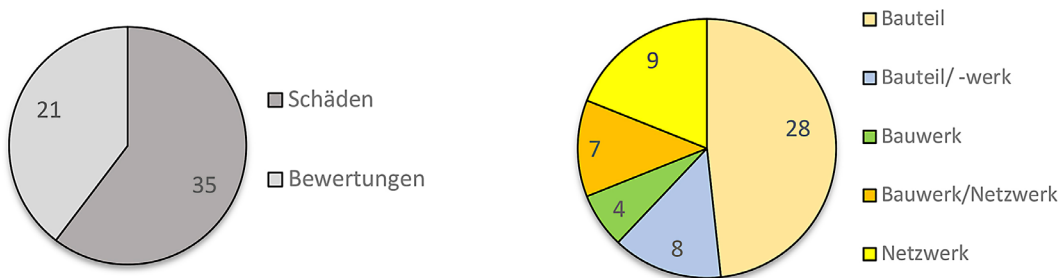


Bild 4-9: PI-Typ (links); PI-Ebene (rechts)

Die meisten der identifizierten PIs können mit nur einem relevanten KPI in Verbindung gebracht werden (z. B. ein struktureller Schaden mit dem KPI der Zuverlässigkeit) (vgl. Tabelle 4-2), während auch 19 der 56 Indikatoren mit zwei oder mehr KPIs in Verbindung gebracht werden konnten (z. B. Zustandsbewertung) (vgl. Tabelle 4-3). Bei einigen PI ist die Verbindung zu den KPI noch nicht abschließend geklärt, sodass hierzu noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden sollten, um diese zuverlässig zur Schätzung der KPI verwenden zu können.

Einzelne Verknüpfung von PIs mit KPI	Zuverlässigkeit	Nutzersicherheit	Verfügbarkeit	Nachhaltigkeit
eindeutig	22	2	7	3
fragwürdig	0	3	0	0
Gesamt	22	5	7	3

Tab. 4-2: Übersicht zur Anzahl an PIs, die mit den KPIs einfach verknüpft wurden

Mehrfache Verknüpfung von PIs mit KPI	Zuverlässigkeit	Nutzersicherheit	Verfügbarkeit	Nachhaltigkeit
eindeutig	17	6	3	2
fragwürdig	0	13	0	0
Gesamt	17	19	3	2

Tab. 4-3: Übersicht zur Anzahl an PIs, die mit den KPIs mehrfach verknüpft wurden

Im Allgemeinen sind die KPI der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit mit einer ausreichenden Anzahl an PI abgedeckt, für die KPI der Nutzersicherheit wurden hingegen nur wenige Indikatoren identifiziert. Hierbei ist es fraglich, ob Schäden an einer Infrastruktur-

anlage als zuverlässiger PI für die Bewertung des KPI Nutzersicherheit verwendet werden können. Schäden, wie z. B. das Herabfallen von Betonteilen aufgrund von Abplatzungen auf die darunterliegende Straße, fehlende Teile eines Geländers, Schlaglöcher oder eine geringe Griffbarkeit, können verwendet werden. Jedoch müssen diese Zusammenhänge auf Unfallstatistiken beruhen, die bestätigen, dass ein Schaden an der Infrastrukturanlage die Hauptursache für ein Unfallereignis war.

Für die Bewertung des KPI Nachhaltigkeit wurden ebenfalls nur sehr wenige geeignete Indikatoren identifiziert. Hierzu werden die ermittelten PI nur fallweise oder gar nicht bei der Entscheidungsfindung verwendet, wie auch in den Experteninterviews bestätigt wurde. Trotzdem haben die in dieser Gruppe identifizierten PI, z. B. Änderung des Schallpegels, Änderung der Schadstoffbelastung, Potenzial für deren zukünftige Verwendung innerhalb eines LZM-Tools.

Die im Anhang bereitgestellte Excel-Zusammenstellung enthält die Informationen zu den Indikatoren (Ebene, Quelle) und ihre mögliche Verbindung zu den KPI, aber auch Informationen und Verbindungen zu anderen relevanten Begriffen, die aus der Literaturnachfrage entnommen wurden und für den Prozess der Leistungsbewertung von Bedeutung sind. Bei der Befragung von Experten wurden viele doppelte PI identifiziert, während sechs PI zu dieser Zusammenstellung hinzugefügt wurden.

4.8 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen zur Erstellung eines Kennzahlensystems vorgestellt, das im Rahmen eines Lebenszyklusmanagementtools Anwendung finden soll. Hierzu wurden zunächst wichtige Begriffe einheitlich definiert, die im Kontext des Kennzahlensystems verwendet werden. Darauf aufbauend wurde die Systematik zur Verknüpfung von Leistungszielen, Leistungsindikatoren sowie weiteren Indikatoren aufgezeigt. Als Schlüsselindikatoren (KPI) wurden die Zuverlässigkeit, die Sicherheit für Nutzer und Dritte, die Verfügbarkeit sowie die Nachhaltigkeit gewählt. Im Sinne eines Lebenszyklusmanagements wurde zudem ein Ansatz vorgestellt, der es erlaubt die zeitliche Veränderung der KPI zu beschreiben sowie die Auswirkungen von Erhaltungsmaßnahmen auf die KPI zu beliebigen Zeitpunkten darzustellen und zu analysieren. Dies ermöglicht es, zuvor definierte Erhaltungsszenarien über einen Analysezeitraum vergleichend gegenüberzustellen und anhand der KPIs sowie der damit verbundenen Kosten zu bewerten. Für die Quantifizierung der KPI Zuverlässigkeit und Sicherheit ist der bauliche Zustand der Bauwerke von großer Relevanz. Daher wurde eine probabilistische Methodik aufgezeigt, mit der es möglich ist anhand von Ergebnissen der Bauwerksinspektionen Aussagen zur Zuverlässigkeit und Sicherheit eines Bauwerks zu treffen. Die gewählte Methodik basiert auf Bayes'schen Netzen und wurde exemplarisch am Beispiel einer Winkelstützmauer aufgezeigt. Zuletzt erfolgte die Aufbereitung und Auswahl von geeigneten Indikatoren, die innerhalb des Kennzahlensystems eingesetzt werden können. Als Ausgangslage wurde hierzu eine von der BAST zur Verfügung gestellte Indikatorenliste verwendet. Diese wurde ergänzt, aufbereitet und umstrukturiert, um eine Zuordnung der enthaltenen Leistungsindikatoren und Indikatoren zu den definierten Schlüsselindikatoren zu ermöglichen.

In den nachfolgenden Kapiteln wird die derzeitige Datengrundlage bei den drei Verkehrsträgern in Hinblick auf eine Verwendung innerhalb eines Kennzahlensystems analysiert. Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 6 die prototypische Umsetzung und Anwendung der entwickelten Methodik im Rahmen einer webbasierten IT-Anwendung.

5 Datengrundlage

5.1 Allgemeines

Im Folgenden wird die vorhandene Datengrundlage zum Bauwerks- und Infrastrukturmanagement bei den drei Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasser gesammelt, analysiert und bewertet. Dazu wird zunächst eine Übersicht der vorhandenen Datengrundlagen erstellt werden. Im Anschluss daran werden die vorliegenden Daten in Hinblick auf eine Anwendung innerhalb eines indikatorgestütztes Lebenszyklusmanagement-Tool bewertet. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick und Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise in Hinblick auf eine Entwicklung und Anwendung eines IT-Prototypen.

5.2 Methodik und Qualitätskriterien

Informationen lassen sich anhand von Kriterien bzw. Leitfragen zur Einführung von Kennzahlen charakterisieren (Ben, Haas 2009). Hinsichtlich dieser Anforderungen werden oftmals die Kriterien des sogenannten SMART-Tests angewendet. Danach sollten die verwendeten Kenngrößen u. a. spezifisch, messbar, erreichbar, relevant und nicht manipulierbar sein, so dass sie als objektive Kriterien zur Erfolgskontrolle verwendet werden können.

Die in Kapitel 4 vorgestellten Ziele, deren zugehörige Indikatoren bzw. deren Erfüllungsgrad sollten weitestgehend anhand von Daten quantifiziert werden. Um eine nachvollziehbare Bewertung der vorgestellten Datenquellen durchzuführen, erfolgt daher die Bewertung der vorhandenen Datengrundlage anhand von definierten Qualitätskriterien. Die Auswahl der berücksichtigten Qualitätskriterien erfolgt in Anlehnung an in der Literatur empfohlenen Bewertungsmaßstäben sowie weiterer Überlegungen. Grundsätzlich sollte die Gesamtheit der verwendeten Daten möglichst die Interessen aller Beteiligten, d. h. Baulastträger (Betreiber und Finanzier), Nutzer sowie Dritte abdecken. Die Beurteilung der Datengruppen erfolgt anhand der folgenden Kriterien:

Bewertungskriterium	Beschreibung
Erfassungsaufwand	Der Erfassungsaufwand beschreibt den Aufwand zum Erfassen von Daten auf der Netzebene.
Wert der Information	Der Wert der Information beschreibt das Verhältnis aus Relevanz der Information und dem Erfassungsaufwand zur Erhebung dieser Daten je Datengruppe.
Zentrale Verfügbarkeit	Anhand der zentralen Verfügbarkeit wird beurteilt, ob die Daten bereits heute in zentralen Datenbanken verfügbar sind. Weiterhin ist zu beurteilen, wie hoch der Aufbereitungsaufwand ausfällt, um die Daten auszuwerten.
Vollständigkeit	Die Vollständigkeit beurteilt, ob für die einzelnen Datengruppen je Verkehrsträger flächendeckend Daten vorliegen oder ob diese z. B. nur punktuell im Netz vorliegen.
Aktualität	Die Aktualität beurteilt, in welchem zeitlichen Rhythmus die Datengruppen erhoben bzw. aktualisiert werden. Sind die Informationen aktuell oder bereits veraltet, wodurch ihr Wert für den Nachfrager erheblich gemindert wird.

Tab. 5-1: Kriterien zur Bewertung der Datengrundlagen

Die einzelnen Kriterien werden mit folgendem Notensystem bewertet:

- sehr hoch
- hoch
- mittel
- mäßig
- gering

5.3 Datengruppen

Nachfolgend sind die einzelnen Datengruppen dargestellt, die für die einzelnen Verkehrsträger separat zu beurteilen sind. Dies beinhaltet Inventardaten, Zustandsdaten, Verkehrsdaten, Unfalldaten, Umweltdaten sowie Daten zu Naturgefahren.

5.3.1 Inventardaten

Inventardaten liefern allgemeine Informationen zu den einzelnen Ingenieurbauwerken. Darin enthalten sind bspw. die Lage des Bauwerks im Netz, die Bauwerksart, die Anzahl der Teilbauwerke, das Baujahr sowie weitere administrative Informationen.

5.3.2 Zustandsdaten

Die im Rahmen der in regelmäßigen Abständen durchgeführten Bauwerksinspektionen gesammelten Daten zum Zustand der Ingenieurbauwerke zählen seit einigen Jahren zu den etablierten Prozessen innerhalb des Erhaltungsmanagements. Diese Daten sind äußerst relevant, da sie derzeit als wesentliche Entscheidungsgrundlage für zukünftige Erhaltungsmaßnahmen dienen. Die Daten werden bauteilspezifisch erfasst und in einheitlichen Datenformaten in Datenbanken abgespeichert, sodass deren Verfügbarkeit hoch ist. Die Organisation der Erfassungen erfordert einen gewissen Arbeitsumfang, da für die Durchführung geschultes Personal benötigt werden.

5.3.3 Verkehrsdaten

Der Verkehr auf einem Infrastrukturbauwerk spiegelt zum Einem die primäre Funktion eines Bauwerks wider. Zum Anderem stellt die Verkehrsbelastung einen bedeutenden exogenen Einflussfaktor zur Vorhersage der Zustandsentwicklung eines Ingenieurbauwerks dar. Verkehrsdaten, wie z. B. Daten zur Schwerverkehrsbelastung (DTV_{sv}) oder der Anzahl an Zügen/Gütertonnen sind daher eine weitere bedeutende Datengruppe für Kennzahlensysteme.

5.3.4 Unfalldaten

Statistiken zu Unfalldaten werden in Deutschland bei allen drei Verkehrsträgern in hoher Granularität geführt, sodass Daten für weitere Auswertungen in Bezug auf das Lebenszyklusmanagement möglich sind. Hierbei kann zunächst zwischen Unfällen mit Personen- und Sachschäden differenziert werden. In Abhängigkeit eines zunehmend schlechteren Bauwerkszustands erhöht sich das Risiko für einen Verkehrsunfall. Jedoch ist es aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge oftmals äußerst schwierig eine Kausalität zwischen Bauwerkszustand oder anderen Einflussgrößen und der Anzahl an Unfällen nachzuweisen.

5.3.5 Umweltdaten

Klima und Wetter bilden eine wesentliche Einflussgröße auf das Materialverhalten von Ingenieurbauwerken. Aufgrund der Durchführung von Bau- bzw. Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken ergeben sich Emissionen in Form von Schall und Luftschadstoffen, die auf die umliegende Umwelt einwirken. Oftmals mangelt es jedoch bei den Umweltdaten an Aussagekraft bzw. ist ein direkter Zusammenhang zu Maßnahmen im Rahmen der baulichen Erhaltung sehr schwer nachweisbar.

5.3.6 Daten zu Naturgefahren

Daten zu Naturgefahren sind für eine Einschätzung des Risikos von Schäden an Bauwerken durch Unwetterereignisse relevant. Hierzu zählen bspw. Daten zu Starkregenereignissen, Erdbeben, Lawinengefahr, Baumsturz, Vegetation, Erosion und Steinschlag.

5.4 Datenhaltung

Im Folgenden wird ein Überblick zur Datenhaltung von Ingenieurbauwerken bei den einzelnen Verkehrsträgern gegeben. Hierzu wurden zunächst die Grundlagen anhand einer Literaturstudie zusammengestellt. Da nicht alle Informationen zur Datengrundlage bei den drei Verkehrsträgern frei zugänglich sind, wurden ggf. fehlende Informationen mithilfe von Experteninterviews der betroffenen Akteure ergänzt. Es wird dargestellt, welche Daten im Rahmen der Instandhaltung und Bauwerksprüfung erhoben und gepflegt werden. Hierbei werden auch die administrativen Zuständigkeiten sowie der Zugang zu diesen Daten analysiert.

5.4.1 Straße: SIB-Bauwerke

Im Bereich Straße liegen die Bestands- und Zustandsdaten in der Straßeninformationsbank SIB-Bauwerke vor. Die Struktur und der Umfang der Bauwerksdaten ist durch die Anweisung zur Straßeninformationsbank, Segment Bauwerksdaten (ASB-ING) definiert. Mit der Datenbankanwendung SIB-Bauwerke wird die ASB-kompatible Erfassung, Verwaltung und Auswertung von Bauwerksdaten sowie die Durchführung von Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 in Verbindung mit der RI-EBW-PRÜF ermöglicht (SIB-Bauwerke Dokumentation). Die grundlegende Datenstruktur in SIB-Bauwerke ist den ASB-ING vorgegeben und in Bild 5-1 visualisiert.

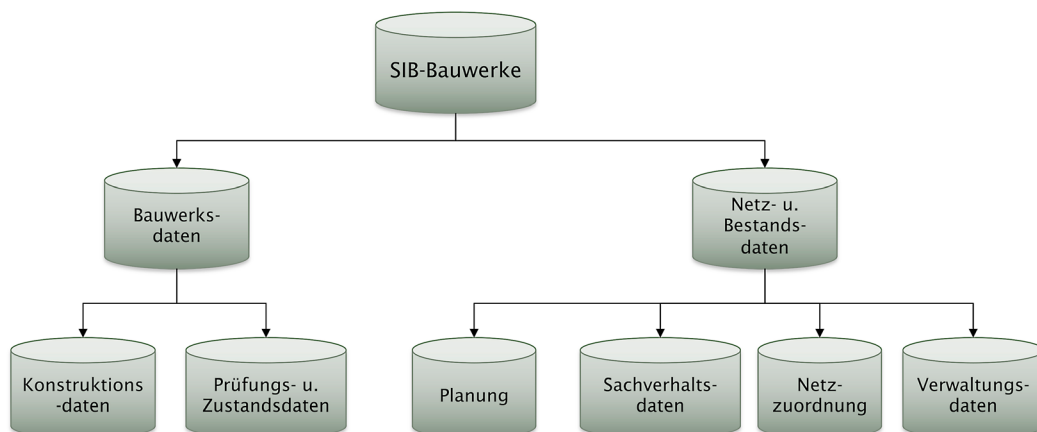


Bild 5-1: Datenstruktur in SIB-Bauwerke

In der Datenbankanwendung SIB-Bauwerke werden die Bestands- und Zustandsdaten standardisiert gespeichert. Weitere Daten zu zusätzlichen Projekten, wie z. B. dem Monitoring und statischen Nachrechnungen, werden teilweise als pdf-Dateien abgelegt. Die während der Zustandsinspektionen aufgenommenen Bilder von Schäden an Bauwerken werden i. d. R. erst ab einer Schadensnote ≥ 3 in der Datenbank hinterlegt und sind auf eine definierte Bildgröße beschränkt.

Der Zugang zur Datenbank ist länderspezifisch unterschiedlich geregelt. Einerseits können auf diese nur bauwerksdatenverantwortliche Personen zugreifen. Andererseits kann der Zugriff auch für komplette Institutionen (Straßenbauverwaltungen oder Ministerien)

freigegeben werden. Parallel zu SIB-Bauwerke werden in vielen Straßenbauverwaltungen eigene Systeme zur Verwaltung von Infrastrukturbauwerken verwendet. Diese nach der Bauwerksnummer gegliederte Systeme beinhalten zumeist Exceldokumente und Dokumente in Papierform, die in den Archiven der Behörden gelagert sind. Diese Systeme enthalten zumeist nicht vollständige Informationen in Form von Bildern, Plänen, Schriftverkehr, Messergebnisse und Nachrechnungen. Weiterhin enthalten diese Exceldateien Informationen zu Schäden zwecks Sammelvergabe und Koordination von einzelnen Tätigkeiten, wie z. B. Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen von Teilelementen. Zusätzliche Daten, die im Rahmen des Monitorings erhoben wurden, liegen zumeist als Untersuchungsberichte vor und werden teilweise als pdf in SIB-Bauwerke hinterlegt. Die Roh- und Messdaten verbleiben zumeist beim Auftragnehmer und sind somit für weiterführende Untersuchungen nicht mehr verfügbar. Notwendige Nachrechnungen von Bauwerken werden den Straßenbauverwaltungen hingegen vollständig übergeben und in SIB-Bauwerke als pdf hinterlegt. Zum Teil liegen diese Dokumente auch auf den Servern der einzelnen Straßenbauverwaltungen.

Nach den RPE-ING sind Mindestangaben in SIB-Bauwerke für eine koordinierte Erhaltungsplanung der Ingenieurbauwerke erforderlich, die in den Datentabellen Teilbauwerke, Bauwerksverzeichnis, Brücken, Brückennachrechnung und Bauwerkszustand Empfehlungen zu hinterlegen sind. SIB-Bauwerke dient seit langem erfolgreich als Verwaltungssystem von Bauwerksdaten. Gleichwohl bestehen Verbesserungspotenziale, die an dieser Stelle knapp umrissen werden:

- Die Datenbankanwendungen können derzeit nur an einem IT-Arbeitsplatz genutzt werden. Wünschenswert wären hierbei alternative Zugangsmöglichkeiten, wie z. B. über mobile Endgeräte.
- Weiterhin wäre eine bessere Speicherung von Fotos bzw. eine Verknüpfung der Fotos zu den betroffenen Bauteilen wünschenswert, um dokumentierte Schäden besser nachvollziehen zu können.
- Zukünftig sollten Ankerablesungen und Hangsicherungsmaßnahmen automatisiert ablaufen, da diese aktuell noch separat in Excellisten gespeichert werden und bei Prüfungen daher teilweise vergessen werden.
- Wünschenswert wäre zudem ein GIS Tool, welches alle notwendigen Prüfungen in einer Übersicht darstellt und somit eine bessere Planung der einzelnen Prüfungen ermöglicht.

5.4.2 Schiene: SAP

Innerhalb der Deutschen Bahn AG (DB AG) ist die DB Netz AG als Infrastrukturbetreiber für die Erhaltung des Schienennetzes verantwortlich. Diese verwaltet die Infrastrukturbauwerke anhand mehrerer IT-Systeme, wobei die folgenden IT-Werkzeuge als Grundlage dienen:

Bauwerksbuch

Das Bauwerksbuch enthält für jedes Bauwerk alle Daten aus Überwachungs-, Untersuchungs-, Begutachtungs- und Inspektionsarbeiten sowie die Stammdaten des Bauwerks (z. B. Inbetriebnahmedatum, Abmessungen, Bauwerksklasse etc.).

SAP R/3

Zusätzlich werden die wesentlichen Daten in SAP R/3 Netz gespeichert und stehen damit sowohl für aggregierte Auswertungen wie auch für Einzelfallbetrachtungen den Experten

innerhalb der DB Netz AG zur Verfügung. Aufträge für Instandhalter werden in SAP angelegt und vergeben. Weiterhin werden alle Daten in SAP zusammengeführt.

Apps zur mobilen Datenerfassung

Zur Vereinfachung und Standardisierung der Datenerfassung stehen den Fachbeauftragten mittlerweile bauwerkstypenbezogene mobile Applikationen zur Verfügung. Vor Ort wird ein Tablett mit der Plattform Diana genutzt (zusätzliche App/Tool zu SAP). In dieser Plattform sind alle Diagnoseanwendungen vereint. So können bspw. sämtliche Bauwerke darin angesehen und zugehörige Informationen abgerufen werden.

5.4.3 Wasserstraße: WADABA, WSVPruf, SIB-Bauwerke, ELWIS

Für die Verwaltung sowie den Bau und den Betrieb von Verkehrsbauwerken an Wasserstraßen kommen bisher verschiedenste IT-Systeme zum Einsatz (SCHENK, LAURSEN 2020). Folgende IT-Werkzeuge dienen als Grundlage:

Wasserstraßendatenbank/WInD

Die Wasserstraßendatenbank (WADABA) stellt das bisher verwendete System dar. Sie beinhaltet als Grundlage das vorhandene Objektkataster der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) (SCHENK, LAURSEN 2018) und enthält sämtliche Stammdaten. Diese ist unterteilt in sogenannte Kataloge und Objektdaten. Als Grundlage für die Bauwerks- und Dammspektionen werden die vorhandenen Bestandsdaten sowie die zugehörige Georeferenzierung genutzt. Derzeit erfolgt die Umstellung vom bisherigen System WaDaBa auf das neue System WInD. Die WInD-Fachdatenbank Anlagentechnik ist in Arbeit.

SIB-Bauwerke/WSVPruf

SIB-Bauwerke und WSVPruf enthalten die Ergebnisse der Bauwerksprüfungen (Brückenbauwerke) bzw. die Ergebnisse der Bauwerks-, Damm- und (zukünftiger) Anlageninspektionen. Bei diesen IT-Systemen handelt es sich um Datenbanken mit integrierter Auswertemöglichkeit und Verwaltungssystem mit rechtssicherer Dokumentation der einzelnen Arbeits- und Verwaltungsprozesse. SIB-Bauwerke gliedert sich wiederum in weitere Datenbanken, die Informationen zum Bauwerksverzeichnis, Objektstruktur, Prüfungs- und Überwachungsergebnisse sowie Schadenslisten enthalten (vgl. Bild 5-2).

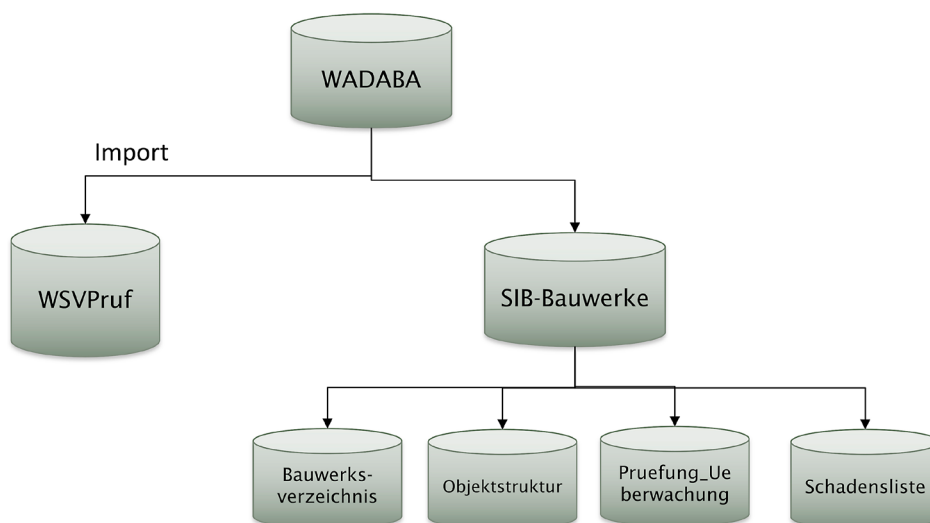


Bild 5-2: Datenstruktur für Wasserbauwerke

DVtU

Das deutschlandweite WSV-System zur digitalen Verwaltung technischer Unterlagen (DVtU) wird als zentrale Dokumentationsplattform für technische Zeichnungen, Baupläne, statische Berechnungen, Gutachten, Genehmigungs- und Freigabeverfahren und zum Management des digitalen Baubestandswerks (Archiv) verwendet. Es dient damit als Verwaltungssystem für die Planung und den Bau von Infrastrukturbauwerken.

5.5 Bewertung der Datengrundlage

Im Folgenden werden die Datengrundlagen dahingehend beurteilt, inwieweit ein Ungleichgewicht zwischen Anforderungen an die Datengrundlage, d. h. den benötigten Daten in Hinblick auf eine Entwicklung und Anwendung des indikatorgestützten Prototyps und der vorhandenen Datengrundlage besteht. Im Folgenden werden hierbei für die drei Verkehrsträger die benötigten Daten identifiziert und bewertet.

5.5.1 Inventardaten

Der Aufwand für die Erfassung bzw. Aufbereitung der Inventardaten wird zwar als hoch bewertet; diese sind jedoch essenziell für sämtliche Prozesse innerhalb des Lebenszyklusmanagements von Bauwerken, sodass ihr Wert der Information als sehr hoch anzuordnen ist.

Die Vollständigkeit der Inventardaten ist gegeben. Diese Daten sind in den Datenbanken zentral verfügbar und werden bei den Straßenbauverwaltungen kontinuierlich gepflegt, sodass diese aktuell vorliegen.

5.5.2 Zustandsdaten

Die z. B. in SIB-Bauwerke enthaltene Datengrundlage zur Beurteilung von Schäden ist verhältnismäßig gut. Die Erhebung der Zustandsdaten im Rahmen der Bauwerksinspektion ist aufwändig, jedoch aktuell die effektivste Methode, um den Zustand der Bauwerke zu erfassen und aufgenommene Schadensbilder zu bewerten. Demnach liefern sie einen sehr hohen Wert an Information. Verbesserungspotenziale werden jedoch insbesondere in den Punkten Datenmanagement, -pflege und -nachführung gesehen.

Die Zustandsdaten sind in den Datenbanken zentral verfügbar. Sie liegen zudem vollständig vor. Aufgrund der definierten Zeitpunkte zur Durchführung von Bauwerksinspektionen liegen diese Daten jedoch nicht tagesaktuell vor.

5.5.3 Verkehrsdaten

Innerhalb der Straßeninformationssysteme (SIB) sind bisher meist Querschnittszählungen vorhanden. Die Erhebung dieser Daten ist mit mäßigem Aufwand durchzuführen. Eine fahrstreifenscharfe Aufteilung der Verkehrsbelastungen ist nur über automatisierte Dauerzählstellen möglich. Da insbesondere die (Schwer-) Verkehrsbelastung eine der maßgebenden Einflussgrößen auf die Zustandsentwicklung eines Bauwerks darstellt, wird ihr Wert der Information als hoch eingestuft.

Verkehrsdaten sind online frei zugänglich und für so gut wie alle Teilnetze bzw. Infrastrukturbauwerke vollständig. Aufgrund der aktuell nur alle 5 Jahre durchgeführten Straßenverkehrszählungen liegen diese Daten jedoch nur im Falle von Dauerzählstellen aktuell vor.

5.5.4 Unfalldaten

Die Erhebung von Unfalldaten erfolgt bei allen drei Verkehrsträgern flächendeckend und in Kooperation mit weiteren polizeilichen Behörden. Unfalldaten werden kontinuierlich erfasst, sodass diese in relativ aktueller Form vorliegen. Die Erhebung und Verwaltung dieser Daten werden daher oftmals in separaten Abteilungen durchgeführt, die keinen unmittelbaren Bezug zum Management der Infrastrukturbauwerke aufweisen. Demnach sind diese Daten oftmals nicht zentral verfügbar bzw. werden von Abteilungen außerhalb des Erhaltungs- bzw. Lebenszyklusmanagements verwaltet.

In Bezug auf die Verwendung von Unfalldaten im Rahmen eines Lebenszyklusmanagements gestaltet es sich als äußerst schwierig, Ursache–Wirkungs-Zusammenhänge zwischen sich ereigneten Unfällen und dem Zustand eines Bauwerks zu analysieren, da die Anzahl an Ereignissen (erfreulicherweise) für statistische Analysen oftmals viel zu gering ist. Zudem werden sicherheitsgefährdende Zustände an Bauwerken unmittelbar beseitigt und fließen nicht in die Entscheidungsfindung innerhalb eines Lebenszyklusmanagements ein (Stichpunkt: Gefahr in Verzug).

5.5.5 Umweltdaten

Umweltdaten werden mittlerweile von einer Reihe von Institutionen online kostenlos zur Verfügung gestellt, sodass diese mit einer sehr hohen zentralen Verfügbarkeit, Aktualität sowie Vollständigkeit zu bewerten sind.

Da die Erfassung und Aufbereitung von Umweltdaten oftmals durch externe Institutionen bereits erfolgt, ist der entsprechende Aufwand zur Verwendung dieser Daten bei den Verkehrsträgern nur mittelmäßig. Gleichwohl gestaltet es sich als schwierig, diese Daten für die Integration in einen LZM-Ansatz zu verwenden, da eine exakte Zuordnung zwischen Messort und Infrastrukturbauwerk nur bedingt möglich ist.

5.5.6 Daten zu Naturgefahren

Die Erhebung von Daten zu potenziellen Naturgefahren und ihre grafische Darstellung anhand von Karten rückt zunehmend in den Fokus von verschiedenen Institutionen. Diese Daten werden oftmals online zur Verfügung gestellt, sodass diese mit einer sehr hohen zentralen Verfügbarkeit, Aktualität sowie Vollständigkeit zu bewerten sind. Analog zu den Umweltdaten besteht auch bei den Daten zu Naturgefahren der wesentliche Vorteil für die Verkehrsträger darin, dass diese Daten bereits durch andere Institutionen erfasst, ausgewertet und oftmals zur freien Verfügung gestellt werden. Damit reduziert sich der Aufwand für die drei Verkehrsträger auf ein mäßiges Niveau. Dahingegen wird durch die Integration dieser Daten in ein LZM-Tool ein hoher Wert der Information gesehen, da diese für die Kalibrierung und Verwendung von risikobasierten Modellen genutzt werden können.

Eine zusammenfassende Übersicht der Bewertung der Datengruppen für den Bereich Straße ist in Bild 5-3 dargestellt.

Eine zusammenfassende Übersicht der Bewertung der Datengruppen für den Bereich Schiene ist in Bild 5-4 dargestellt.

Eine zusammenfassende Übersicht der Bewertung der Datengruppen für den Bereich Wasserwege ist in Bild 5-5 dargestellt.

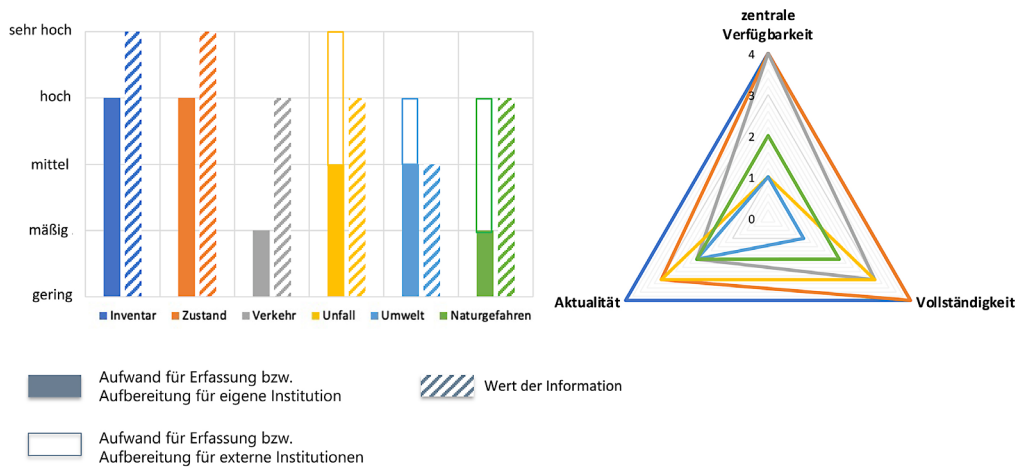


Bild 5-3: Bewertung der Datengruppen für den Bereich Straße

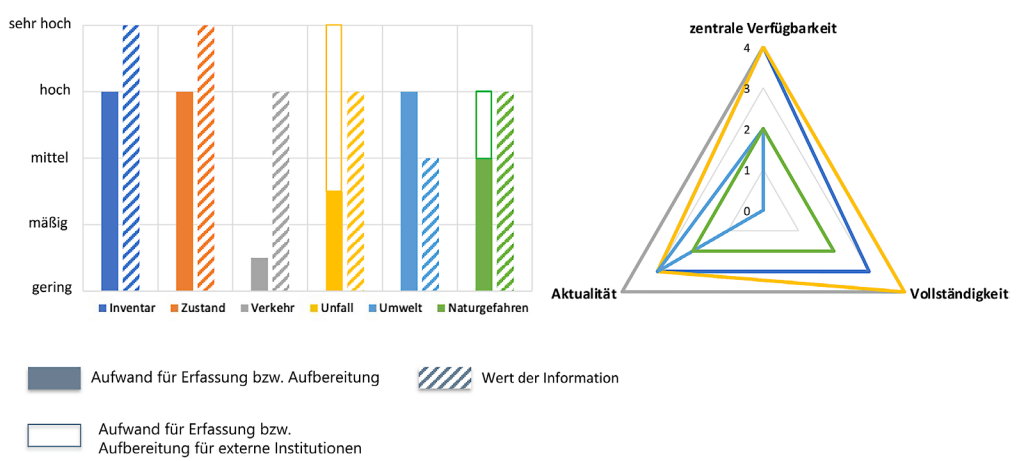


Bild 5-4: Bewertung der Datengruppen für den Bereich Schiene

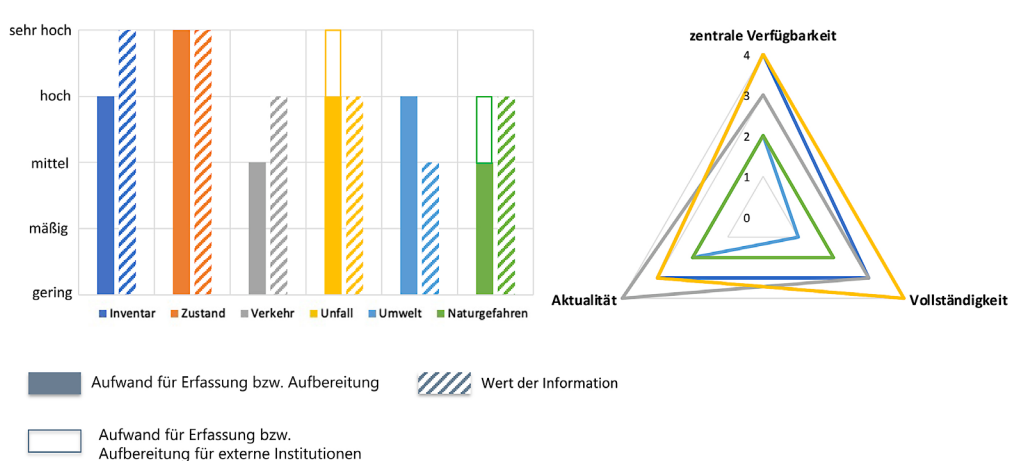


Bild 5-5: Bewertung der Datengruppen für den Bereich Wasserwege

5.6 Experteninterviews und -workshop

In Ergänzung zu der durchgeführten Literaturrecherche erfolgte zusätzlich die Durchführung von Experteninterviews und die Umsetzung eines Expertenworkshops, die weiteres Detailwissen zu den jeweils vorhandenen Datengrundlagen und ihrer Nutzung im Rahmen eines Lebenszyklusmanagements lieferten.

5.6.1 Experteninterviews

Die Experteninterviews fanden online via MS Teams statt. Die Dauer der Interviews betrug zwischen 60 und 90 Minuten.

Experten von folgenden Institutionen wurden interviewt:

- Die Autobahn GmbH des Bundes (Autobahngesellschaft)
- Deutsche Bahn AG (DB Netz AG)
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
- Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg (LS)
- Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFiNAG)
- Schweizer Bundesbahnen (SBB)
- Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (VM)

Der Fragebogen der Experteninterviews (Anhang B) bestand aus den folgenden Fragekategorien:

- Inventardaten
- Messung der Qualität/Leistung der Infrastruktur
- Zustandsdaten
- Verkehrsdaten
- Unfalldaten
- Umweltdaten
- Daten zu Naturgefahren

Anschließend erfolgte die Auswertung der Protokolle. Die aufbereiteten Ergebnisse wurden nach Durchführung der Interviews den Interviewpartnern jeweils zur Durchsicht zur Verfügung gestellt.

5.6.2 Expertenworkshop

Ziel des Workshops war es die inhaltliche Bearbeitung des Forschungsprojektes vorzustellen, die Ergebnisse aus den durchgeführten Experteninterviews zu präsentieren sowie eine Plattform zum generellen Erfahrungsaustausch in Hinblick auf die Verwendung von Kennzahlen und Indikatoren im Rahmen eines Lebenszyklusmanagementansatzes zur Verfügung zu stellen. Der Expertenworkshop fand am 21.01.2022 via MS Teams statt.

Die Teilnehmende von folgenden Institutionen haben an dem Online-Workshop teilgenommen:

- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- Die Autobahn GmbH des Bundes (Autobahngesellschaft)
- Deutsche Bahn AG (DB Netz AG)
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
- Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg
- Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFiNAG)

- Bundesamt für Strassen (ASTRA)
- Schweizer Bundesbahnen (SBB)
- Verkehrsministerium Baden-Württemberg

Die Ergebnisse aus den Experteninterviews und des Workshops können wie folgt zusammengefasst werden:

- Tragsicherheit und Sicherheit der Nutzer werden als wichtigste strategische Ziele gesehen
- Es besteht bei den Verkehrsträgern eine große Anzahl mit z.T. sehr unterschiedlichen Bauwerken
- Es herrscht eine herausfordernde Altersstruktur der Bauwerke vor
- Die Art der Prognosemodelle ist abhängig vom jeweiligen Asset
- Zustandsdaten werden i. d. R. netzweit erfasst und liegen in guter Qualität vor
 - ähnliche Vorgehensweisen bei Schadensbewertung
 - z. T. gibt es jedoch keine Rückverfolgung zu den betroffenen Bauteilen und Schadensbeschreibung
- Die Verkehrsdaten für die Verkehrsträger Schiene (u. Wasser) liegen sehr detailliert vor
- Im Straßenbereich erfolgt die Messung der Verkehrsstärken i. d. R. räumlich u. zeitlich punktuell
- Unfalldaten werden nur in Einzelfällen innerhalb des Asset Managements berücksichtigt, da sicherheitskritische Zustände unmittelbar beseitigt werden.
- Das Thema Nachhaltigkeit kommt zunehmend in den Fokus der Betreiber
- Umweltdaten werden zumeist auf der Projektebene betrachtet
 - Lärm gilt als wichtigster Parameter, da hierzu gesetzliche Vorgaben vorhanden sind.
 - CO₂-Bilanzen werden innerhalb von LZM bisher nicht berücksichtigt
- Daten zu Naturgefahren sind zunehmend durch andere Institutionen verfügbar
 - bisher sind jedoch nur geringe Verschneidungen mit den Verkehrswegen umgesetzt (eher Projektebene)
 - generell herrscht bisher noch eine geringe Kooperation zwischen den Beteiligten/ Institutionen
 - zur Abschätzung von Naturgefahren sind risikobasierte Ansätze erforderlich

5.6.3 Erkenntnisse und Empfehlungen

Der Workshop lieferte eine gute Übersicht zu den bisher eingesetzten Indikatoren bei den drei Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasser. Im Rahmen von fachlichen Diskussionen zwischen den Beteiligten konnten weitere interessante Indikatoren hinzugefügt werden sowie Hinweise zur Verknüpfung von möglichen Indikatoren je KPI gegeben werden. Die vorhandenen Zustandsdaten werden verkehrsträgerübergreifend bisher als wichtigste Datengrundlage für die Maßnahmenplanung gesehen. Für die Beurteilung des Bauwerkszustands sind Ansätze zur Berücksichtigung von gefährdeten Bauteilen z.T. in den Regelwerken vorhanden. Die vorgeschlagene Methodik des zukünftigen LZM-Tools wurde den Teilnehmenden ausführlich erläutert und diskutiert. Des Weiteren wurde gemeinsam mit den Workshopteilnehmenden die vorhandenen Datengrundlagen zur Verwendung innerhalb eines LZM-Tools diskutiert.

5.7 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die bei den einzelnen Verkehrsträgern vorhandenen Daten Grundlagen vorgestellt. Dazu wurden zunächst die bestehenden IT-Systeme gesichtet und anhand eines Bewertungssystems beurteilt, inwiefern sich die einzelnen Datengruppen zur Verwendung innerhalb eines LZM-Tools eignen. Die aufbereitete Übersicht zu den Daten Grundlagen wurde im Rahmen von Experteninterviews und einem Expertenworkshop diskutiert.

Es zeigte sich, dass bereits heute zu allen Datengruppen Daten vorliegen. Oftmals gestaltet sich jedoch – ausgenommen Zustands- und Verkehrsdaten – eine exakte Zuordnung der Daten zu den einzelnen Bauwerken als schwierig bzw. variiert die Granularität der Daten. Für eine zukünftige Entwicklung eines LZM-Tools wurde deutlich, dass zumeist einfache Indikatoren zur Beurteilung der KPI verwendet werden sollten. Mittelfristig kann die Verknüpfung und Bewertung anhand von weiteren Teilmodellen noch verfeinert werden.

6 Entwicklung eines IT-Prototyps

6.1 Allgemeines

Die Umsetzbarkeit des in Kapitel 4 entwickelten Konzepts zur Entwicklung eines indikatorgestützten Lebenszyklusmanagementtools (LZM-Tool) soll anhand eines Prototyps nachgewiesen werden. Es wird daher ein IT-Prototyp entwickelt, der

- ein Entscheidungsunterstützungstool für Baulastträger/Eigentümer bereitstellt, die ihren Bauwerksbestand managen müssen,
- einen schnellen Überblick zu Bewertungskriterien der unterschiedlichen Bauwerkstypen liefert,
- eine indikatorengestützte Auswertung zu beliebigen Zeitpunkten innerhalb des Lebenszyklus der Bauwerke ermöglicht,
- Algorithmen beinhaltet, die grundsätzlich sowohl für einzelne Bauwerke als auch für ein Netz von Bauwerken geeignet sind.

Mit der prototypischen Umsetzung der Methodik soll es möglich sein, unterschiedliche Erhaltungsstrategien über den gesamten Lebenszyklus bzw. zu beliebigen Zeitpunkten miteinander zu vergleichen.

6.2 Konzeption und Vorüberlegungen

6.2.1 Anforderungen

Ziel der Konzeption ist es, ein LZM-Tool zu entwickeln, welches sowohl indikatorbasiert als auch modular aufgebaut ist, um eine möglichst hohe Flexibilität für alle Verkehrsträger zu ermöglichen. Das zu entwickelnde LZM-Tool soll zukünftig auf verschiedenen Ebenen, wie z. B. der Objekt- und Netzebene, der drei Verkehrsträger anwendbar sein. Ein Lebenszyklusmanagement-Tool muss zudem in der Lage sein, auf Basis der Eingangsdaten eine Vielzahl an Berechnungsschritten (Schadensanalyse, Zustandsprognose, usw.) durchzuführen, die oftmals zeitbezogene Ergebnisse liefern (ROSENTHALER, KOCH, HAJDIN, BOTZEN 2015). Daher soll der zeitliche Verlauf des Erfüllungsgrades der Leistungsziele anhand der KPIs über die gesamte Lebensphase abgebildet werden können.

6.2.2 Indikatoren auf der Objekt- und Netzebene

Das LZM-Tool soll die Möglichkeit bieten, verschiedene Erhaltungsstrategien für ein oder mehrere Bauwerke miteinander zu vergleichen.

Zunächst wird dazu ein einzelnes Bauwerk betrachtet, welches einem Alterungs- und Verschleißprozess unterworfen ist. Der Zustand dieses Bauwerks verschlechtert sich im Laufe der Zeit, sodass dieses zu einem gewissen Zeitpunkt seinen Bestimmungszweck nicht mehr erfüllt. Im Vergleich zu den bisher praktizierten, zustandsbasierten Ansätzen zur Vorbereitung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.8), werden diese Anforderungen innerhalb des IT-Prototyps mit den beiden Schlüsselindikatoren Zuverlässigkeit (vgl. Kapitel 6.4) und Sicherheit (vgl. Kapitel 6.5) beschrieben.

Um einen ordnungsgemäßen und sicheren Zustand des Bauwerks zu gewährleisten bzw. wieder herzustellen, sind Erhaltungsmaßnahmen notwendig (vgl. Kapitel 6.6). Diese führen zu einer Verbesserung der beiden Schlüsselindikatoren des Bauwerks. Gleichzeitig wir-

ken sich die Maßnahmen während ihrer Durchführung negativ auf der Netzebene, d. h. innerhalb eines Streckenabschnittes oder eines Teilnetzes, aus. Dies wird durch die beiden Schlüsselindikatoren Verfügbarkeit (vgl. Kapitel 6.7) und Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 6.8) innerhalb des LZM-Tools abgebildet.

Innerhalb des LZM-Tools können für die einzelnen Bauwerke Maßnahmenzenarien definiert werden, die eine Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen innerhalb des Lebenszyklus der Bauwerke beinhalten. Im Rahmen von Erhaltungsstrategien innerhalb des Netzes können schließlich die Auswirkungen der Erhaltungsmaßnahmen verschiedener Bauwerke analysiert und mithilfe der Schlüsselindikatoren bewertet werden (vgl. Kapitel 6.9.5).

6.2.3 Normierung und KPI Bewertung

In der Regel können PIs unterschiedliche native Einheiten haben und bei der Bewertung eines KPIs von unterschiedlicher Bedeutung sein. Die Normierung beinhaltet den Prozess der Skalierung der nativen Einheiten der PI auf einer Skala von 1 bis 5 (1 ist die beste, 5 ist die schlechteste Note). Sie dient daher dazu, einen einheitlichen Vergleich anhand von Bewertungsparametern vorzunehmen (vgl. Kapitel 4.5). Die Schwellenwerte für native Einheiten in einer Skala sind für jeden PI frei wählbar. Der Prototyp ermöglicht zwei Arten zur Berechnung von KPI. Bei zwei oder mehr KPI-Parametern gibt es zwei Möglichkeiten für die Normierung. Im ersten Fall wird jeder Parameter von 1 bis 5 skaliert, und das Maximum wird als PI-Wert verwendet. Im zweiten Fall wird jeder Parameter skaliert und die gewichtete Summe ergibt den KPI-Wert (vgl. Bild 6-32).

Im Folgenden wird ein Beispiel für die Normierung und die KPI-Bewertung gegeben. Zur Bewertung des KPI Verfügbarkeit eines Netzes (KPI(V)) werden zwei PI verwendet – die zusätzlichen Reisezeiten für den Personenverkehr (Zeit_DTV) und für den Güterverkehr (Zeit_SV) aufgrund von Verkehrsstörungen innerhalb eines Jahres. Die Werte beider Indikatoren sind in denselben Einheiten (Stunden/Jahr) angegeben, aber die zugehörigen Werte können für ein überlagertes Netz eine unterschiedliche Bedeutung haben, die über eine Bewertungsskala dargestellt werden kann (1 ist die beste, 5 ist die schlechteste Note), siehe z. B. Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2.

Zeitverlust für Güterfahrzeuge (Zeit_SV) [h/Jahr]	Bewertungsskala
0 h ≤ Zeit_DTV < 4999,9	1,0 – 1,99
5000 ≤ Zeit_DTV < 12499,9	2,0 – 2,99
12500 ≤ Zeit_DTV < 17499,9	3,0 – 3,99
17500 ≤ Zeit_DTV < 19999,9	4,0 – 4,99
Zeit_DTV ≥ 20000	5,0

Tab. 6-1: Normierung der Zeitverluste für den Personenverkehr

Zeitverlust für Güterfahrzeuge (Zeit_SV) [h/Jahr]	Bewertungsskala
0 ≤ Zeit_SV < 499,9	1,0 – 1,99
500 ≤ Zeit_SV < 1499,9	2,0 – 2,99
1500 ≤ Zeit_SV < 2249,9	3,0 – 3,99
2250 ≤ Zeit_SV < 3499,9	4,0 – 4,99
Zeit_SV ≥ 3500	5,0

Tab. 6-2: Normierung der Zeitverluste für den Güterverkehr

Beträgt innerhalb eines Jahres die zusätzliche Reisezeit des Personenverkehrs (Zeit_DTV) 15.000 h, so ergibt dies den normierten Wert für $Zeit_DTV_{norm} = 3,5$ auf der Grundlage der

zugehörigen Bewertungsskala. Wenn gleichzeitig die zusätzliche Reisezeit des Güterverkehrs (Zeit_SV) 1000 h/Jahr beträgt, ergibt dies den normierten Wert für $\text{Zeit_SV}_{\text{norm}} = 2,5$ auf der Grundlage der zugehörigen Bewertungsskala. Der KPI Verfügbarkeit kann nun auf zwei Arten berechnet werden:

- Bei einer Gewichtung der beiden Indikatoren ergibt sich der KPI Verfügbarkeit zu: $\text{KPI(V)} = C_{\text{DTV}} * \text{Zeit_DTV}_{\text{norm}} + C_{\text{SV}} * \text{Zeit_SV}_{\text{norm}}$, wobei C_{DTV} und C_{SV} Gewichtungsfaktoren sind ($C_{\text{DTV}} + C_{\text{SV}} = 1$ und $C_{\text{DTV}}, C_{\text{SV}} > 0$). Diese Berechnung ist für den Fall geeignet, dass die mit den PI verbundenen Konsequenzen bekannt sind. Nehmen wir an, dass eine Stunde Verspätung eines LKW viermal so teuer als eine Stunde Verspätung eines Personenwagens ist. Dies würde $\text{KPI(V)} = 0,2 * \text{Zeit_DTV}_{\text{norm}} + 0,8 * \text{Zeit_SV}_{\text{norm}} = 2,7$ ergeben.
- Wenn das Maximum der PI-Werte als maßgebend festgelegt wird, ergibt sich der KPI Verfügbarkeit zu: $\text{KPI(V)} = \max(\text{Zeit_DTV}_{\text{norm}}, \text{Zeit_SV}_{\text{norm}}) = 3,5$. Diese Berechnung liegt auf der sicheren Seite und ist für den Fall geeignet, dass die Gewichtungsfaktoren unbekannt sind.

6.3 Datengrundlage und -aufbereitung

6.3.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die für die Anwendung des IT-Prototyps benötigten Eingangsdaten und deren Datenquellen erläutert (Kapitel 6.3.2). Es wird zudem dargestellt, welche grundlegenden Berechnungsschritte zur Modellierung eines Netzes durchzuführen sind (Kapitel 6.3.3). Weiterhin erfolgt eine Übersicht des Datenmodells (Kapitel 6.3.4).

6.3.2 Datenquellen und Eingangsdaten

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

Als Datenquellen für statische, vordefinierte Daten dienen Datenauszüge aus SIB-Bauwerke, die anhand der Netzwerk- und Inventardaten zur Beschreibung der einzelnen Anlagen dienen. Zu den benötigten Inventardaten zählen der Bauwerkstyp, die Lokalisierung des Bauwerks, die geometrischen Abmessungen, die vorhandene Verkehrsbelastung sowie die zugrunde liegende Bemessungsnorm zur Analyse des vereinfachten statischen Systems.

Weiterhin werden für die Abbildung von Schäden sowie die Modellierung von Schadensentwicklungen heuristische Verfahren genutzt. Die Art, Lage und Ausmaß der Schäden werden benötigt, um deren Auswirkungen auf die Tragsicherheit und Sicherheit für Nutzer und Dritte zu beurteilen.

Zudem werden Daten aus der Unfallstatistik genutzt, um eine Quantifizierung der Sicherheit für Nutzer und Dritte durchzuführen. Je nach vorhandenem Schaden am Bauwerk wird eine Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt, die die voraussichtliche Häufigkeit eines Unfalls aufgrund des Bauwerkszustands beschreibt.

Für die Ermittlung der Auswirkungen auf die Verfügbarkeit werden Eingangsdaten aus extern durchgeführten Verkehrssimulationen verwendet. Zu den benötigten Daten zählen hierbei die aufgrund von Erhaltungsmaßnahmen zu erwartenden zusätzlichen Reisewege

bzw. -zeiten für den Personen- und Güterverkehr für die jeweils zu analysierenden Erhaltungsstrategien.

Zu den durch den Nutzer veränderbaren Daten zählen die dokumentierten Schadeigenschaften (Art, Lage, Schwere) je Anlage, die Definition von Maßnahmenszenarien je Anlage, Informationen zur Verkehrsbelastung innerhalb des Netzes sowie die Normierungsfunktionen und Verknüpfungsregeln zur Berechnung und zur Visualisierung der Key Performance Indikatoren. Eine ausführlichere Erläuterung der Eingangsdaten für jeden KPI wird in den folgenden Kapiteln (6.4 bis 6.8) gegeben.

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

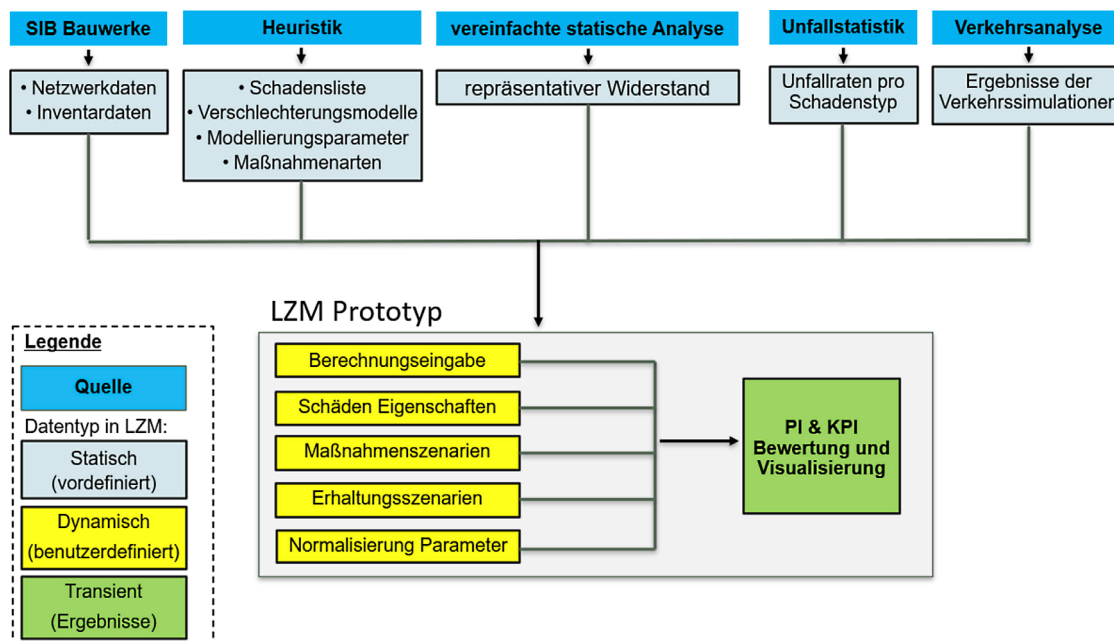


Bild 6-1: Übersicht an notwendigen Eingangsdaten für den IT-Prototyp

6.3.3 Modellierung eines Netzes

Als Grundlage für sämtliche Berechnungen innerhalb des IT-Prototyps sowie die extern durchgeführten Verkehrssimulationen dient ein vordefiniertes Netz. Dieses wird mithilfe von Knoten und Kanten modelliert.

Die Knoten repräsentieren hierbei die Infrastrukturbauwerke (z. B. Brücken). Die Kanten beschreiben die Verkehrsverbindungen zwischen den Bauwerken und enthalten Attribute (z. B. Länge). Innerhalb des IT-Prototyps ist derzeit das in Bild 6-2 dargestellte Teilnetz von Knoten A zu Knoten B enthalten. Das Teilnetz beinhaltet vier Bauwerke, deren Verbindungen untereinander in einer entsprechenden Tabelle (vgl. Tabelle 6-3) beschrieben sind.

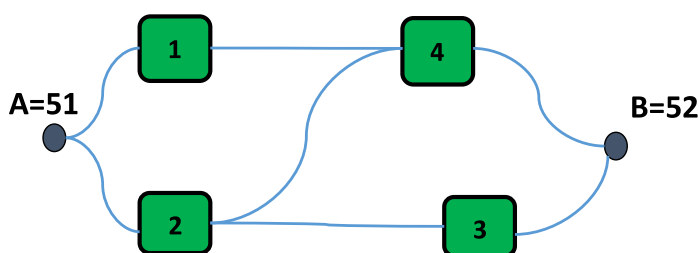


Bild 6-2: Beispiel für eine Systemskizze eines Netzwerks

ID Verbindung	ID Teilnetz	Startknoten	Endknoten	Name
1	1	51	1	A-1
2	1	1	4	1-4
3	1	4	52	4-B
4	1	51	2	A-2
5	1	2	3	2-3
6	1	2	4	2-4
7	1	3	52	3-B

Tab. 6-3: Beispielhafte Daten zur Definition eines Netzwerks

6.3.4 Datenmodell

Bild 6-3 zeigt das vereinfachte Datenmodell des Prototyps (Entitäten-Beziehungsmodell). Das Entitäten-Beziehungsmodell besteht aus Entitäten und ihren Verbindungen. Jede der Entitäten hat Attribute, d. h. Hauptparameter, die diese definieren. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Attribute hier nicht dargestellt.

Die Top-Level-Entität ist der Benutzer, der mit mehreren oder einem Netz verbunden ist. Die Entität Netz ist mit einer oder mehreren Erhaltungsstrategien, einer oder vielen Verkehrsverbindungen und dem Budget verbunden. Jede Entität Erhaltungsstrategie kann mit den NetzKPI und mit Verkehrsstörungen verbunden sein.

Eine Anlage kann ein Anfangs- (oder End-) Knoten für mehr als eine Verkehrsverbindung sein. Die Anlage ist mit den AnlagePI, keinem oder vielen Maßnahmen-szenarien, einem oder vielen Schäden, einem Prognosemodell und einem oder vielen Versagensarten verknüpft.

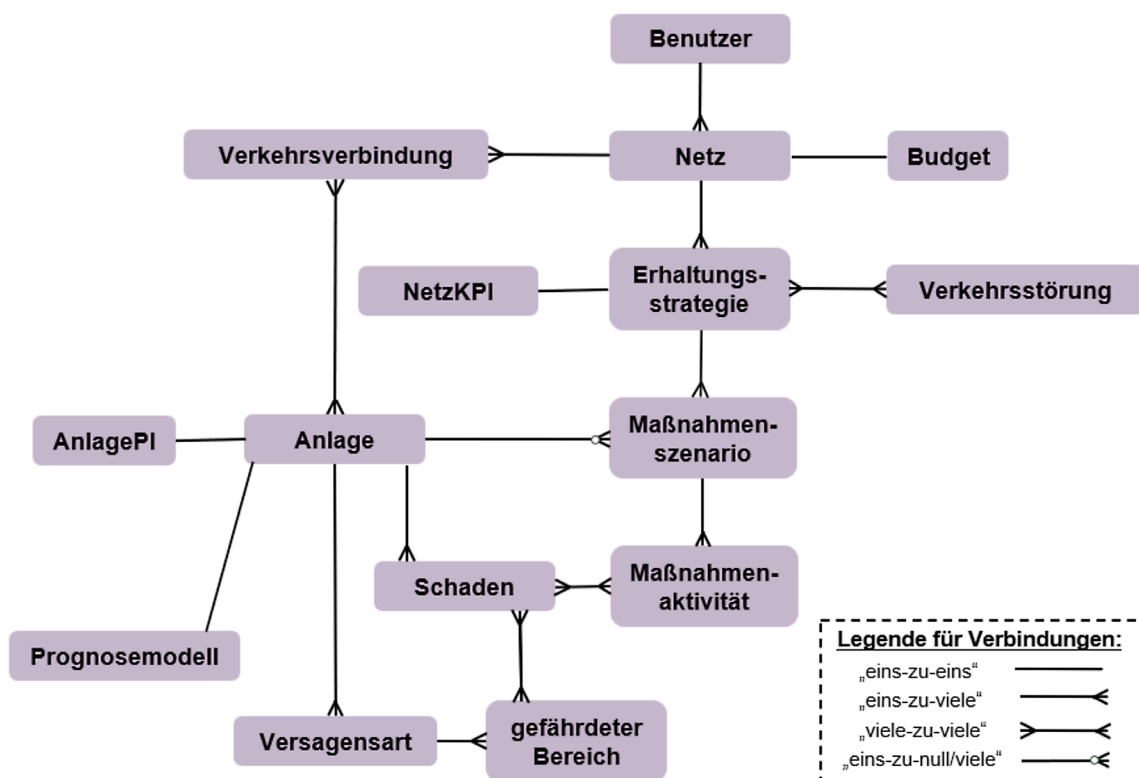


Bild 6-3: Datenmodell des IT-Prototyps

Außerdem ist die Erhaltungsstrategie mit einem oder vielen Maßnahmenszenarien verbunden. Jede Entität Maßnahmenszenarien kann eine oder viele Maßnahmenaktivitäten haben. Maßnahmenaktivitäten können mit einem oder vielen Schäden verbunden sein. Die Versagensart hat eine bis viele gefährdete Bereiche. Jeder Schaden kann mit einer oder vielen gefährdeten Bereichen verbunden sein.

Nachfolgend sind die Entitäten kurz beschrieben:

- Benutzer – Benutzer des IT-Prototyps
- Netz – es gibt drei Netze: Straße, Schiene und Wasser
- Erhaltungsstrategie – eine Kombination von Maßnahmenszenarien für die Anlagen
- NetzKPI – KPI auf der Netzebene (Zuverlässigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit)
- Verkehrsverbindung – diese definieren, wie die Anlagen miteinander verbunden sind
- Budget – jährliches Instandhaltungsbudget
- Anlage – eine Anlage innerhalb des analysierten Netzes
- AnlagePI – Beschreibung anhand der Indikatoren Zuverlässigkeit und Sicherheit auf der Anlagenebene
- Maßnahmenszenario – enthalten die Liste der Maßnahmen.
- Maßnahmenaktivität – Zeitplan, Kosten, Dauer der Maßnahmen und Liste der betroffenen Schäden
- Verkehrsstörung – Ergebnisse der Verkehrsanalyse für verschiedene Kombinationen von Verkehrsstörungen aufgrund von Maßnahmen (z. B. tägliche Zeitverluste des Personenverkehrs).
- Schaden – Schäden, die die Anlage betreffen
- Prognosemodell – probabilistisches oder deterministisches Modell, das zur Schadensprognose genutzt wird.
- Versagensart – mögliche Versagensmechanismen für eine Anlage
- gefährdeter Bereich – ein Teil der Anlage, in dem der Einfluss eines Schadens auf einen Versagensmodus definiert ist.

6.4 Zuverlässigkeit

6.4.1 Allgemeines

Unter Zuverlässigkeit einer Anlage wird die Wahrscheinlichkeit verstanden, dass diese Anlage während ihrer Nutzungsdauer sowohl sicher als auch funktionsfähig ist. Sie ist der Gegensatz zur Wahrscheinlichkeit eines strukturellen Versagens (Tragsicherheit), eines betrieblichen Versagens (Gebrauchstauglichkeit) oder einer anderen Ausfallart (z. B. Ermüdung). Der Zuverlässigkeitsindex β wird am häufigsten verwendet, um die Zuverlässigkeit eines Bauwerks zu bewerten. Die Berechnung der β -Werte für ein Bauwerk kann sehr aufwändig sein, jedoch kann ein einfaches, aber umfassendes statisches Modell ausreichen, welches auf Bestandsdaten und ingenieurmäßigem Urteilsvermögen basiert.

Die Zuverlässigkeit eines Netzes bezieht sich auf diejenigen Fälle, in denen eine oder mehrere Anlagen im Netz ausfallen, was die Fahrt innerhalb eines Teilnetzes von Punkt A

nach Punkt B unmöglich macht. Die Wahrscheinlichkeit dieses Ereignisses wird berechnet, wobei die verschiedenen Kombinationen, die das Netz in einen Fehlerzustand versetzen, als sich gegenseitig ausschließende Ereignisse betrachtet werden (d. h. die Wahrscheinlichkeiten dieser Ereignisse können addiert werden). Die Anlagen im Netz können über eine serielle oder parallele Verbindung verknüpft sein (d. h. es ist eine Umleitungsstrecke verfügbar) und alle möglichen Kombinationen von Anlagenausfällen müssen für das vordefinierte Netz ermittelt werden.

6.4.2 Methodik zur Bewertung der KPI Zuverlässigkeit eines Bauwerks

Die Methodik zur Ermittlung und Bewertung des KPI Zuverlässigkeit eines Bauwerks ist in Bild 6-4 dargestellt.

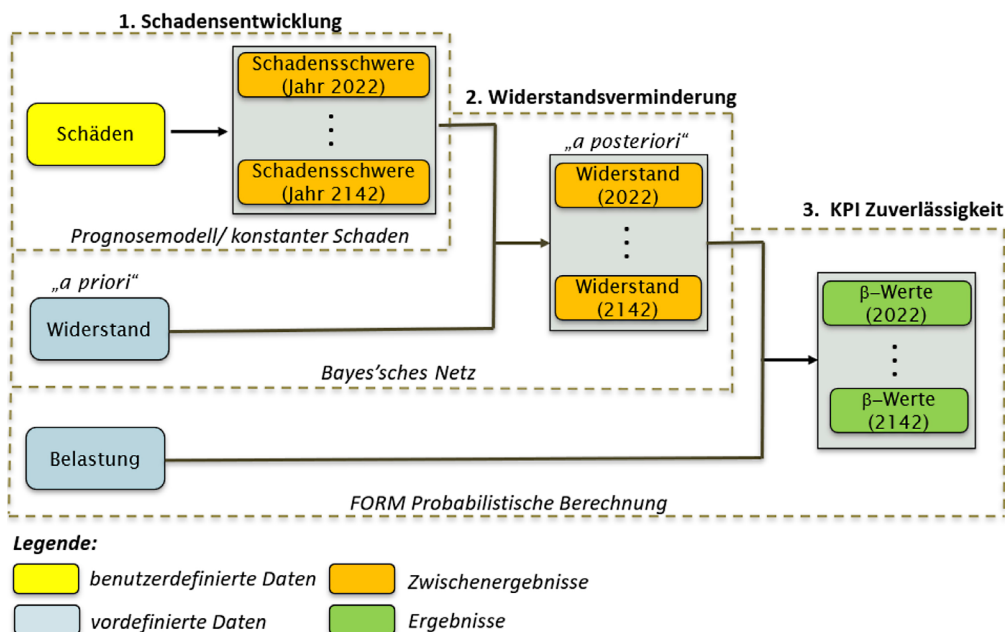


Bild 6-4: Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Zuverlässigkeit eines Bauwerks

Für die benutzerdefinierten Schäden an den Infrastrukturbauwerken und das vordefinierte Schadensprognosemodell wird die Entwicklung der Schadensschwere berechnet (Schritt 1 in Bild 6-4). Die Auswirkungen der Schadensverschlechterung auf die Widerstände der Infrastrukturbauwerke im Laufe der Zeit werden mithilfe eines Bayes'schen Netzes berücksichtigt (Schritt 2 in Bild 6-4). Die zugehörige Methodik zur Berechnung von à priori und à posteriori Zuverlässigkeitsindizes β für Bauwerke ist in HAJDIN & FASTRICH (2019) ausführlich beschrieben. Die dort vorgestellte Vorgehensweise berücksichtigt ein vereinfachtes statisches Modell für eine Brücke und einen oder mehrere Schäden, die anhand von Art, Schwere und Lage des Schadens bei der Bewertung der beiden Hauptversagensarten, d. h. Biegung in der Mitte der Spannweite und Querkraft an den Stützen. Die Hauptergebnisse der Methodik aus HAJDIN & FASTRICH (2019) enthält vier Werte pro Brücke, die die Zuverlässigkeitsindizes für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) für das Durchbiegungsmoment bzw. die Querkraft darstellen (à posteriori). Diese strukturelle Widerstandsfähigkeit der Anlage wird für jedes Jahr in der Zukunft neu berechnet, um schließlich die Prognose der β -Werte für eine Anlage über den analysierten Zeitraum zu erhalten (Schritt 3 in Bild 6-4).

6.4.3 Eingangsdaten, Zwischenergebnisse und Ergebnisse

Zur Bewertung des KPI Zuverlässigkeit werden folgende Eingangsdaten benötigt:

- Benutzerdefiniert Daten:
 - Schäden pro Anlage (Lage und Schwere) (vgl. Kapitel 4.2)
- Vordefinierte Daten:
 - Schadensarten
 - Matrizen/Funktionen zur Prognose der Schadensentwicklung
 - Widerstand und Belastung der Anlage durch ein vereinfachtes statisches Modell
 - gefährdete Bauwerksbereiche der Anlage
 - Probabilistische Parameter

Schäden pro Anlage und Schadensarten

Der Schweregrad der Schäden wird gemäß der RI-EBW-PRÜF-Methodik mit S- und V-Bewertungen (Werte 0 bis 4) eingestuft. Im Allgemeinen können Schäden entweder mit der Note S oder Note V bewertet werden, in einigen Fällen kann es sowohl eine S-Bewertung als auch eine V-Bewertung geben. Die ausgewiesenen Schäden an einer Anlage wirken sich negativ auf die Tragsicherheit/Gebrauchstauglichkeit der Anlage (KPI Zuverlässigkeit) aus und/oder führen zu einer Erhöhung der Unfallhäufigkeit (KPI Sicherheit). Eine detaillierte Erläuterung zum Einfluss der Lage von Schäden auf die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit einer Anlage wird im nachfolgenden Abschnitt gegeben.

Für jeden Anlagentyp müssen die entscheidenden Schäden identifiziert werden, die in Betracht gezogen werden sollen (z. B. Tabelle 6-4). Es ist wichtig, den Umfang der Auswirkungen für jede Schadensart, d. h. ihre Auswirkungen auf die Versagensarten, vorzudefinieren. Im Falle einer Brücke ist die entsprechende Beispieltabelle (vgl. Tabelle 6-4) angegeben.

Schadensart	Relevant für Biegung (Moment)	Relevant für Querkraft
Abplatzungen	x	
Bewehrungskorrosion	x	
Korrosion Schubbewehrung		x
Biegerisse	x	
Querrisse Spannbeton	x	
Längsrisse	x	
Schrägrisse	x	x
Netzrisse	x	

Tab. 6-4: Schadensarten eines Brückenbauwerks und Auswirkungen auf Biegung und Querkraft (S-Bewertung)

Prognose der Schadensentwicklung

Das LZM-Tool differenziert zwischen zwei Arten von Schäden, nämlich solche, die durch einen Verschlechterungsprozess bedingt sind, und solche, bei denen dies nicht der Fall ist. Ein Beispiel für die erste Art von Schäden ist ein korrosionsbedingter Schaden. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass sich der Korrosionsprozess im Laufe der Zeit auf die Schwere eines Schadens auswirkt. Die zweite Art von Schäden bezieht sich auf fehlende oder nicht funktionsfähige strukturelle/nicht-strukturelle Elemente einer Anlage, bei denen die Schwere eines Schadens im Laufe der Zeit konstant ist. Ein Beispiel für die letztgenannten Schäden ist ein fehlender Teil eines Geländers an einer Brücke.

Es wird davon ausgegangen, dass die zeitliche Entwicklung der Schadensschwere für jeden Anlagentyp einem vordefinierten Prognosemodell entspricht. Dieses Modell kann probabilistisch (Markov-Ketten) oder deterministisch (linear, polynomisch) sein. Da die Methodik zur Schadensbewertung nach der RI-EBW-PRÜF erfolgt, muss das Prognosemodell den Übergang zwischen den einzelnen Schadensklassen abbilden, wobei die Schäden einen Dezimalwert zwischen 0 und 4 annehmen können.

Bei einem deterministischen Modell wird eine mathematische Funktion für die Schadensentwicklung auf alle Schadensarten eines Bauwerks angewendet. Im Falle des probabilistischen Modells (Markov-Ketten) wird für jede Schadensart eine vordefinierte Übergangsmatrix verwendet. Das LZM-Tool berechnet automatisch die Übergänge der Zustände innerhalb des Markov-Modells.

Widerstand und Belastung der Anlage durch ein vereinfachtes statisches Modell

Zur Berechnung des Widerstandes und der Nutzlast einer Anlage sollten die Inventardaten (Geometrie, Bemessungsnorm, Verkehrslasten oder eine ähnliche Norm) verwendet werden. Im Falle eines Brückenbauwerks können z. B. einfache Balkenmodelle angewendet werden, bei denen der Widerstand auf einer Bemessungsnorm und die Einwirkungen auf der aktuell gültigen Norm basieren (vgl. Bild 6-5 und Bild 6-6).

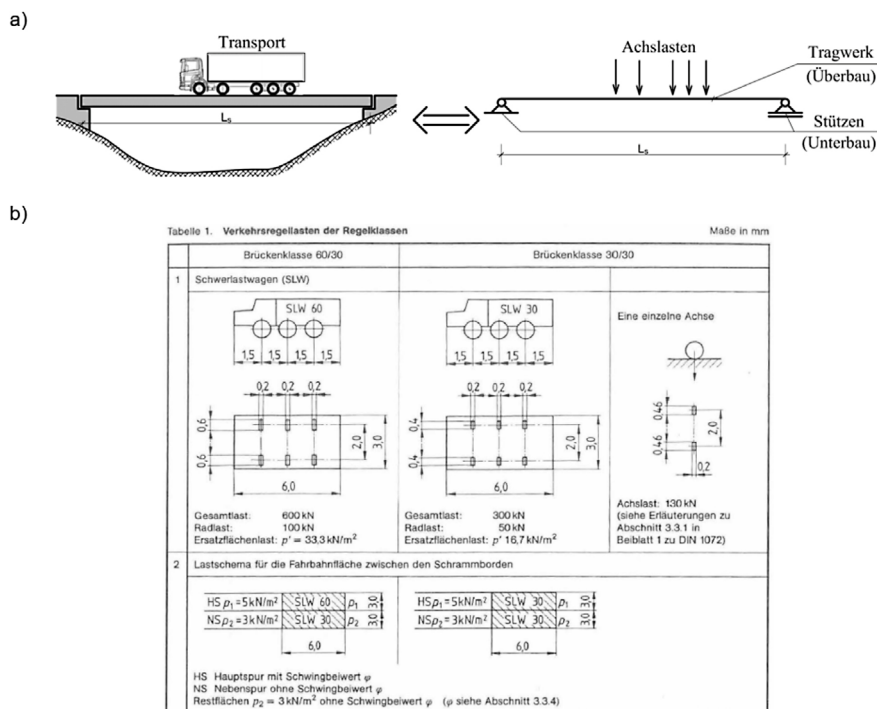
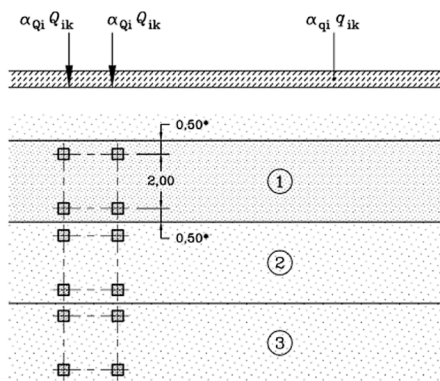


Bild 6-5: a) Balkenmodelle für eine Brücke; b) Beispiel einer Bemessungsnorm

Das vereinfachte statische Modell eines Bauwerks sollte eine nahtlose Bewertung der Hauptversagensarten während seiner Nutzung ermöglichen. Im Falle eines Brückenbauwerks gibt es zwei Hauptversagenskriterien, d. h. ULS und SLS, die für die Querschnitte der Bauwerkselemente erfüllt werden müssen, bei denen die Querschnittskräfte des Biegemoments und der Querkraft aufgrund von Berechnungslastfällen die höchsten Werte aufweisen. In den meisten Fällen und aufgrund der Art der vorherrschenden Verkehrslast ist es ausreichend, nur den Überbau, d. h. den Mittelteil und die Auflagerzone in einem Balkenmodell zu untersuchen. Für den Fall von Brückenbauwerken sind folgende minimale (und optimale) Eingaben, für das LZM-Tool erforderlich:



Legende

- 1 Fahrstreifen Nr 1 : $Q_{1k} = 300 \text{ kN}$; $q_{1k} = 9 \text{ kN/m}^2$
- 2 Fahrstreifen Nr 2 : $Q_{2k} = 200 \text{ kN}$; $q_{2k} = 2,5 \text{ kN/m}^2$
- 3 Fahrstreifen Nr 3 : $Q_{3k} = 100 \text{ kN}$; $q_{3k} = 2,5 \text{ kN/m}^2$
- 4 (*) Für $w_1 = 3 \text{ m}$

AC Abstand der Doppelachsen = 1,2 m **AC**

Bild 6-6: Grundwerte von Lastmodell 1 nach DIN EN 1991-2:2010-12 (Verkehrsnorm)

- vier Werte für den Widerstand (Bemessungsnorm)
 - M_{RE} (Biegung in kNm), für die ULS und SLS (insgesamt zwei Werte)
 - V_{RE} (Querkraft in kN) für die ULS und SLS (insgesamt zwei Werte)
- vier Werte für die Belastung (Verkehrsnorm)
 - M_{LL} (Biegung in kNm), für die ULS und SLS (insgesamt zwei Werte)
 - V_{LL} (Querkraft in kN), für die ULS und SLS (insgesamt zwei Werte)

Die Berechnung dieser Werte kann mit vorhandenen Tools oder Software (z. B. VEMAGS Statik-Rechenkern) durchgeführt werden. Für die Berechnungen im LZM-Tool wurden diese Daten mit der Software InfTruck (IMC 2022) erstellt. Diese vordefinierten Daten innerhalb des LZM-Tools sind in Bild 6-19 dargestellt.

Gefährdete Bereiche eines Bauwerks

Schäden können an verschiedensten Stellen des Bauwerks festgestellt werden. Teilweise ist die exakte Lage eines Schadens jedoch nicht bekannt. Für eine umfassende Abschätzung des Einflusses eines Schadens auf den Widerstand eines Bauwerks müssen zunächst die gefährdeten Bauwerksbereiche bekannt sein. In Bild 6-7 sind die Versagensarten für ein Versagen auf Biegung für einen Einfeld- und einen Mehrfeldträger sowie die sich daraus ergebenden Bereiche hoher, mittlerer und geringer Anfälligkeit dargestellt. Bei Mehrfeldträgern ist je nach Zug- oder Druckbelastung zwischen den Bereichen oben bzw. unten am Querschnitt zu unterscheiden (vgl. Bild 6-7).

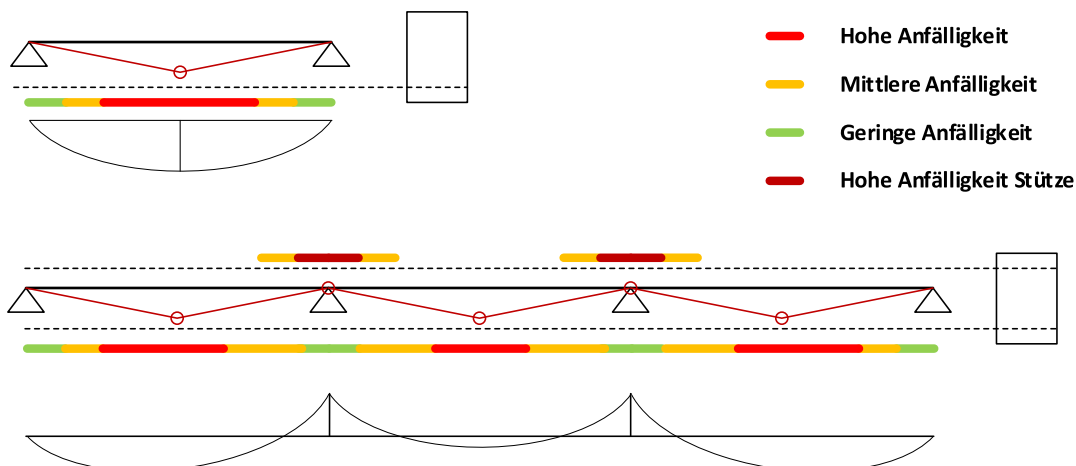


Bild 6-7: Versagensarten und sich daraus ergebende gefährdete Bereiche bei Einfeld- und Mehrfeldträgern in Bezug auf Momentenbelastung unter Berücksichtigung der Lage der Schäden im Querschnitt (HAJDIN & FASTRICH 2019)

Die Abschätzung der Länge dieser Zonen für einfache statische Systeme und die Auswirkungen auf die Widerstandsverminderung ist in HAJDIN & FASTRICH (2019) ausführlich beschrieben. Innerhalb des LZM-Tools werden die Längen der gefährdeten Bereiche als vordefinierte Werte angenommen (vgl. Kapitel 6.9.3).

Probabilistische Parameter

Um die vorhandenen Unsicherheiten in den Berechnungen zu berücksichtigen, werden im Rahmen der Modellierung des Widerstandes und der Einwirkungen (vgl. Tabelle 6-5) probabilistische Parameter für die Modellierung des Schadensumfangs und der resultierenden Widerstandsreduktion verwendet (vgl. Bild 6-8:).

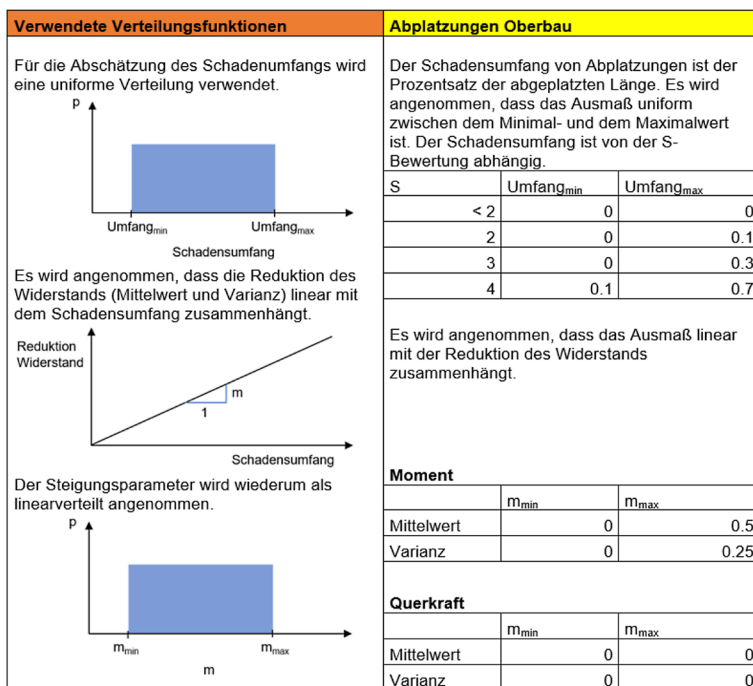


Bild 6-8: Modellierung der Änderung des Widerstandes infolge von Schäden (HAJDIN & FASTRICH 2019)

Fall	Verteilungsfunktion	Variationskoeffizient	Quantil charakteristischer Wert
Variable Einwirkungen (LM1)	Gumbel-Verteilung	30 %	99.9 %
Ständige Einwirkungen	Lognormalverteilung	10 %	50.0 %
Festigkeits-/ Widerstandsparameter	Lognormalverteilung	15 %	5.0 %

Tab. 6-5: Beispielhafte Verteilungsfunktionen, Variationskoeffizienten und Quantile für die Einwirkungen und den Widerstand für Brückenbauwerke

Berechnung und Ergebnisse

Ausgehend von den Eingabedaten und den benutzerdefinierten Schäden werden in dem LZM-Tool pro Anlage folgende Berechnungen durchgeführt:

- Schadensprognose: deterministisch mit Verhaltensfunktionen/probabilistisch mit Markov-Ketten basierend auf vordefinierten 6-Jahres-Intervall-Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen
 - Die Werte der Schadensschwere werden zwischen den berechneten Werten interpoliert.

- Auswirkungen der Prognosewerte der Schäden auf den Widerstand der Anlage mittels eines Bayes'schen Netzes
 - Die Schäden beziehen sich auf die S-Werte in Rahmen von SIB-Bauwerke. Deren Werte und Lage in Bezug auf die gefährdeten Bereiche werden vom Benutzer eingegeben.
- Probabilistische Berechnungen für Zuverlässigkeitsindizes mittels der FORM-Methode (First Order Reliability Method)

Im Falle eines Brückenbauwerks enthalten die Ergebnisse insgesamt 22 Werte für die berechneten Zuverlässigkeitsindizes β pro Versagensart (Biegung, Querkraft) und betrachtetem Fall (ULS, SLS):

- à priori Zuverlässigkeit (keine Schäden) → ein Wert
- aktualisierte Zuverlässigkeit aufgrund von vorhandenen Schäden (aktuelles Jahr) → ein Wert
- prognostizierte Zuverlässigkeit aufgrund der prognostizierten Schadensentwicklung (120 Jahre Intervall) → 20 Werte.

Diese Werte werden im LZM-Tool im Ansichtsfenster Anlagedaten dargestellt (vgl. Bild 6-17).

6.4.4 Bewertung des KPI Zuverlässigkeit auf der Netzebene

Um den KPI Zuverlässigkeit für ein Netz zu berechnen, müssen zunächst die Zuverlässigkeitsindizes für jede Anlage berechnet werden. Für jede Anlage wird die maximale Ausfallwahrscheinlichkeit derjenigen Anlagen, die den β -Wert (Biegung, Querkraft) – Werten entsprechen, als Repräsentant für den ULS- bzw. SLS-Zustand genommen. Alle Kombinationen von Anlagenausfällen, d. h., die Fahrt von Punkt A nach Punkt B ist innerhalb des analysierten Teilnetzes unmöglich, müssen ermittelt werden (vgl. Bild 6-9). Die Kombinationen werden als sich gegenseitig ausschließend betrachtet, so dass die Ausfallwahrscheinlichkeiten für jede Kombination addiert werden können, um den KPI Zuverlässigkeit auf der Netzebene zu berechnen. Dies erfolgt im LZM-Tool automatisch (A- und B-Knoten werden fiktiv als Start- und Endknoten eines Netzgraphen definiert).

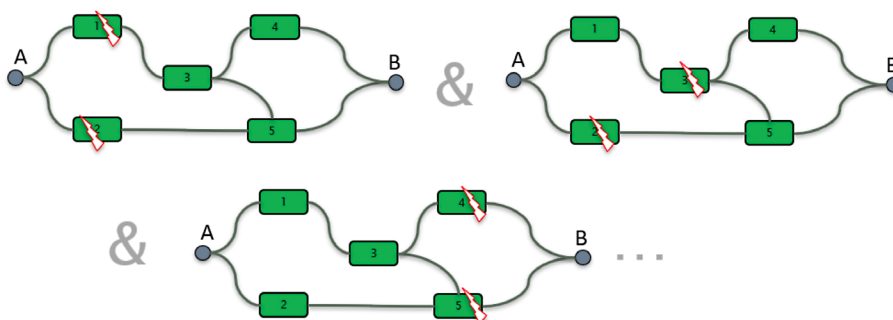


Bild 6-9: Mögliche Kombinationen für die Sperrung der Verbindung von A nach B (gleichzeitiger Ausfall von mehreren Anlagen)

6.5 Sicherheit für Nutzer und Dritte

6.5.1 Allgemeines

Die Sicherheit für Nutzer eines Bauwerks und Dritte ist ein Maß für die Bauwerksausbildung nach anerkannten Regeln der Technik zum jeweiligen Prüfungszeitpunkt, welche die Anforderungen an Sicherheit und Ordnung hinsichtlich der gefahrlosen und vorgesehenen

Nutzung des Bauwerkes beinhaltet. Der konkreteste Indikator für die Sicherheit der Nutzer und Dritte ist die Unfallrate/Unfallzahl. Hier werden nur die Unfälle erfasst, die auf einen mangelhaften Zustand des Bauwerkes oder eines Elementes zurückzuführen sind.

6.5.2 Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Sicherheit eines Bauwerks

Die Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Sicherheit eines Bauwerks ist in Bild 6-10 dargestellt.

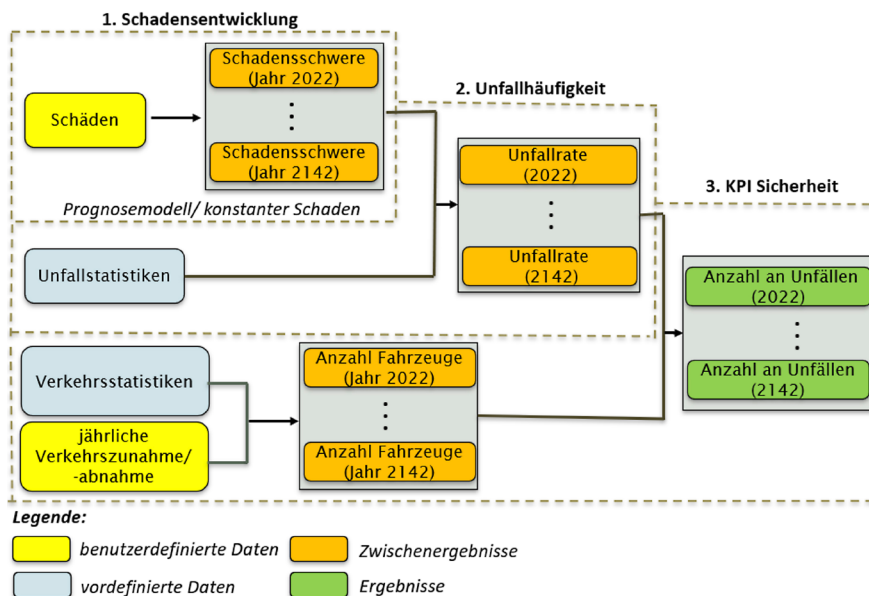


Bild 6-10: Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Sicherheit eines Bauwerks

Die Anzahl der wahrscheinlichen Unfälle aufgrund von Schäden an einer Anlage wird auf der Grundlage der Unfallstatistik und der Anzahl der Fahrzeuge, die jährlich im Netz unterwegs sind, berechnet. Die jährliche Verkehrszunahme/-abnahme wird als benutzerdefinierter Parameter angegeben, der für die Prognose der zukünftigen Unfallzahlen verwendet wird.

6.5.3 Eingangsdaten, Zwischenergebnisse und Ergebnisse

Die Daten zur Bewertung des KPI Sicherheit für Nutzer und Dritte auf der Anlagenebene sind:

- Benutzerdefinierte Eigenschaften:
 - Schaden pro Anlage (Standort und Schwere)
 - jährliche Verkehrszunahme/-abnahme
- Vordefinierte Eigenschaften:
 - Schadenarten
 - Matrizen/Funktionen zur Prognose der Schadensentwicklung
 - Unfallstatistiken (Schäden als Hauptursache)
 - Verkehrsstatistiken (d. h. DTV, Passagieranzahl)

Schäden pro Anlage und Schadensarten

Wie bereits erörtert, werden die vorhandenen Schäden gemäß der RI-EBW-PRÜF-Methodik mit S- und V-Bewertungen (Werte 0 bis 4) bewertet. Für jeden Anlagentyp müssen die

entscheidenden Schäden identifiziert werden, die in Betracht gezogen werden sollen (vgl. z. B. Tabelle 6-6). Es ist wichtig, den Umfang der Auswirkungen für jede Schadensart vorzudefinieren, d. h. ihre Auswirkungen auf die Sicherheit (V-Bewertung) abzuschätzen. Im Falle einer Brücke ist die entsprechende Beispieltabelle angegeben.

Schadensart	zeitliche Auswirkungen	keine zeitlichen Auswirkungen
Brückenbeläge schadhaft		x
Schutzeinrichtungen nicht funktionsfähig		x
Beschilderung unvollständig		x
Querrisse Spannbeton	x	
Längsrisse	x	
Schrägrisse	x	

Tab. 6-6: Schadensarten für Brücken in Bezug auf die Sicherheit (V-Bewertung)

Prognose der Schadensentwicklung

Einige Schäden ändern sich im Laufe der Zeit und es besteht die Notwendigkeit, ein Schadensprognosemodell zu erstellen (deterministisch oder probabilistisch), während andere Schäden über die Zeit konstant bleiben.

Verkehrstatistiken und Verkehrsprognose

Die Anzahl und Art der Fahrzeuge, die in einem Netz und die untersuchten Infrastrukturbauwerke nutzen, oder die Anzahl der Fahrgäste in Zügen sind Eingangsgrößen, die erhoben werden können und üblicherweise in den Datenbanken gespeichert werden. Andererseits kann die Prognose der zukünftigen Verkehrsbelastung mit Unsicherheiten behaftet sein. Hier können die historischen Daten verwendet werden, um die jährliche Zunahme/Abnahme des Verkehrs zu schätzen. Dieser Parameter ist in dem LZM-Tool benutzerdefiniert anpassbar (vgl. Bild 6-30).

Unfallstatistiken

In Abhängigkeit der sogenannten V-Bewertung liegen statistische Annahmen als Berechnungseingaben für unterschiedliche Schadensarten zugrunde, die eine Aussage zur Unfallrate eines Verkehrsunfalls aufgrund eines Schadens am Bauwerk ermöglichen. So wird im vorliegenden Beispiel angenommen, dass bspw. eine Unfallrate von 0,035 Fahrzeuge (Fz.) pro 1 Mio. Fz. aufgrund einer V-Bewertung von 3 hinsichtlich Abplatzungen am Oberbau zu erwarten ist (vgl. Bild 6-11). Es wird empfohlen anhand von empirischen Unfalldaten die im

^ Auswirkungen auf die Sicherheit

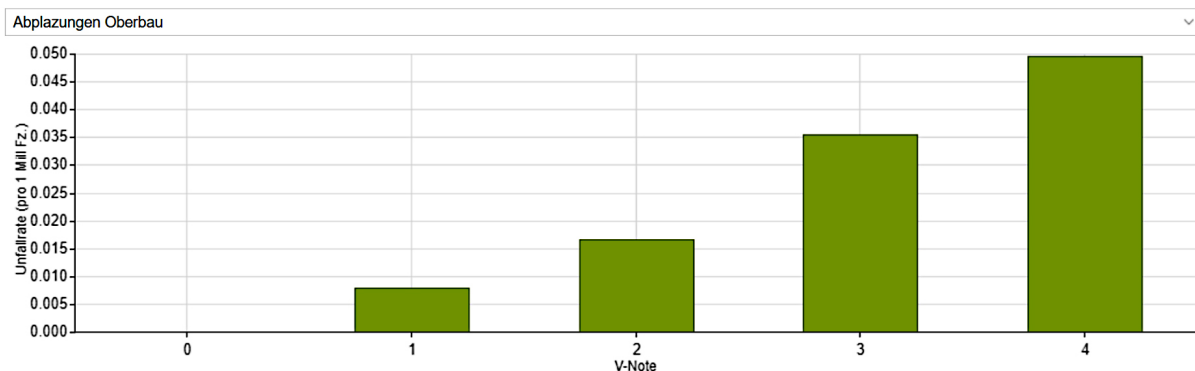


Bild 6-11: Getroffene Annahme der zu erwartenden Anzahl an Unfällen je Mio.-Fz. in Abhängigkeit der V-Bewertung, Bildschirmfoto des LZM-Prototyps

IT-Prototyp getroffenen Annahmen zu den Unfallhäufigkeiten aufgrund eines schadhafte Bauwerks zu validieren, gleichwohl diese Daten jedoch zumeist nicht veröffentlicht sind.

Eine Schätzung des Anteils der Unfälle, die auf Infrastrukturmängel zurückzuführen sind, kann jedoch durch die Kombination der Erkenntnisse aus der Unfallstatistik vorgenommen werden (z. B. DeStatis und German in-depth accident study (GIDAS)), Studien (z. B. ETAC Studie der Europäischen Kommission), und Leitlinien (z. B. AASHTO 2010). Hinsichtlich der Arten von Infrastrukturschäden und der damit verbundenen Schadensschwere, die eine Unfallursache sein können, sollten weiterführende Studien (z. B. HEGEWALD et al. (2015) verwendet werden.

Bewertung und Ausgaben

Sind an einer Anlage mehrere Schäden mit einer V-Bewertung ausgewiesen, so stellt die Gesamtunfallhäufigkeit eine Summe der Unfallhäufigkeiten pro Einzelschaden dar. Es wird also davon ausgegangen, dass Unfallereignisse aufgrund einer Schadensart an einer Anlage statistisch unabhängig voneinander sind. Die Lage von Schäden, die eine V-Bewertung aufweisen, werden bei der Berechnung der möglichen Anzahl von Unfällen nicht berücksichtigt – es wird davon ausgegangen, dass die vordefinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten diese Informationen bereits berücksichtigen. Der KPI Sicherheit auf der Anlagenebene wird als die Anzahl der möglichen Unfälle aufgrund eines Anlagenzustands angenommen. Er berücksichtigt die jährliche Anzahl der Fahrzeuge, die diese Anlage nutzen – eine vordefinierte Information, die auf Verkehrszählungen basiert.

6.5.4 Bewertung des KPI Sicherheit auf Netzebene

Der Jahreswert des KPI Sicherheit auf der Netzebene wird als Summe aller wahrscheinlichen Unfallereignisse eines Jahres für alle Anlagen innerhalb des analysierten Netzes berechnet.

6.6 Maßnahmen

6.6.1 Allgemeines

Der erste Schritt bei der Planung der Erhaltungsmaßnahmen erfolgt auf der Ebene der Anlagen. Dies geschieht auf Basis der Werte der KPIs Zuverlässigkeit und Sicherheit, d. h. das Ziel der gewählten Maßnahmen ist es, diese KPIs zu verbessern. Allerdings müssen die Kosten dieser Maßnahmen im Laufe der Zeit ebenso berücksichtigt werden, wie die Auswirkungen auf das analysierte Netz. Es kann der Fall eintreten, dass mehrere Anlagen gleichzeitig erhalten werden, was zu einer geringeren Verfügbarkeit des Netzes führen kann (längere Fahrzeiten aufgrund von Staus und Umleitungen). Auch die Maßnahmen haben negative Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit. Ein Effekt ist der im Rahmen des Herstellungsprozesses hervorgerufene Ausstoß an Emissionen. Ein weiterer Effekt tritt während der Maßnahmendurchführung auf und spiegelt sich in erhöhten Schadstoffemissionen aufgrund von verlängerten Reisewegen wider. Diese Auswirkungen werden im LZM-Tool berücksichtigt, was eine Szenarienanalyse von Erhaltungsstrategien ermöglicht und bei der Entscheidungsfindung auf der Grundlage der Bewertung der KPIs hilft. Die rein administrativen Maßnahmen wie Geschwindigkeitsreduzierung, Lastbegrenzung und Fahrbahnsperrungen, um die Schadensentwicklung zu stoppen oder zu die potenzielle Anzahl an Unfällen zu reduzieren, sind im Prototyp nicht modelliert.

6.6.2 Eingaben

Jede Erhaltungsmaßnahme wird auf der Anlagenebene festgelegt und hat die folgenden, vom Benutzer definierten Attribute:

- Name
- Typ (drei vordefinierte Arten: Instandsetzung, Teilerneuerung und Ersatzneubau)
- Kosten (in KEUR)
- Dauer (in Tagen)
- Anwendungsjahr
- Umfang (betroffener Schäden)
- Überschneidung

Die maximale Dauer einer Aktivität beträgt ein Jahr, und wenn die Aktivität länger dauert, sollte dies in dem/den folgenden Jahr(en) festgelegt werden. Standardmäßig beginnt jede Aktivität am Anfang des Anwendungsjahres. Die Wahl kann aber auch so getroffen werden, dass Überschneidungen mit anderen Aktivitäten auf anderen Anlagen im selben Jahr vermieden werden (oder diese Überschneidung wird als minimal möglicher Wert angenommen, der von der Aktivitätsdauer innerhalb eines Jahres abhängt).

Eine oder mehrere Aktivitäten werden pro Anlage definiert und diese definieren ein Maßnahmenzenario. Die Kombination von Maßnahmenzenarien für die Anlagen innerhalb eines Netzes definiert eine Erhaltungsstrategie, für die die KPI auf der Netzebene berechnet werden.

6.6.3 Wirkung der Maßnahmen

Die Erhaltungsmaßnahmen haben folgende Auswirkungen:

- auf der Anlagenebene:
 - Reparatur von Schäden und somit Verbesserung des Bauwerkszustands
 - CO₂-Emissionen im Prozess der Baustoffherstellung
- auf der Netzebene:
 - Verkehrsbeeinträchtigung
 - zusätzliche Reisezeiten
 - zusätzliche CO₂-Emissionen (durch zusätzliche Reisewege)

Anlagenebene

Der Umfang der Maßnahmen wird durch die Auswahl der von einer Maßnahme betroffenen Schäden festgelegt. Jede Maßnahmenart hat eine spezifische Auswirkung auf die Schadensschwere innerhalb des Prototyps (sowohl S-Bewertung als auch V-Bewertung) (vgl. Bild 6-25). Eine Instandsetzungsmaßnahme setzt die Schadensschwere um einen Wert von 1,0 zurück, (z. B. vor einer Maßnahme eine Schadensschwere gilt $S = 3$, und nach der Maßnahme wird sie zu $S = 2$). In ähnlicher Weise wird angenommen, dass die Teilerneuerung den Schadensschweregrad um einen KPI-Wert von 2,0 aktualisiert, während der Ersatzneubau den Schadensschweregrad zurück auf 0 setzt. Nach dem Jahr, in dem eine Aktivität angewandt wird, verschlechtern sich die betroffenen Schäden weiter gemäß dem zuvor gewählten Schadensprognosemodell.

Die Bewertung der CO₂-Emissionen in einem Herstellungs- und Anwendungsprozess eines Maßnahmenzenarios umfasst mehrere Parameter. Der prozentuale Anteil eines Anlagenolumens, der im Rahmen einer Maßnahmenarten anfällt, und die CO₂-Emissionsmengen pro verwendetem Baumaterial (d. h. Beton und Stahl) werden als benutzerdefinierte Parameter im LZM-Tool eingestellt (vgl. Tabelle 6-8). Weitere Erläuterungen zu den Auswirkungen der Maßnahmenzenarios auf die CO₂-Emissionen im Prozess der Herstellung und Anwendung werden in Kapitel 6.8.2 (KPI Nachhaltigkeit) gegeben.

Netzebene

Neben der Auswirkung einer Maßnahme auf der Anlagenebene, kommt es auch zu Auswirkungen auf den Verkehrsablauf innerhalb des Netzes, die in dem LZM-Tool aus Gründen der Vereinfachung vordefiniert sind. Beispielsweise wird bei einer Instandsetzung eine Geschwindigkeitsreduzierung entlang des Baustellenbereichs angeordnet, bei einer Teilerneuerung kommt es zu einer Kapazitätsreduzierung, während bei einem Ersatzneubau eine Vollsperrung der Anlage erforderlich ist. Das Attribut Dauer gibt an, wie lange sich der Effekt auswirkt. Weitere Erläuterungen zu den Auswirkungen der Maßnahmenzenarios auf die netzweiten KPI (Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit) werden in den nächsten Kapiteln gegeben (6.7 und 6.8).

6.7 Verfügbarkeit

6.7.1 Allgemeines

Innerhalb des LZM-Tools wird angenommen, dass Änderungen in der Verfügbarkeit eines Bauwerks oder eines Teilnetzes stets die Folge von einer menschlichen Entscheidung, z. B. zur Durchführung einer Erhaltungsmaßnahme, sind. Diese Maßnahmen führen in der Regel zu einer Veränderung des Verkehrsflusses und somit zu einer Veränderung von Reisezeiten, die als KPI Verfügbarkeit beschrieben werden. Dies bedeutet, dass andere plötzlich hervorgerufene Ereignisse, wie bspw. durch Naturgefahren, und deren Auswirkungen auf die Verfügbarkeit nicht abgebildet werden.

6.7.2 Methodik zur Bewertung der Verfügbarkeit einer Erhaltungsstrategie

Die Methodik zur Bewertung der Verfügbarkeit einer Erhaltungsstrategie ist in Bild 6-12 dargestellt. Die Erhaltungsstrategie definiert die Verkehrsstörungen aufgrund der Maßnahmen in einem Netz für jedes Jahr (Schritt 1 in Bild 6-12). Dabei umfasst eine Kombination (Komb.) den Zustand des Netzes in Bezug auf die Funktionalität der Anlagen, die über eine Störungsart (z. B. Geschwindigkeitsbeschränkung, Fahrbahnspernung, Vollsperrung) und die Dauer dieser Störungen definiert wird. In der Kombination ist auch die Überschneidung der Aktivitäten für zwei oder mehrere Anlagen in einem Jahr enthalten (vgl. Kapitel 6.7.3).

Der KPI Verfügbarkeit wird anhand von zusätzlichen Reisezeiten beurteilt, die durch die gewählte Erhaltungsstrategie hervorgerufen werden (Schritt 2 in Bild 6-12). Die verkehrlichen Auswirkungen der Erhaltungsstrategie werden mithilfe eines Verkehrsmodells bzw. einer Verkehrssimulation abgeschätzt. Dies erfolgt getrennt für den Personen- und den Güterverkehr. Dieser Bearbeitungsschritt erfolgt außerhalb des IT-Prototyps. Hierbei erfolgen die Berechnungen z. B. jahresweise für ausgewählte Teilnetze und die darin enthaltenen Bauwerke.

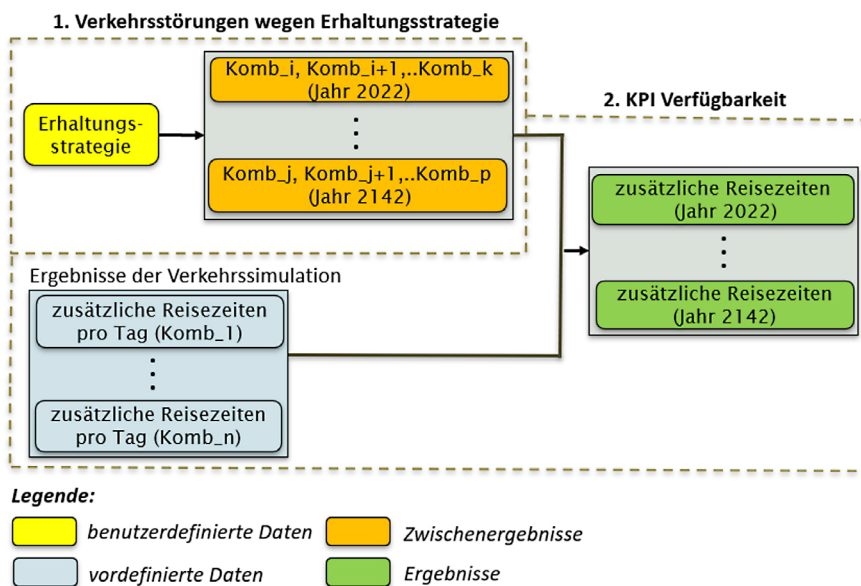


Bild 6-12: Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Verfügbarkeit einer Erhaltungsstrategie

6.7.3 Eingangsdaten, Zwischenergebnisse und Ergebnisse

Folgende Eingangsgrößen werden für die Bewertung der Verfügbarkeit benötigt:

- benutzerdefinierte Daten:
 - Erhaltungsstrategiedaten
- vordefinierte Daten:
 - Ergebnisse einer Verkehrssimulation

Erhaltungsstrategiedaten

Die in jedem Jahr zu berücksichtigten Kombinationen von Verkehrsstörungen aufgrund von Erhaltungsmaßnahmen im Netz werden im LZM-Tool auf der Grundlage der benutzerdefinierten Daten zu Erhaltungsstrategien abgeleitet. Das Prinzip zur Auswertung dieser Zwischenergebnisse ist in Bild 6-13 dargestellt.

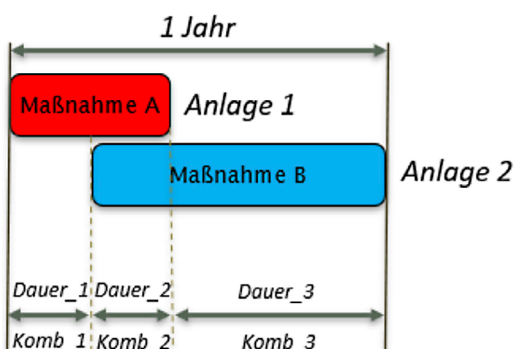


Bild 6-13: Prinzip zur Bewertung der Kombinationen von Verkehrsstörungen

So gibt es zum Beispiel Anlage 1 und Anlage 2 mit Maßnahme A und Maßnahme B, die sich in einem Jahr überschneiden. Hierbei gibt es drei Kombinationen (Komb_1 bis Komb_3) von Verkehrsstörungen mit entsprechenden Dauern (in Tage), die bei der Berechnung der KPI-Verfügbarkeit in diesem Jahr zu berücksichtigen sind. Die Dauer_1 impliziert eine Verkehrsstörung aufgrund von Maßnahme A, Dauer_2 impliziert eine Störung aufgrund von gleichzeitigen Aktivitäten und Dauer_3 bezieht sich auf Maßnahme B. Derzeit erlaubt

das LZM-Tool die Berücksichtigung der maximalen Überschneidung von zwei Maßnahmen innerhalb eines Jahres (diese beginnen zum gleichen Zeitpunkt) oder die minimale Überschneidung innerhalb eines Jahres (z. B. wie in Bild 6-13). Dies bedeutet, dass Maßnahmen, die länger als ein Jahr andauern, innerhalb des IT-Prototyps als zwei aufeinanderfolgende Maßnahmen modelliert werden müssen (vgl. Kapitel 6.6.2).

Ergebnisse der Verkehrssimulation

Verkehrsstörungen führen zu einer verminderten Verfügbarkeit des Netzes, die sich in verlängerten Reisezeiten der Verkehrsteilnehmer (Personen- und Güterverkehr) widerspiegelt. Die verlängerten Reisezeiten pro Tag und pro Personen- und Güterverkehr müssen für alle relevanten Kombinationen von Erhaltungsmaßnahmen an den Bauwerken vorab berechnet werden. Dies erfolgt mithilfe von Verkehrssimulationen (z. B. PTV Vissim). Die Ergebnisse dieser Simulationen werden exportiert und in das LZM-Tool eingelesen. Sie müssen für jede Kombination von Verkehrsstörungen die damit verbundenen täglich zusätzlichen Reisezeiten pro Verkehrsart (z. B. Personen- und Güterverkehr) enthalten. Jede Kombination von Verkehrsstörungen ist eindeutig mit den Anlagen und der Art der Verkehrsstörung definiert, die sich auf die Maßnahmenarten in dem LZM-Tool bezieht (Instandhaltung, Teilerneuerung, Ersatzneubau). In dem in Tabelle 6-7 dargestellten Beispiel bezieht sich Komb_1 auf die Instandhaltung der Anlage 1, Komb_2 auf die gleichzeitige Instandhaltung der Anlage 1 und Teilerneuerung der Anlage 2, während sich Komb_3 auf die Teilerneuerung der Anlage 2 bezieht.

Komb.	Instandhaltung von Anlagen	Zusätzliche Reisezeiten DTV [h/Tag]	Zusätzliche Reisezeiten SV [h/Tag]
1	A1_I	123.4	39.4
2	A1_I & A2_T	453.3	164.4
3	A2_T	223.2	74.1
...

Tab. 6-7: Beispiel für die Eingangsdaten in das LZM-Tool aus einer Verkehrssimulation

Ergebnisse der Bewertung

Für eine benutzerdefinierte Erhaltungsstrategie werden die Ergebnisse pro Verkehrsart berechnet (d. h. Personen- und Güterverkehr). Die natürlichen Einheiten des KPI Verfügbarkeit werden in Stunden angegeben und beziehen sich auf den jährlichen Zeitverlust der Verkehrsteilnehmenden. In den Jahren ohne Maßnahmen kommt es zu keinen Reisezeitverlusten, d. h. der KPI Verfügbarkeit ist 0. In den Jahren mit einer oder mehreren Maßnahmen an den Bauwerken werden die Kombinationen von Verkehrsstörungen identifiziert und die entsprechenden Dauern für jede betrachtete Kombination berechnet (Bild 6-13). Aus den Ergebnissen der Verkehrssimulationen (Tabelle 6-7) werden die relevanten Daten für die identifizierten Kombinationen abgerufen, mit den zugehörigen Dauern multipliziert und pro Verkehrsart aufsummiert.

6.8 Nachhaltigkeit

6.8.1 Allgemeines

Der Begriff Nachhaltigkeit umfasst ökologische, ökonomische und soziokulturelle sowie funktionale Aspekte. Zur Beurteilung der Nachhaltigkeit werden im Rahmen der prototypischen Anwendung zwei Emissionsquellen betrachtet, um die umwelttechnischen Auswirkungen zu modellieren:

- Energiebedarf mit den Kosten von Maßnahmen verknüpfen
 - Ausstoß von zusätzlichen CO₂-Emissionen in Abhängigkeit des Umfangs an Erhaltungsmaßnahmen (Baustoffherstellung)
- Zusätzliche Fahrtwege aufgrund von Umleitungen
 - Ausstoß von zusätzlichen CO₂-Emissionen

6.8.2 Methodik zur Bewertung der Nachhaltigkeit einer Erhaltungsstrategie (Baustoffherstellung)

Die Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Nachhaltigkeit einer Erhaltungsstrategie aufgrund der Baustoffherstellung ist in Bild 6-14 dargestellt. Für jede Erhaltungsstrategie wird eine Liste von Aktivitäten pro Jahr erstellt (Schritt 1). Die Menge an CO₂-Emissionen wird für jede Maßnahme berechnet, durch Berechnung der Größe des Bauwerks, des CO₂-Ausstoßes pro verwendetem Baumaterial und des Umfangs der Maßnahmen in Form von der zu ersetzenden Masse. In den Jahren, in denen Maßnahmen durchgeführt werden, wird der CO₂-Ausstoß aus den damit verbundenen Maßnahmen summiert.

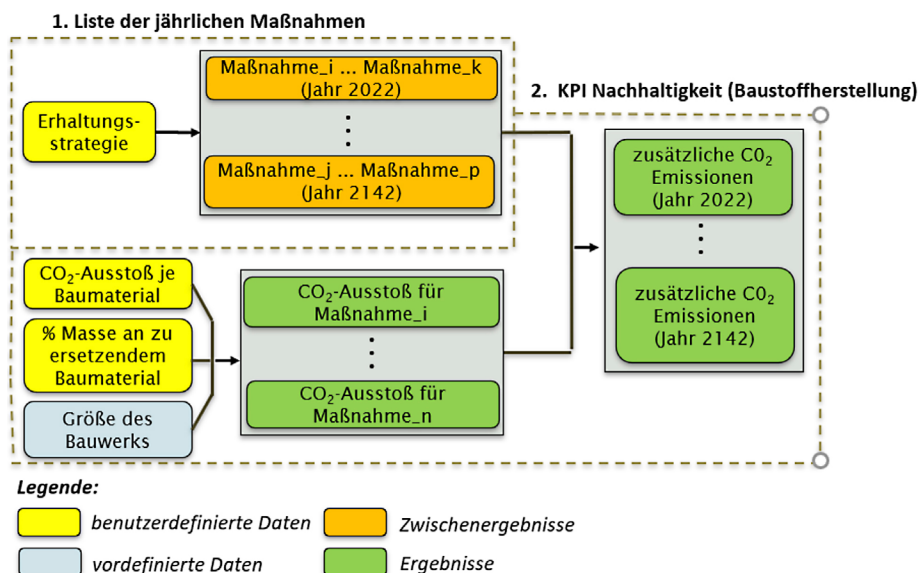


Bild 6-14: Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Nachhaltigkeit einer Erhaltungsstrategie

Eingangsdaten, Zwischenergebnisse und Ergebnisse

Folgende Eingangsgrößen werden für die Bewertung benötigt:

- benutzerdefinierte Daten:
 - Daten zur Erhaltungsstrategie
 - CO₂-Ausstoß je Baumaterial
 - Masse an zu ersetzendem Baumaterial
- vordefinierte Daten:
 - Größe des Bauwerks

Erhaltungsstrategiedaten

Aus den Daten zur Erhaltungsstrategie wird die Liste der Maßnahmenaktivitäten im gleichen Jahr erstellt.

Masse an zu ersetzendem Baumaterial und zugehörige CO₂-Ausstoß

Für die Herstellung der Baustoffe, die im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen eingesetzt werden, wird Energie benötigt (z. B. Herstellung von Beton- und Stahlbauteilen). Das Ausmaß des Energiebedarfs wird vereinfacht anhand des Bauwerkstyps sowie der Erhaltungsmaßnahme abgeschätzt und bewertet. Tabelle 6-8 zeigt die Daten, die bei der Berechnung verwendet werden.

Bauwerkstyp (BST.UBB)	CO ₂ -Ausstoß Baustoffherstellung [kg/t]	Art der Maßnahme	Masse an zu ersetzendem Baumaterial [%]
Stahlbetonbaukonstruktion	590	Instandsetzung	15
		Teilerneuerung	50
		Ersatzneubau	80
Stahlbaukonstruktion	1,500	Instandsetzung	15
		Teilerneuerung	50
		Ersatzneubau	80

Tab. 6-8: Getroffene Annahmen zum CO₂-Ausstoß in Abhängigkeit der Maßnahmenart und Bauwerkstyp (in Anlehnung an BMWSB 2022)

Größe des Bauwerks

Im Falle von SIB-Bauwerke können die Eingabedaten zur Bauwerksgeometrie nicht zur Berechnung eines Bauwerkvolumens verwendet werden, dafür können die Informationen zur Bauwerksfläche und Höhe in Kombination mit dem spezifischen Typ eines Bauwerkquerschnitts verwendet werden (Bild 6-33). Dies wird mit vordefinierten Volumenkoeffizienten demonstriert, die in dem LZM-Tool zu Demonstrationszwecken angegeben werden und mittelfristig auf der Grundlage des Anlagentyps/Materials kalibriert werden sollten.

Ergebnisse der Bewertung

Zur Berechnung wird ein Beispiel angegeben. Dieses basiert auf den Werten in Tabelle 6-8 und der jeweiligen Größe des Bauwerks. Nehmen wir an, dass es zwei Anlagen gibt, die im selben Jahr eine Maßnahme haben. Hierbei wird davon ausgegangen, dass das Volumen bereits berechnet ist.

Anlage 1 – Stahlbetonbrücke

Bauwerkskonstruktion:	Stahlbetonbauwerk
Art der Maßnahme:	Instandsetzung
Größe des Bauwerks:	265 m ³
CO ₂ -Ausstoß Zementherstellung:	590 kg/t
CO ₂ -Ausstoß Stahlherstellung:	1.500 kg/t
Zementgehalt:	300 kg/m ³
CO ₂ -Ausstoß für Maßnahme [t]:	$265 \text{ m}^3 * 0,15 * 300 \text{ kg/m}^3 * 590 \text{ kg/t} = 5,96 \text{ t}$

Anlage 2 – Stahlbrücke

Bauwerkskonstruktion:	Stahlbauwerk
Art der Maßnahme:	Teilerneuerung
Größe des Bauwerks:	5,0 m ³
CO ₂ -Ausstoß Stahlherstellung:	1.500 kg/t
Volumengewicht:	7850 kg/m ³
CO ₂ -Ausstoß für Maßnahme [t]:	$5,0 \text{ m}^3 * 7.850 \text{ kg/m}^3 * 0,5 * 1500 \text{ kg/m}^3 = 29,40 \text{ t}$

Die gesamten CO₂-Emissionen für die Herstellung der Baustoffe für die geplanten Maßnahmen in diesem Jahr betragen: 5,96 t + 29,40 t = 33,36 t.

Neben den CO₂-Emissionen aus der Baustoffherstellung sollten zukünftig auch die Emissionen aus Transport und Einbau der Materialien berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.4.4).

6.8.3 Methodik zur Bewertung der Nachhaltigkeit einer Erhaltungsstrategie (Umleitungstrecke)

Die Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Nachhaltigkeit einer Erhaltungsstrategie aufgrund einer Umleitungstrecke ist in Bild 6-15 dargestellt. Wie für die Verfügbarkeit erklärt in Kapitel 6.7.3 die Erhaltungsstrategie definiert die Verkehrsstörungen aufgrund der Maßnahmen in einem Netz für jedes Jahr (Schritt 1). Aufgrund von durch Erhaltungsmaßnahmen bedingte Umleitungstrecken kommt es zu einem erhöhten Ausstoß von CO₂ im Vergleich zum Referenzszenario ohne Erhaltungsmaßnahme (Schritt 2). Die verkehrlichen Auswirkungen der Erhaltungsstrategie werden mithilfe eines Verkehrsmodells bzw. -simulation abgeschätzt, außerhalb des IT-Prototyps. Dies Ergebnisse erfolgt getrennt für Fahrzeugkategorien, zu zusätzlichen CO₂ Emissionen erhalten.

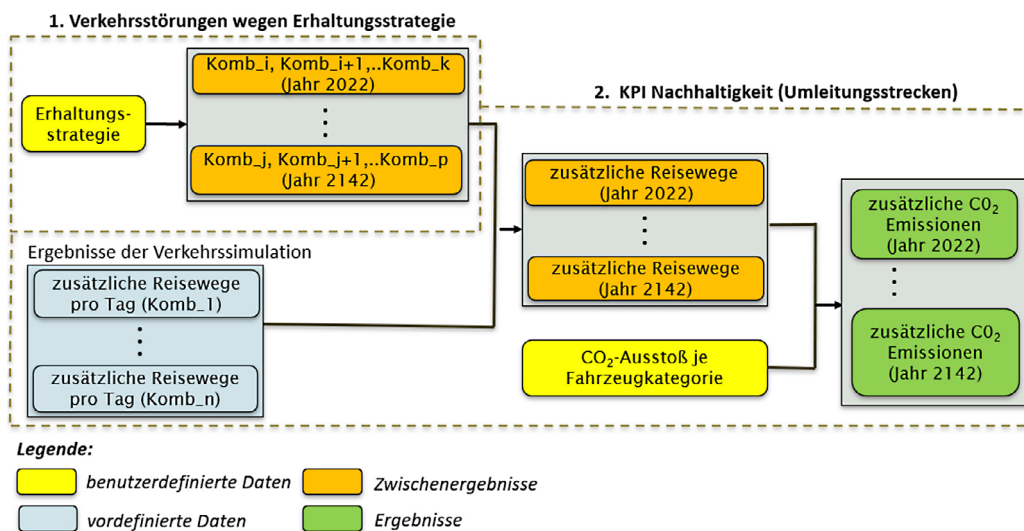


Bild 6-15: Methodik zur Ermittlung und Bewertung der KPI Nachhaltigkeit einer Erhaltungsstrategie aufgrund Umleitungstrecken

Eingangsdaten, Zwischenergebnisse und Ergebnisse

Folgende Eingangsgrößen werden für die Bewertung benötigt:

- benutzerdefinierte Daten:
 - Erhaltungsstrategiedaten
 - CO₂-Ausstoß je Fahrzeugkategorie
- vordefinierte Daten:
 - Ergebnisse der Verkehrssimulation

Erhaltungsstrategiedaten

Das Prinzip für die Bewertung der Kombinationen von Verkehrsstörungen wurde bereits in Kapitel 6.7.3 erläutert.

Ergebnisse der Verkehrssimulation

Diese Daten werden vorberechnet und von einer externen Quelle geliefert. Sie müssen aus der Anzahl der Kombinationen von Verkehrsstörungen und den damit verbundenen

täglich zusätzlichen Entfernungen pro Verkehrsart (z. B. Personen- und Güterverkehr) bestehen. Jede Kombination von Verkehrsstörungen ist eindeutig mit den Anlagen und der Art der Verkehrsstörung definiert, die sich auf die Art der Tätigkeit bezieht (Instandhaltung, Teilerneuerung, Ersatzneubau). In dem in Tabelle 6-9 dargestellten Beispiel bezieht sich Komb_1 auf die Instandhaltung der Anlage 1, Komb_2 auf die gleichzeitige Instandhaltung der Anlage 1 und Teilerneuerung der Anlage 2, während sich Komb_3 auf die Teilerneuerung der Anlage 2 bezieht.

Komb.	Instandhaltung von Anlagen	zusätzliche DTV [km/Tag]	zusätzliche SV [km/Tag]
1	A1_I	3123.4	339.4
2	A1_I & A2_T	5453.3	1624.4
3	A2_T	2213.2	741.1
...

Tab. 6-9: Beispiel für die Eingangsdaten der Verkehrssimulation (tägliche zusätzliche Entfernungen pro Verkehrsart)

CO₂-Ausstoß je Fahrzeugkategorie

Aufgrund von Verfügbarkeitsengpässen kommt es zu erhöhten CO₂-Emissionen, da die Verkehrsteilnehmer zusätzliche Strecken auf Umleitungsstrecken zu ihren Zielen zurücklegen und insgesamt mehr Kraftstoff verbrauchen. Um die Emissionen zu berechnen, werden im LZM-Tool die Durchschnittswerte der Emissionen für das Netz in (gCO₂/km) für die Verkehrsmengen (Personenverkehr, Güterverkehr) ermittelt. Die nachstehende Tabelle 6-10 zeigt die jeweiligen CO₂-Ausstöße für Fahrzeuge des Personen- und Güterverkehrs.

Fahrzeugkategorie	CO ₂ -Ausstoß [g/km] Personenverkehr		CO ₂ -Ausstoß [g/km] Güterverkehr	
	außerorts	innerorts	außerorts	innerorts
VEL	54	60	378	420
HEV	87	97	287	292
Petrol	145	162	478	487
Diesel	123	143	969	1.047
Hydro	108	120	756	840
Mittelwert	103	116	574	617

Tab. 6-10: Beispiel für CO₂-Ausstoß je Fahrzeugkategorie (RØDSETH et al. (2019))

Ergebnisse der Bewertung

Für eine benutzerdefinierte Erhaltungsstrategie werden die Ergebnisse pro Verkehrsart berechnet. Die natürlichen Einheiten des KPI Nachhaltigkeit werden in Tonnen angegeben und beziehen sich auf die jährlichen zusätzlichen Reisewege der Nutzer. In den Jahren ohne Maßnahmen kommt es zu keinen zusätzlichen Reisewegen, d. h. der KPI Nachhaltigkeit ist 0. In den Jahren mit einer oder mehreren Maßnahmen an den Bauwerken werden die Kombinationen von Verkehrsstörungen ermittelt und die entsprechenden Dauern für jede identifizierte Kombination berechnet (vgl. Kapitel 6.7.3). Aus den Ergebnissen der Verkehrssimulationen (vgl. Kapitel 6.7) werden die relevanten Daten für die identifizierten Kombinationen abgerufen, mit den zugehörigen Dauern multipliziert und pro Verkehrsart aufsummiert. Die so ermittelten zusätzlichen jährlichen Entfernungen werden mit den Durchschnittswerten der Emissionen für das Netz in (gCO₂/km) für die Verkehrsmengen ermittelt, um die Werte für den KPI zu erhalten.

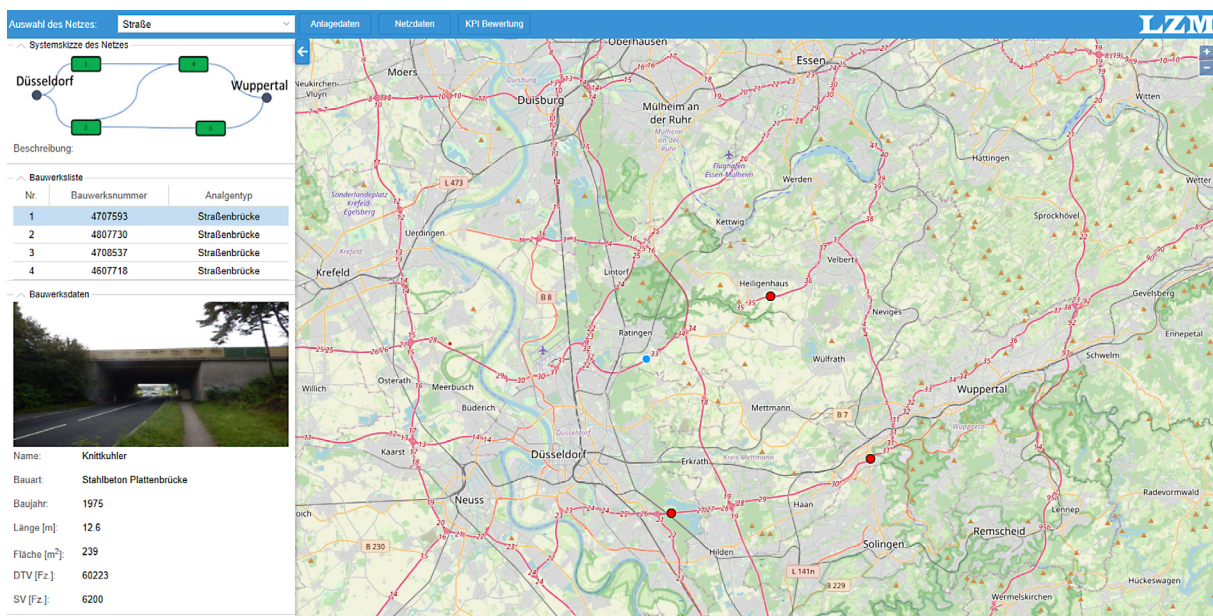
6.9 Grafisches User Interface

6.9.1 Allgemeines

Über das webbasierte grafische User Interface (GUI) gelangt der Nutzer zu einzelnen Ansichtsfenstern innerhalb des IT-Prototyps. Zunächst kann der Nutzer einige Grundfunktionen (Kapitel 6.9.2) auswählen innerhalb des Startfensters auswählen. Des Weiteren stehen dem Nutzer die Menüfunktionen Anlagedaten, Netzdaten und KPI Bewertung zur Verfügung.

6.9.2 Grundfunktionen

Der Anwender startet mit einer Kartendarstellung zu den Infrastrukturbauwerken je Verkehrsträger. Der Nutzer kann zunächst auswählen, welchen Verkehrsträger er analysieren möchte. Dazu wählt er in dem linken oberen Bereich des Fensters unter Auswahl des Netzes zwischen den drei Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasser aus (vgl. Bild 6-16).



The screenshot displays the LZM software interface. At the top, there is a navigation bar with tabs for 'Anlagedaten', 'Netzdaten', and 'KPI Bewertung'. The main area shows a map of the region around Düsseldorf and Wuppertal, with various infrastructure projects marked. On the left side, there is a sidebar with the following sections:

- Auswahl des Netzes:** A dropdown menu set to 'Straße'.
- Systemskizze des Netzes:** A diagram showing a network of nodes and connections between 'Düsseldorf' and 'Wuppertal'.
- Bauwerksliste:** A table listing infrastructure projects.
- Bauwerksdaten:** A section containing a photo of a bridge and its technical specifications.

Nr.	Bauwerksnummer	Anlagentyp
1	4707593	Straßenbrücke
2	4807730	Straßenbrücke
3	4708537	Straßenbrücke
4	4607718	Straßenbrücke

Bauwerksdaten:

- Name: Knitskuhler
- Bauart: Stahlbeton Plattenbrücke
- Baujahr: 1975
- Länge [m]: 12.6
- Fläche [m²]: 239
- DTV [Fz]: 60223
- SV [Fz]: 6200

Bild 6-16: Übersicht der Infrastrukturbauwerke in der Kartendarstellung

Nach Auswahl des Verkehrsträgers erscheint eine Systemskizze des Teilnetzes mit den zugehörigen Infrastrukturbauwerken und deren Lage innerhalb des Netzes. Zudem werden ein Startpunkt und ein Endpunkt angezeigt (in Bild 6-16 sind dies Düsseldorf und Wuppertal). Alle Berechnungen von PI und KPI werden pro Netz durchgeführt. Jedes Netz ist als Diagramm mit Verknüpfungen definiert, die Knoten miteinander verbinden. Die Infrastrukturbauwerke stellen die Knoten innerhalb des Diagramms dar. Die Verbindungen werden mit einem Anfangs- und einem Endknoten definiert.

Darunter befindet sich die Bauwerksliste, die sämtliche Bauwerke innerhalb des Teilnetzes beinhaltet. Unter dem Menüpunkt Bauwerksdaten erhält der Anwender durch Auswahl des jeweiligen Bauwerks die Informationen zu Name, Bauart, Baujahr, Länge, Fläche, DTV, SV sowie ein Foto des Bauwerks.

6.9.3 Anlagedaten

Das Menü Anlagedaten beinhaltet weitere Informationen zu den einzelnen Bauwerken. Dazu zählen die Definition der vorhandenen Schäden am Bauwerk, die geplanten Maßnah-

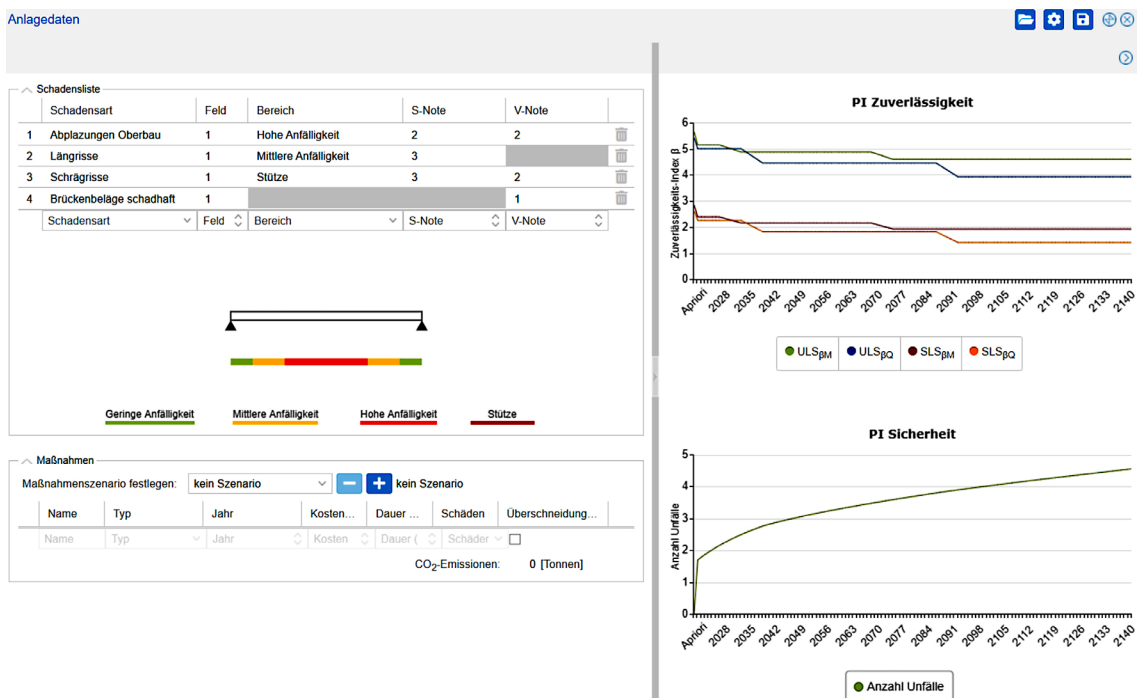


Bild 6-17: Fensteransicht zu den Anlagedaten (keine Maßnahmenzenarien angewendet)

men im Rahmen von definierten Szenarios sowie Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Zuverlässigkeitsindikatoren und des PI Sicherheit (vgl. Bild 6-17).

Die Schadensliste beinhaltet die Attribute Schadensart, Feld, Bereich, S-Bewertung und V-Bewertung. Unterhalb der tabellarischen Darstellung der Schäden wird dem Anwender eine Skizze zum statischen System inklusive der anfälligen Zonen des Bauwerks angezeigt. In dem LZM-Tool ist das statische System eines Infrastrukturbauwerks als Einfeld- oder Mehrfeldträger dargestellt. Die Länge der gefährdeten Zonen ist vordefiniert:

- Geringe Anfälligkeit (grün) = 20 % Spannweite,
- Geringe Anfälligkeit (gelb) = 30 % Spannweite,
- Höhe Anfälligkeit (rot) = 50 % Spannweite, und
- Stütze (dunkelrot) = 20 % Spannweite (Anwendung für durchgehenden Balken)

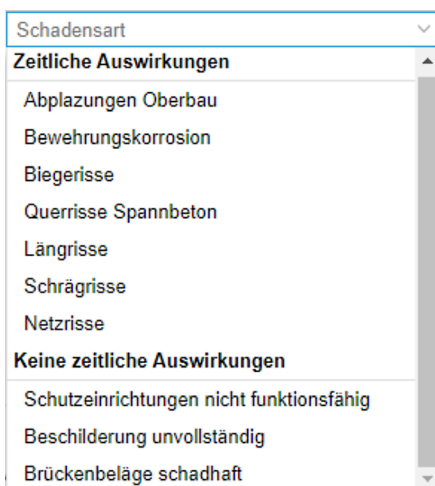


Bild 6-18: Liste mit Schadensarten

Der Schweregrad der Schäden wird gemäß der RI-EBW-PRÜF-Methodik mit S- und V-Bewertungen (Werte 0 bis 4) eingestuft. Im LZM-Tool ist die Liste der Schäden verkehrsträgerabhängig und vordefiniert. Eine Anpassung der Schadensliste ist durch den Anwender derzeit nicht möglich. Es gibt sieben Schäden, die von einem Schadensprozess abhängig sind (vgl. Bild 6-18).

Die Schäden Abplatzungen Oberbau, Bewehrungskorrosion und Querrisse Spannbeton können sowohl S- als auch V-Bewertungen haben, während andere nur eine S-Bewertung aufweist. Es gibt drei Schäden, die nicht von einem Schadensprozess abhängig sind und nur mit einer V-Bewertung benotet werden (vgl. Bild 6-18).

Die ausgewiesenen Schäden an einer Anlage wirken sich negativ auf die Standsicherheit dieser Anlage aus und/oder führen zu einer Erhöhung der Unfallhäufigkeit. Die Auswirkung von Mehrschäden, die mit S-Bewertungen bewertet werden, auf die Verringerung der strukturellen Widerstandsfähigkeit der Anlage. Der Hintergrund für diese Berechnung wird durch Klicken auf den Button Ordner angezeigt. (vgl. Bild 6-19). Darin sind die für die Anwendung des Bayes'schen Netzes verwendeten Eingabedaten und die berechneten Ergebnisse angegeben.

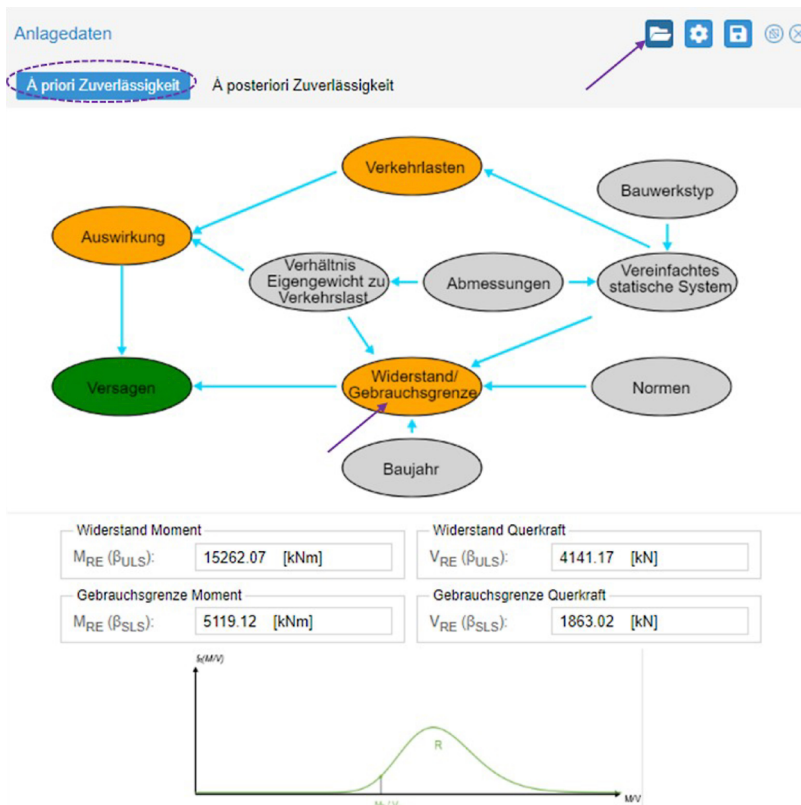


Bild 6-19: Bayes'sches Netz zur Berechnung von a priori Zuverlässigkeitsindizes: Widerstand/Gebrauchsgrenze Eingabedaten

Die Art, die Schwere und der Ort des Schadens (d. h. Feld und Bereich) spielen eine Rolle bei der Bewertung der Versagensmechanismus (Biegung, Querkraft) und der damit verbundenen Versagenswahrscheinlichkeiten für die Grenzzustände (ULS und SLS). Die Auswirkung dieser Schäden auf den KPI Zuverlässigkeit auf der Anlagenebene wird schließlich durch vier Werte angegeben, die den Zuverlässigkeitsindex für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) für die Durchbiegung bzw. Querkraft darstellen (vgl. Bild 6-20).

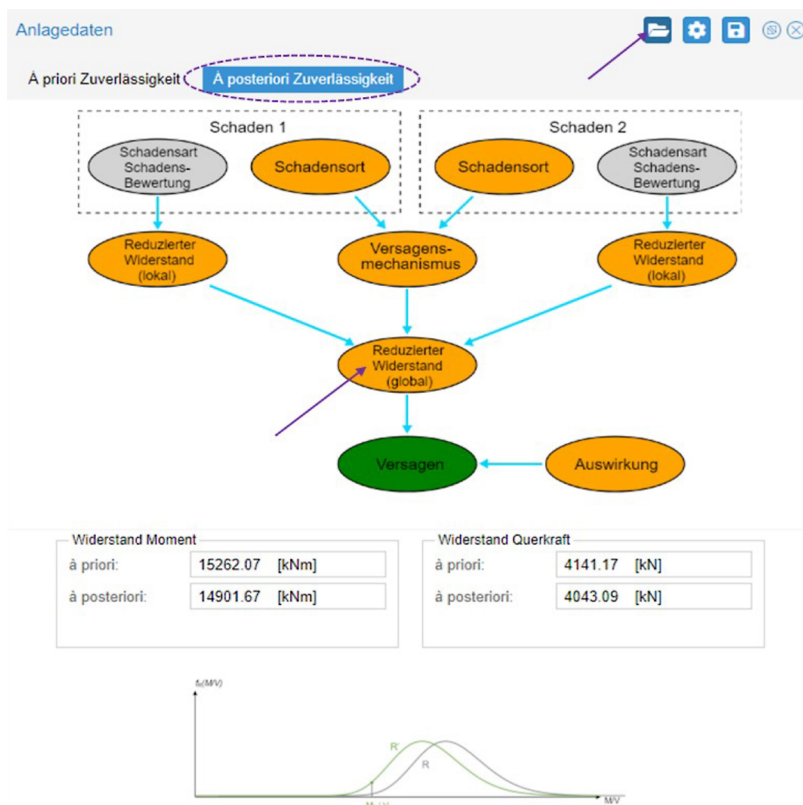


Bild 6-20: Widerstandverminderung aufgrund vordefinierter Schäden: Bayes'sches Netz für die Berechnung (oben); resultierender reduzierter Widerstand (unten)

Die Zustandsprognose für eine Anlage erfolgt auf Basis von Einzelschäden. Der Hintergrund für diese Berechnung wird angezeigt, wenn Sie im Menü Anlagedaten auf die Einstellungen (d. h. Button Zahnrad) klicken (Bild 6-21). Der Nutzer kann zwischen einem deterministischen und einem probabilistischen Prognosemodell auswählen für jede Anlage. Für die probabilistische Zustandsprognose kommt eine Markov-Kette zum Einsatz. Die hierfür benötigten Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen verfügen über fünf Zustandsklassen (0 bis 4) und sind in Abhängigkeit des Schadensmerkmals erstellt (vgl. Bild 6-21).

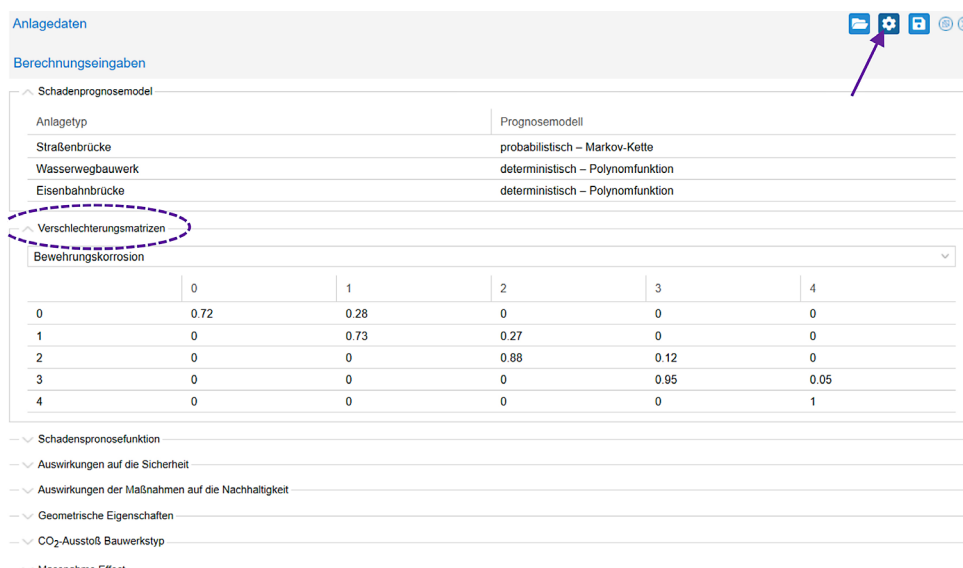


Bild 6-21: Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen in Abhängigkeit des Schadensmerkmals für die probabilistische Zustandsprognose

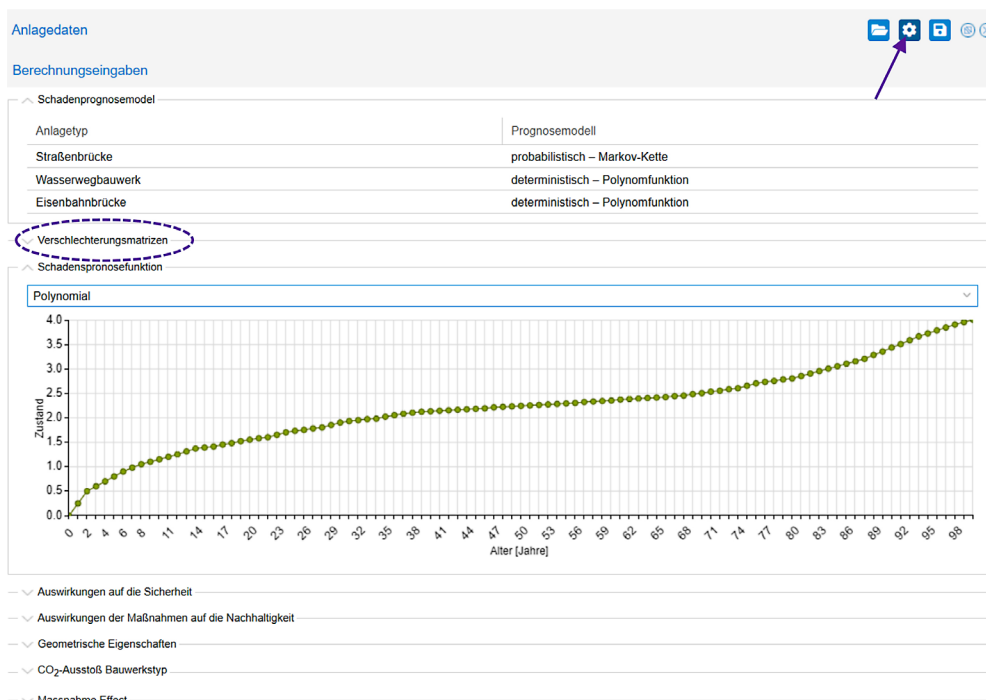


Bild 6-22: Auswahl des Funktionstyps für die deterministische Zustandsprognose

Für die deterministische Zustandsprognose kann zwischen einem linearen Ansatz oder einer Polynomfunktion ausgewählt werden (vgl. Bild 6-22). Grundsätzlich ist jede beliebige Funktion für die Zustandsprognose einzelner Schäden modellierbar.

Unter dem Menüpunkt Maßnahmen erfolgt die Festlegung von Maßnahmenzenarien je Anlage. Hierfür ist zunächst ein neues Szenario mit zugehöriger Namensbeschreibung anzulegen (vgl. Bild 6-23). Anschließend erfolgt die Festlegung von einer oder mehreren Maßnahmen an dem betrachteten Bauwerk (vgl. Bild 6-24). Hierfür sind die Attribute Name, Typ, Jahr, Kosten, Dauer, die durch die Maßnahme zu behebenden Schäden sowie die Möglichkeit zur Berücksichtigung der zeitlichen Überschneidung von Maßnahmen zu definieren.

Bild 6-23: Hinzufügen eines neuen Maßnahmenzenarios

Name	Typ	Jahr	Kosten (Tsd. EUR)	Dauer (Tage)	Schäden	Überschneidung vermeiden
1	A1	Teilerneuerung	2040	600	120	1,2,3,4

CO₂-Emissionen: 444.181 [Tonnen]

Bild 6-24: Ansichtsfenster zur Festlegung von Maßnahmenarten innerhalb eines Maßnahmenzenario

Die direkten Auswirkungen der Maßnahmenart auf den Schweregrad eines bestimmten Schadens kann im Einstellungsmenü überblickt werden (Bild 6-25).

Anlagedaten

Berechnungseingaben

- Schadenprognosemodell
- Verschlechterungsmatrizen
- Schadenspronosefunktion
- Auswirkungen auf die Sicherheit
- Auswirkungen der Maßnahmen auf die Nachhaltigkeit
- Geometrische Eigenschaften
- CO₂-Ausstoß Bauwerkstyp
- Maßnahme Effect**

Abplatzungen Oberbau

Typ	Measure is absolute	Value
Instandhaltung	false	1
Teilerneuerung	false	2
Ersatzneubau	true	0

Bild 6-25: Auswirkungen der Maßnahmenart auf den Schweregrad eines bestimmten Schadens

Ein Beispiel für die Auswirkung eines Maßnahmen Szenario ist in Bild 6-26 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in den Jahren, in denen eine Aktivität durchgeführt wird (Jahr 2040), die Werte für die Zuverlässigkeitsindexe sprunghaft ansteigen und die Anzahl an potenziellen Unfällen sinkt, was durch die Verbesserung der entsprechenden KPI für Zuverlässigkeit und Sicherheit bedingt ist.

Anlagedaten

Schadensliste

Schadensart	Feld	Bereich	S-Note	V-Note
1 Abplatzungen Oberbau	1	Hohe Anfälligkeit	2	2
2 Längrisse	1	Mittlere Anfälligkeit	3	
3 Schrägrisse	1	Stütze	3	2
4 Brückenbeläge schadhaf	1			1

Maßnahmen

Maßnahmenszenario festlegen: **SZ_1** alle reparieren

Na...	Typ	Jahr	Kosten (Tsd. EUR)	Dauer (Tage)	Schäden	Überschneidung...
1 A1	Teilern...	2040	600	120	1,2,3,4	<input type="checkbox"/>

CO₂-Emissionen: 444.181 [Tonnen]

PI Zuverlässigkeit

PI Sicherheit

Bild 6-26: Fensteransicht zu den Anlagedaten (Beispiel für ein angewandtes Szenario)

Für jedes Maßnahmen Szenario werden die CO₂-Emissionen auf der Grundlage der benutzerdefinierten Eingaben im Menü Einstellungen berechnet (vgl. Bild 6-27).

6.9.4 Netzdaten

Im Menüfenster Netzdaten kann die netzweite Erhaltungsstrategie definiert werden. Der Anwender wählt hierzu zunächst einen Namen für die Erhaltungsstrategie aus. Anschließend ist für jedes Infrastrukturbauwerk festzulegen, welches Maßnahmen Szenario innerhalb der Erhaltungsstrategie zur Anwendung kommen soll. Unterhalb der tabellarischen

Anlagedaten

Berechnungseingaben

- Schadenprognosemodell
- Verschlechterungsmatrizen
- Schadenprognosefunktion
- Auswirkungen auf die Sicherheit
- Auswirkungen der Maßnahmen auf die Nachhaltigkeit

Art der Maßnahme	Masse an zu ersetzendem Baumaterial [%]
Instandhaltung	15
Ersatzneubau	80
Teilerneuerung	30

Anlagentyp	Baustoff	Querschnittstyp	Volumenkoeffizient
Straßenbrücke	Stahlbeton	Vollquerschnitt (Balken)	0.8
Straßenbrücke	Stahlbeton	Vollquerschnitt (Rahmen)	0.55
Straßenbrücke	Stahlbeton	Hohlkasten	0.35
Straßenbrücke	Verbund	Hohlkasten	0.2

Bauwerkstyp	CO ₂ -Ausstoß [kg/m ³]	Zementgehalt [kg/m ³]
Stahlbeton	590	300
Verbund	950	250
Stahl	1500	0

— Massnahme Effect

Bild 6-27: Benutzerdefinierte Daten zur Berechnung der CO₂-Emissionen aufgrund einer Maßnahmentyp

Übersicht zu den gewählten Maßnahmenszenarien je Bauwerk erfolgt die Darstellung der zugehörigen Kosten anhand eines Balkendiagramms über den Analysezeitraum. Neben den prognostizierten Ausgaben der Erhaltungsstrategie werden im gleichen Diagramm das vorhandene Budget pro Jahr abgebildet, welches im unteren Bereich des Menüfensters jahresweise vom Anwender angegeben werden kann (vgl. Bild 6-28).

Netzdaten

Instandhaltung von Anlagen

Erhaltungsstrategie: Maximum alle reparieren

Anlagen-ID	Name	Maßnahmenszenario
1	Krittkuhler	Sz_1A
2	Hassels/Eiler	Sz_2A
3	Grafrather Strasse	Sz_3A
4	Wweg heidestrasse	Sz_4A

● Budget ● Ausgaben

Total Kosten [KEUR]: 2550
Diskontierte Kosten [KEUR]: 1524.54

Budget
Aus: 2022 | 2024 | 2026 | 2028 | 2030 | 2032 | 2034 | 2036 | 2038 | 2040 | 2042 | 2044 | 2046 | 2048 | 2050 | 2052 | 2054 | 2056 | 2058 | 2060 | 2062 | 2064 | 2066 | 2068 | 2070 | 2072 | 2074 | 2076 | 2078 | 2080 | 2082 | 2084 | 2086 | 2088 | 2090 | 2092 | 2094 | 2096 | 2098 | 2100 | 2102 | 2104 | 2106 | 2108 | 2110 | 2112 | 2114 | 2116 | 2118 | 2120 | 2122 | 2124 | 2126 | 2128 | 2130 | 2132 | 2134 | 2136 | 2138 | 2140 | 2142

Betrag [KEUR]:

Verfügbarkeit

Zusätzliche Ressourcen (N)

2022 2029 2037 2045 2053 2061 2069 2077 2085 2093 2101 2109 2117 2125 2133 2141

● DTV ● SV

Nachhaltigkeit

CO₂ Ausstoß (t)

2022 2029 2036 2044 2051 2058 2066 2073 2081 2088 2095 2103 2110 2118 2125 2133 2140

● Verkehr ● Strategie

Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeitsindex (0)

2022 2032 2042 2052 2062 2072 2082 2092 2102 2112 2122 2132 2142

Bild 6-28: Fensteransicht zu den Netzdaten

Innerhalb des Menüpunkts Netzdaten kann der Nutzer verschiedene Erhaltungsstrategien für die Infrastrukturbauwerke innerhalb eines Teilnetzes festlegen. Dazu wählt er zunächst einen Namen zur Beschreibung der Erhaltungsstrategie. Anschließend kann er definieren, welches Maßnahmenszenario an welcher baulichen Anlage innerhalb der Erhaltungsstrategie angewendet werden soll (vgl. Bild 6-29).

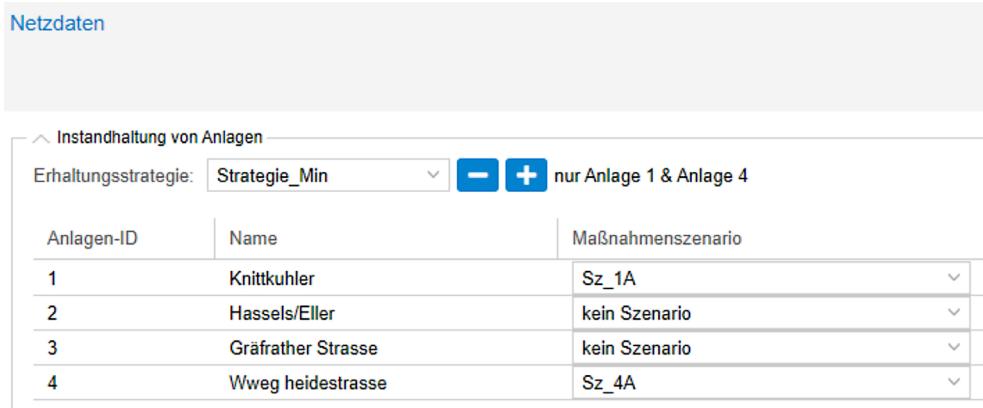


Bild 6-29: Beispiel für das Definieren einer netzweiten Erhaltungsstrategie

Auf der rechten Seite des Menüfensters (vgl. Bild 6-28) befinden sich die jeweiligen Diagramme der vier KPI. Sie zeigen den zeitlichen Verlauf der vier KPI in Abhängigkeit der netzweit gewählten Erhaltungsstrategie. Die Verfügbarkeitsgrafik zeigt die jährlichen zusätzlichen Reisezeiten getrennt für Personen- und Güterverkehr in den Jahren, in denen eine oder mehrere Instandhaltungsmaßnahmen an Anlagen im analysierten Netz durchgeführt werden. Das Nachhaltigkeitsdiagramm zeigt die zusätzlichen CO₂-Emissionen von Fahrzeugen, die aufgrund von Erhaltungsarbeiten Umwege fahren, und die jährlichen CO₂-Emissionen, die durch die Herstellung von Materialien entstehen, die bei Maßnahmen auf Netzebene verwendet werden. Das Zuverlässigkeitsdiagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der b_{ULS}- und b_{SLS}-Werte für ein Netz. Das Sicherheitsdiagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der potenziellen jährlichen Unfallzahl in einem Netz.

Unter dem Menüpunkt Zahnrad in der rechten oberen Ecke des Ansichtsfensters kann der Anwender Anpassungen bei den Berechnungsparametern auf der Netzebene durchführen. Dazu zählen die Angaben der jährlichen Veränderung des Verkehrsaufkommens für den Personen- (DTV) und den Güterverkehr (SV). Weiterhin sind Anpassungen der Berechnungseingaben zum mittleren CO₂-Ausstoß je Personen- bzw. Güterfahrzeug möglich. Zusätzlich kann die Diskontierungsrate zwischen 1,0 % und 3,0 % angepasst werden (vgl. Bild 6-30).



Bild 6-30: Fensteransicht zu den Einstellungen der Netzdaten

Der KPI Wirtschaftlichkeit wird innerhalb des IT-Prototyps anhand der anfallenden Ausgaben (Baukosten) durch Erhaltungsmaßnahmen berechnet. Unter dem Menüpunkt Netzdaten kann das verfügbare Budget für jedes Jahr in dem Prototyp angegeben und visualisiert werden. Die je Erhaltungsmaßnahme anfallenden Baukosten werden im selben Diagramm ebenfalls jahresweise angezeigt (vgl. Bild 6-31).

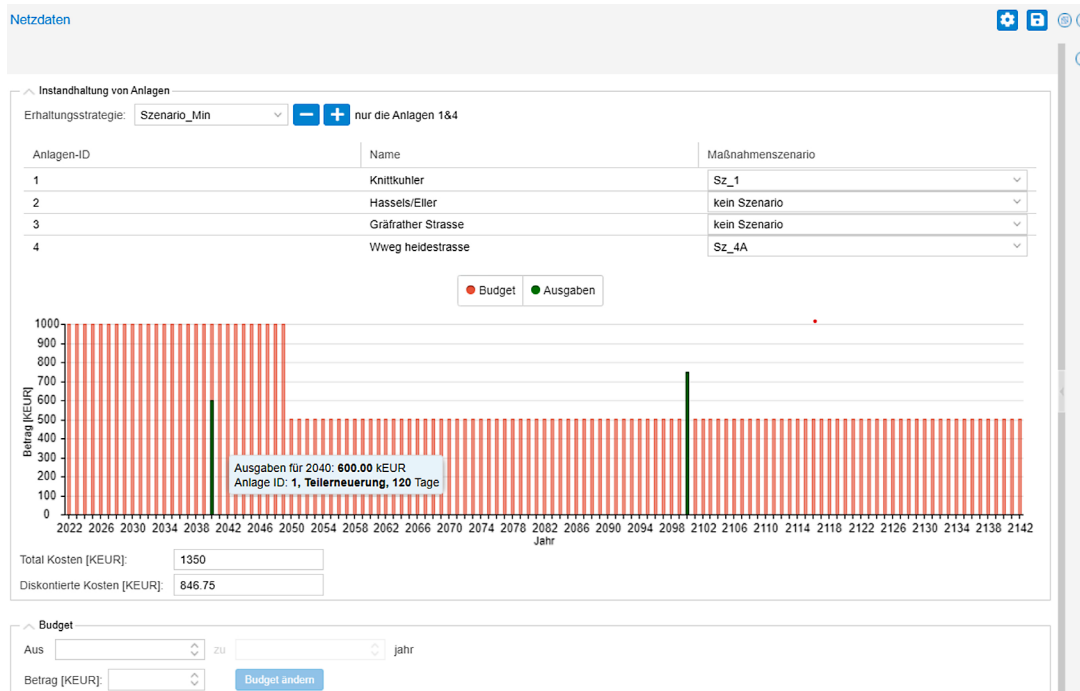


Bild 6-31: Darstellung von vorhandenem Budget (rot) und Ausgaben (grün) aufgrund der gewählten Erhaltungsstrategie

Zukünftig ist es sinnvoll, die Maßnahmenfolgekosten mit einem entsprechenden Referenzbezugspunkt ebenfalls in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen miteinfließen zu lassen. Dazu zählen auch die Kosten Dritter bzw. der Nutzer. Diese können bspw. durch eine Monetarisierung der zusätzlichen Reisezeiten quantifiziert werden.

6.9.5 KPI Bewertung

Das Menüfenster KPI Bewertung ist in die zwei Untermenüpunkte Normierung und Erhaltungsstrategien vergleichen untergliedert. Innerhalb des Menüfensters Normierung sind für alle vier KPI die Klassengrenzen für die Normierung zwischen in natürlichen Einheiten berechneten KPIs und den dimensionslosen KPIs tabellarisch dargestellt. Der Anwender kann hierbei die Klassengrenzen frei wählen (vgl. Bild 6-32).

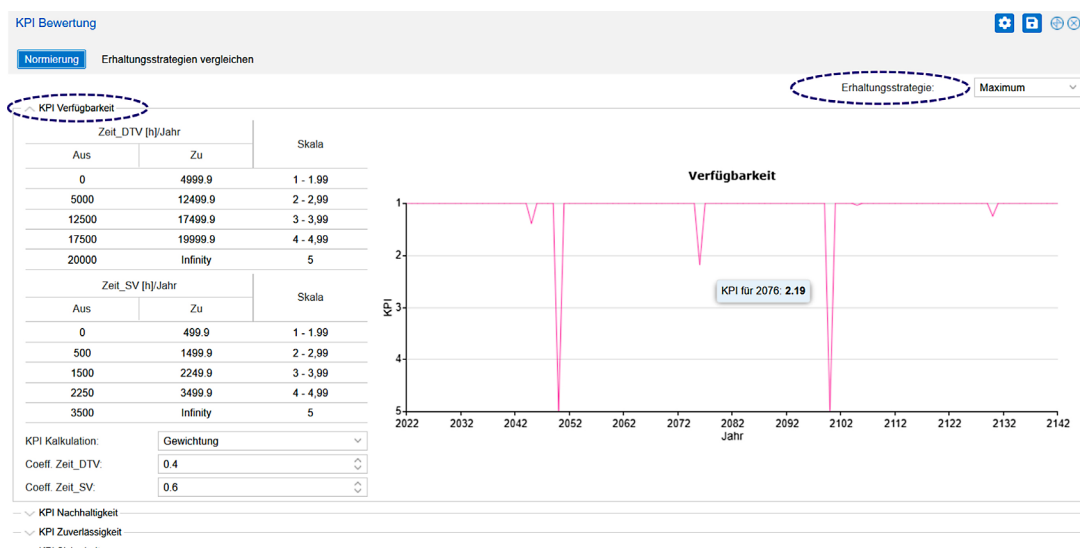


Bild 6-32: Fensteransicht zur Normierung innerhalb der KPI-Bewertung (ein Beispiel für Verfügbarkeit)

Auf der rechten Seite des Fensters sind die zeitlichen Verläufe der vier KPI jeweils dargestellt. In der rechten oberen Ecke des Fensters kann der Anwender die zu analysierende Erhaltungsstrategie auswählen, sodass sich die Diagramme entsprechend aktualisieren.

Der Menüpunkt Erhaltungsstrategien vergleichen bietet die Möglichkeit jeweils zwei zuvor definierte Erhaltungsstrategien miteinander zu vergleichen. Dazu wählt der Anwender die zu vergleichenden Erhaltungsstrategien aus. Anschließend erfolgt die automatisierte Berechnung des Volumens des 3D-Volumenkörpers sowie die abgeschätzten Kosten der jeweiligen Erhaltungsstrategie. Die Erhaltungsstrategien werden auf der Grundlage des Volumens eines 3D-Volumenkörpers bewertet. Die vier Achsen des 3D-Volumenkörpers sind durch die vier KPIs definiert: Zuverlässigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit (vgl. Bild 6-33).

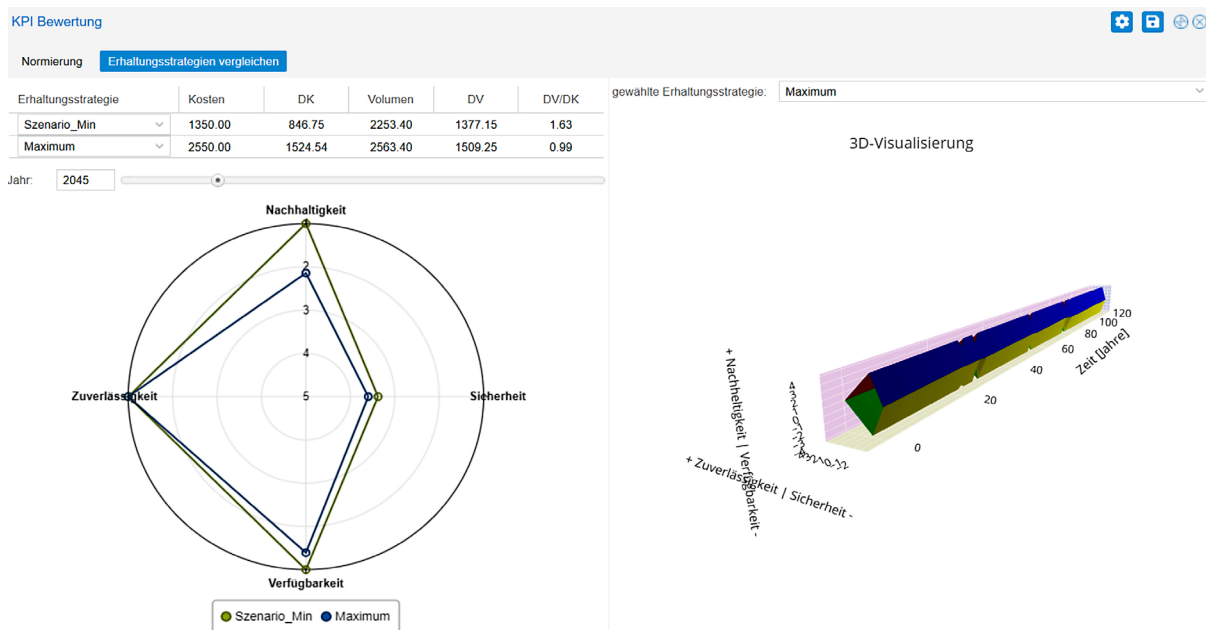


Bild 6-33: Fensteransicht zum Vergleich von Erhaltungsstrategien

Auf der rechten Seite des Fensters hat der Anwender zudem die Möglichkeit sich eine der beiden ausgewählten Erhaltungsstrategien als 3D-Visualisierung darstellen zu lassen. Dazu öffnet sich ein interaktives Ansichtsfenster, das es ermöglicht, den 3D-Volumenkörper aus beliebigen Perspektiven zu betrachten. Die zeitlichen Werte für die vier KPIs werden auf vier Achsen aufgetragen. Der dargestellte 3D-Volumenkörper hat ein bestimmtes Volumen, das einer Erhaltungsstrategie entspricht. Je mehr Volumen über ein Intervall erhalten wird, desto besser. Die Engpässe im 3D-Körper spiegeln sich in den Zeitpunkten wider, in denen die Werte der KPIs erheblich reduziert sind. Das Volumen des 3D-Körpers ist dazu geeignet, um Erhaltungsstrategien zu vergleichen und die diskontierten Kosten pro Strategie sollten berücksichtigt werden. Die Festlegung des Analyseintervalls und des Intervalls für die Ergebnisdarstellung erfolgt über das Menü Einstellungen (Bild 6-34).



Bild 6-34: Auswahl des Analysezeitraums zur KPI Bewertung

Nach Auswahl der zu analysierenden Erhaltungsstrategien kann eine Ansicht zum Vergleich der beiden Erhaltungsstrategien in einem neuen Fenster erfolgen. Im oberen Bereich des Fensters werden für den vom Anwender zu wählenden Analysezeitraum die aufsummierten und diskontierten Kosten (DK) der Maßnahmenfolge je Erhaltungsstrategie sowie das damit zu erreichende Volumen und das diskontierte Volumen (DV) des 3D-Volumenkörpers angezeigt (vgl. Bild 6-35, obere Tabelle). Diejenige Strategie, die ein größeres Verhältnis aus DV/DK aufweist, ist zu bevorzugen.

Erhaltungsstrategie	Kosten	DK	Volumen	DV	DV/DK
Szenario_Min	1350.00	846.75	2253.40	1377.15	1.63
Maximum	2550.00	1524.54	2563.40	1509.25	0.99

Jahr: 2045

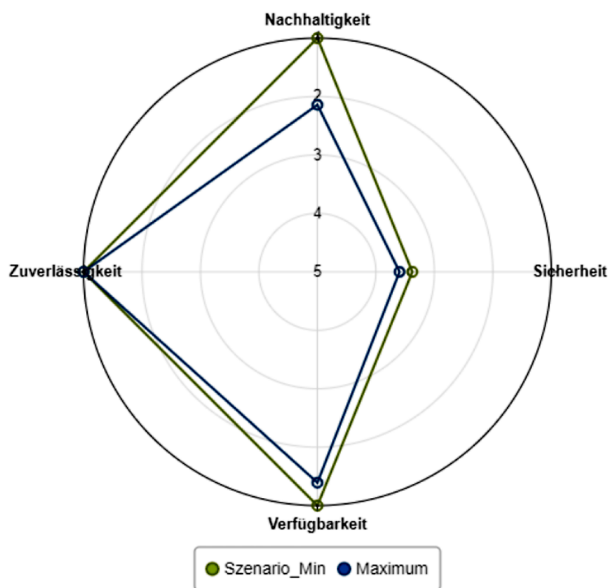


Bild 6-35: Vergleich von zwei Erhaltungsstrategien: anhand des Volumenkörpers und den Kosten (obere Tabelle), anhand der vier KPI zu diskreten Zeitpunkten (untere Grafik)

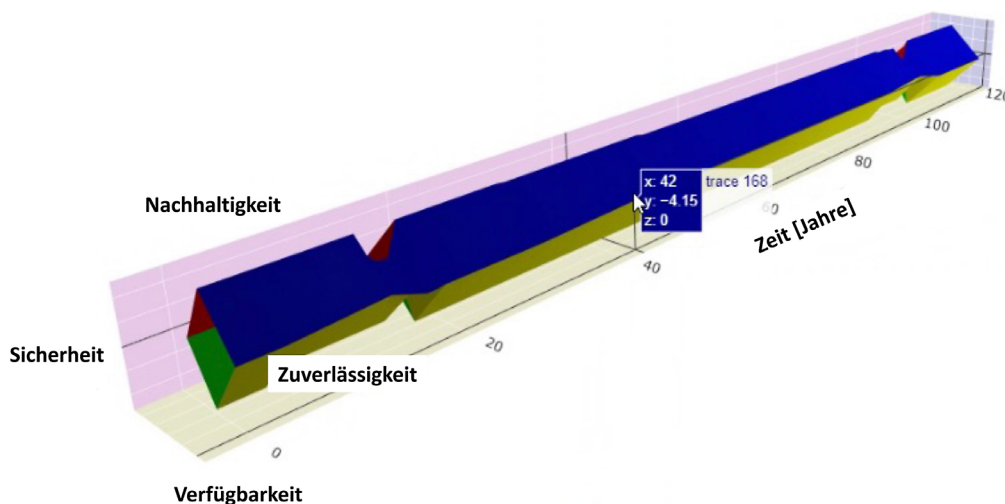


Bild 6-36: 3D-Visualisierung der KPI-Verläufe (1)

Das Spinnendiagramm zeigt die Ausprägung der vier KPI zu einem mithilfe eines Zeitstrahls beliebig auswählbaren Zeitpunkt. Dargestellt werden hierbei die jeweilige Ausprägung der KPI zu dem gewählten Analysezeitpunkt. Durch Vorauswahl von zwei zu analysierenden Erhaltungsstrategien können diese innerhalb des Diagramms miteinander verglichen

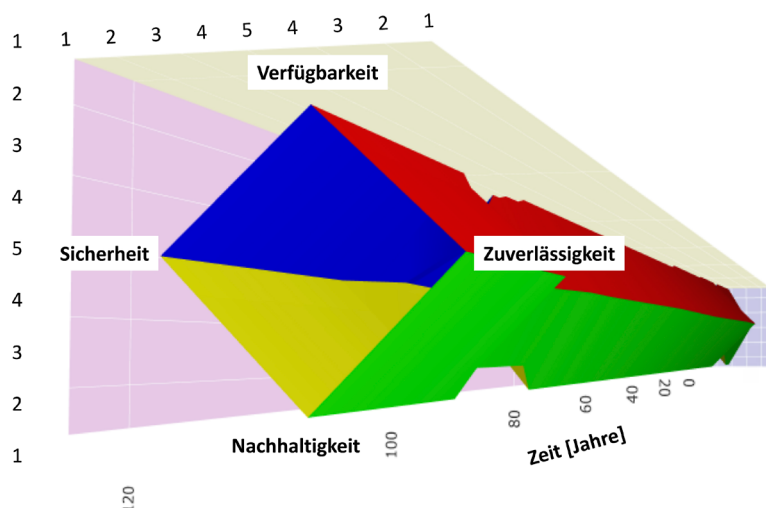


Bild 6-37: 3D-Visualisierung der KPI-Verläufe (2)

werden (vgl. Bild 6-35, untere Grafik). Die 3D-Visualisierung ermöglicht die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der vier KPI innerhalb des Analysezeitraums von maximal 120 Jahren. Nach Festlegung der Erhaltungsstrategien sind die entsprechenden Einschnitte innerhalb des Volumenkörpers deutlich zu erkennen (vgl. Bild 6-36 und Bild 6-37).

6.10 Exemplarische Anwendung

Die Funktionsweise des IT-Prototyps wird im Folgenden anhand von einem Anwendungsbeispiel erläutert. Das Beispiel zeigt, wie man zwei Erhaltungsstrategien für vier Bauwerke innerhalb eines vordefinierten Straßennetzes (vgl. Kapitel 6.3.3, 6.6.3 und 6.9.2) erstellt und die Ergebnisse analysiert. Für das Beispiel wurden die Bestandsdaten der Bauwerke aus SIB-Bauwerke entnommen und die a-priori Zuverlässigkeit auf der Grundlage eines vereinfachten statischen Modells berechnet. Alle anderen Informationen zu aktuellen Schäden, möglichen Instandhaltungsmaßnahmen, Konfigurationsdaten für die Anlagen und das Netz (z. B. Netzgrundlage, Verschlechterungsmodelle) sowie Ergebnisse von Verkehrssimulationen werden beispielhaft erstellt.

Die wesentlichen Arbeitsschritte innerhalb des Prototyps sind:

- Festlegen von Schäden im Menüpunkt Anlagedaten (Kapitel 6.10.1)
- Festlegen von Maßnahmenzenarien im Menüpunkt Anlagedaten (Kapitel 6.10.2)
- Festlegen von Erhaltungsstrategien im Menüpunkt Netzdaten (Kapitel 6.10.3)
- Festlegen von Normierungsparameter im Menüpunkt KPI Bewertung (Kapitel 6.10.4)
- Erhaltungsstrategien vergleichen im Menüpunkt KPI Bewertung (Kapitel 6.10.5)

Die Berechnungseingaben Setup, die für das Beispiel verwendet werden, sind in Kapitel 6.10.6 dargestellt.

6.10.1 Festlegen von Schäden

Bei dem ersten Beispielbauwerk handelt es sich um die Knittkuhler Brücke (Anlage Nr.1), die die Kreisstraße K10 unter der Bundesautobahn BAB A44 hindurchführt. Die Bauwerksdaten des Bauwerks werden dem Anwender in der linken Seite des Ansichtsfensters angezeigt (vgl. Bild 6-38).

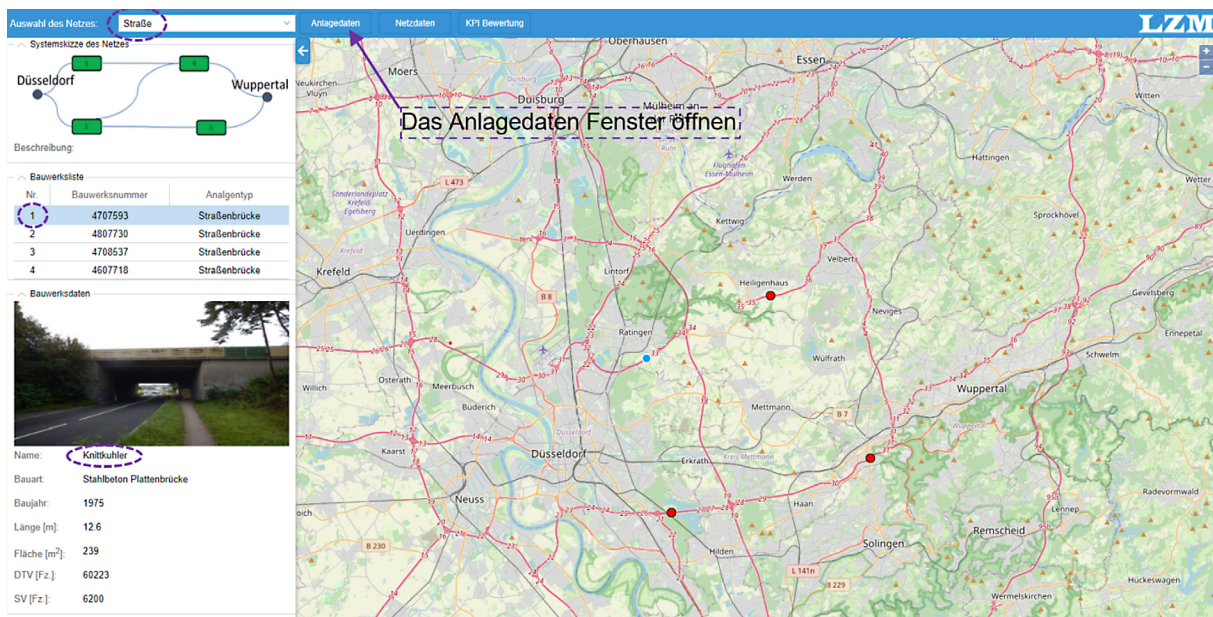


Bild 6-38: Startfenster mit ausgewähltem Bauwerk

Unter dem Menüpunkt Anlagendaten werden dem Anwender die an diesem Bauwerk dokumentierten Schäden angezeigt. Dazu zählen Abplatzungen am Oberbau sowie Längsrisse. Unter dem Menüpunkt Speichern kann in Abhängigkeit dieser Schäden der zukünftige Verlauf der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit berechnet werden (vgl. Bild 6-39). Die PI verschlechtern sich mit der Zeit, wenn Schäden hinzukommen. Wiederholen Sie den Vorgang für die anderen drei Anlagen, wie in Bild 6-40, Bild 6-41 und Bild 6-42 dargestellt. Die Auswahl der Anlage erfolgt in der Bauwerksliste auf der linken Seite des Startfensters.

a)

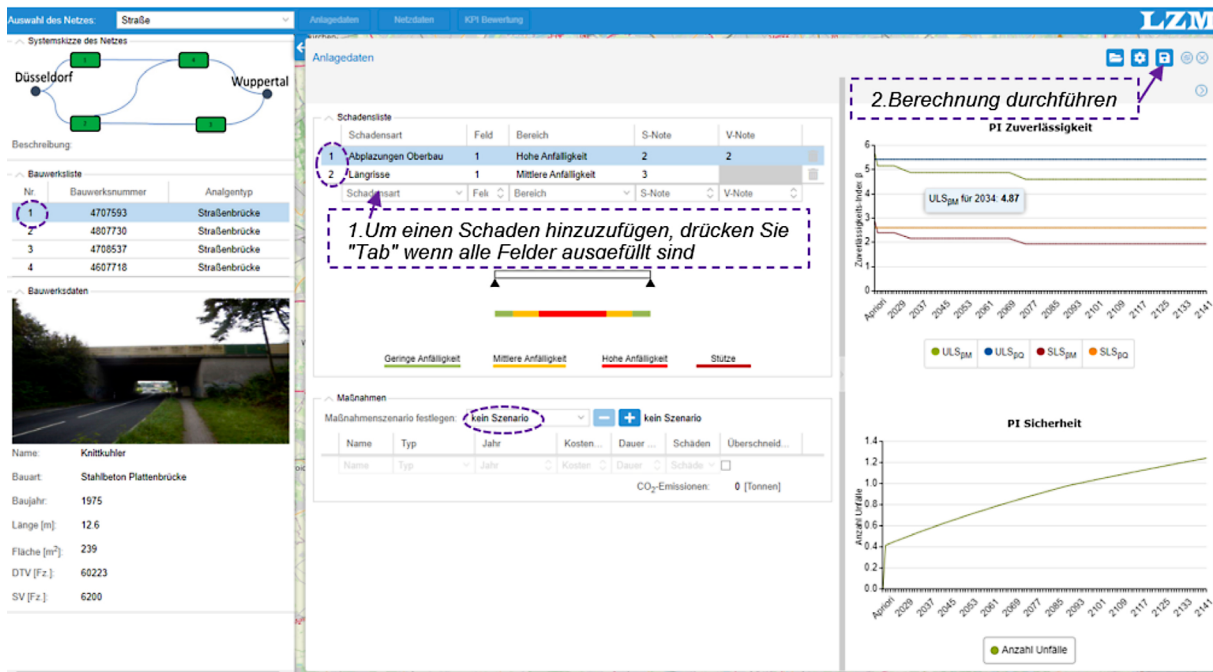


Bild 6-39a: Anzeige der zukünftigen Entwicklung der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit ohne Durchführung von Maßnahmen für Anlage Nr.1: a) Auswirkungen von zwei Schäden

b)

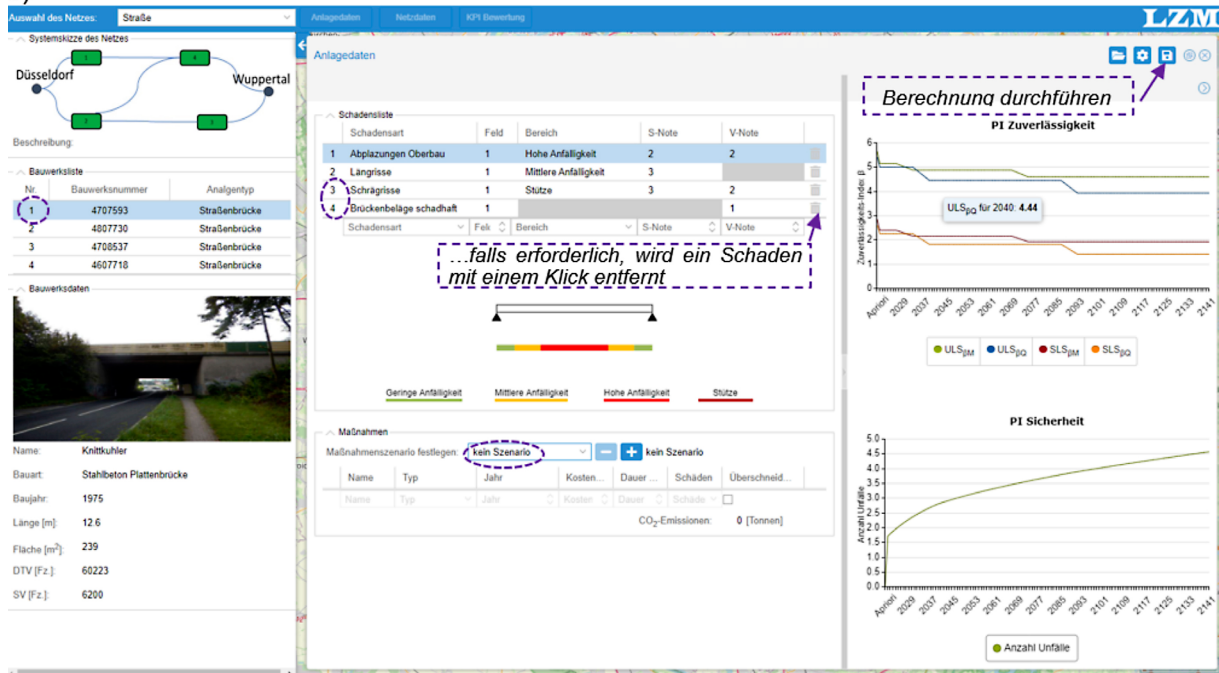


Bild 6-39b: Anzeige der zukünftigen Entwicklung der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit ohne Durchführung von Maßnahmen für Anlage Nr.1: b) Auswirkungen von zwei Schäden

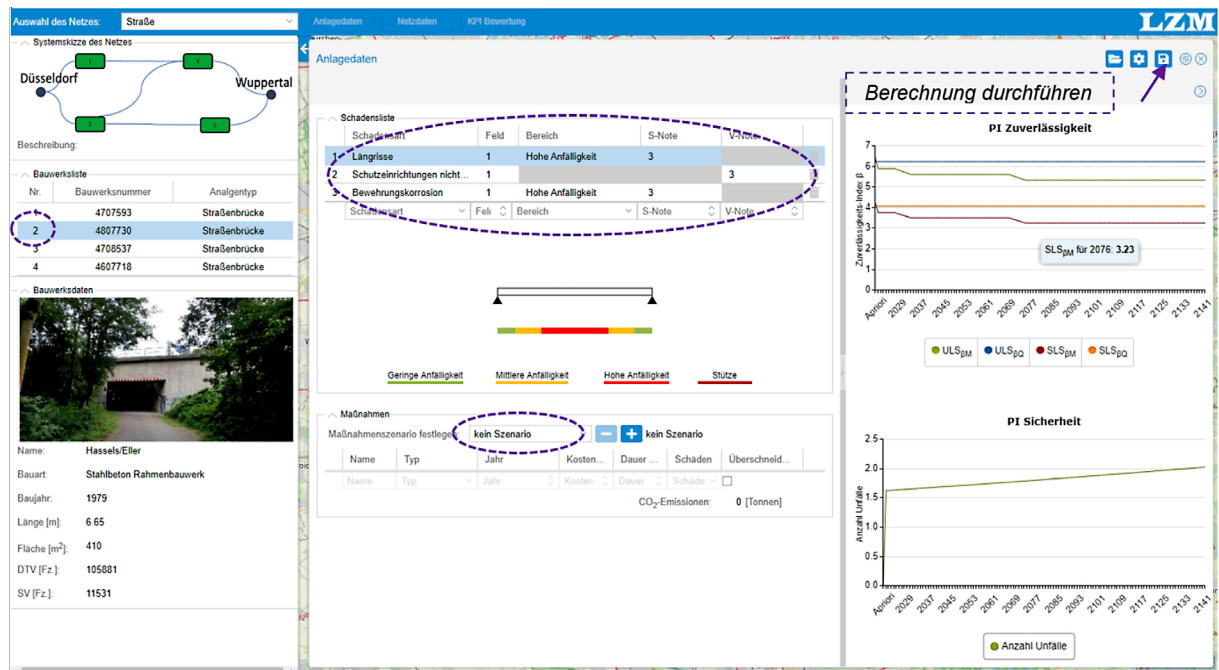


Bild 6-40: Anzeige der zukünftigen Entwicklung der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit ohne Durchführung von Maßnahmen für Anlage 2

Im Allgemeinen muss für jedes Bauwerk mindestens ein Schaden definiert sein. Die Daten zu den berechneten PI werden nicht dauerhaft gespeichert, um die Ergebnisse für eine andere Anlage zu sehen, muss die Berechnung jedes Mal wiederholt werden. Weitere Informationen zu den Funktionen in diesem Menüpunkt finden Sie im Kapitel 6.9.3.

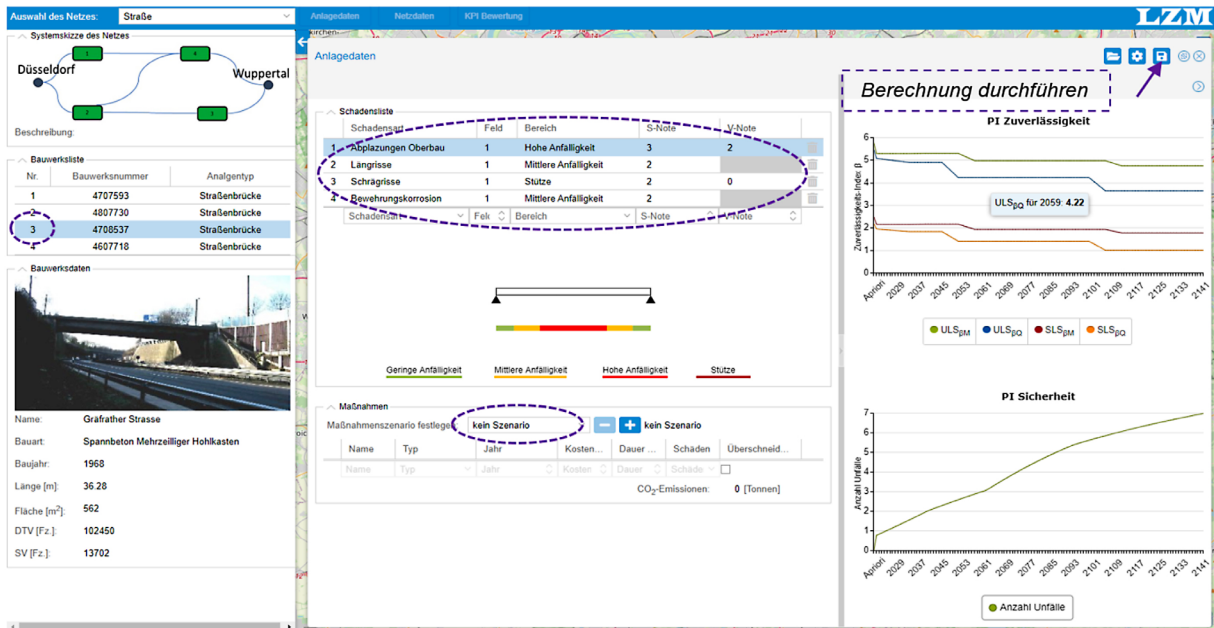


Bild 6-41: Anzeige der zukünftigen Entwicklung der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit ohne Durchführung von Maßnahmen für Anlage 3

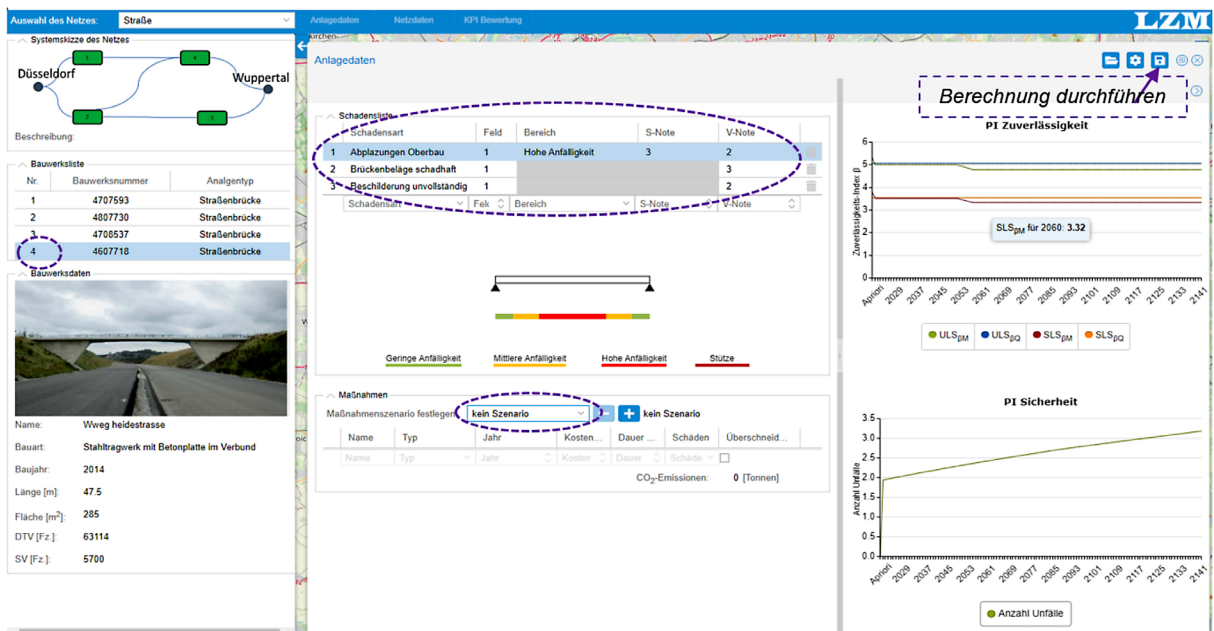


Bild 6-42: Anzeige der zukünftigen Entwicklung der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit ohne Durchführung von Maßnahmen für Anlage 4

6.10.2 Festlegen von Maßnahmenzenarien

Nach der Festlegung von Schäden erfolgt das Hinzufügen der Maßnahmenzenarien und der dazugehörigen Maßnahmenaktivitäten pro Anlage wie in Bild 6-43a dargestellt. Die direkte Auswirkung der Maßnahmenaktivitäten auf die PI erfolgt durch Anklicken von Speichern.

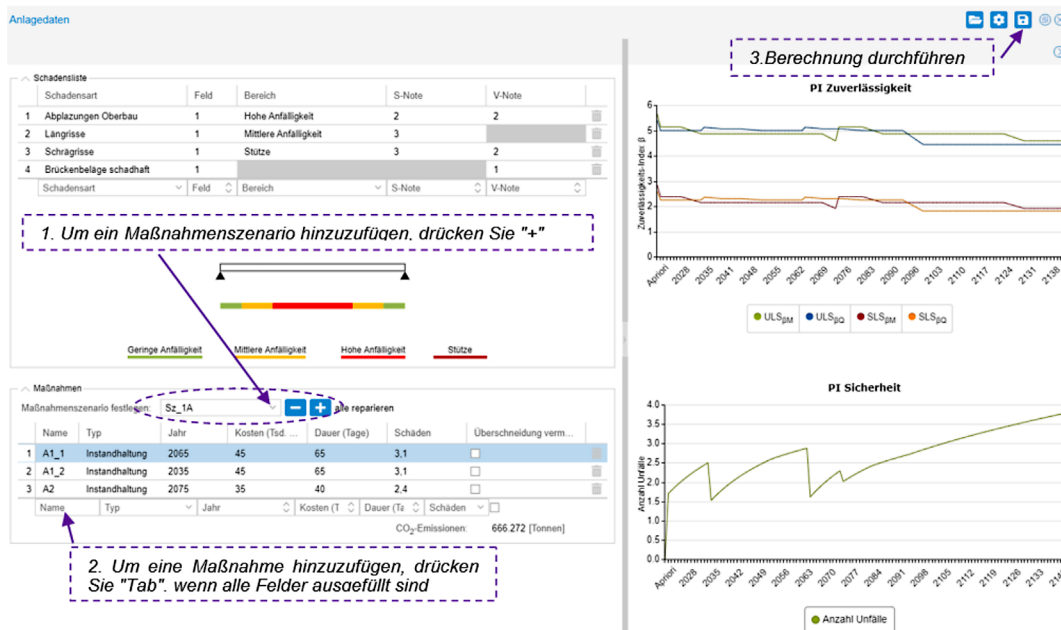
Aus den Ergebnissen der Schadensauswirkungen auf den KPI geht hervor (vgl. Bild 6-43), dass die Anlagen Nr. 2 und Nr. 4 hohe PI-Zuverlässigkeits-Werte ($\beta_{ULS}(M,Q) \geq 5$ und $\beta_{SLS}(M,Q) \geq 3$) und eine niedrige Anzahl von prognostizierten Unfällen innerhalb des 100-Jahre-Intervalls aufweisen. Daher werden für diese Anlagen keine Maßnahmen ge-

plant. Andererseits sind für die Anlagen Nr. 1 und Nr. 3 Maßnahmenzenarien vorgesehen, wie in Bild 6-43 und Bild 6-44 dargestellt, um die PI Zuverlässigkeits-Werte ($\beta_{ULS}(M,Q) \geq 4.5$ und $\beta_{SLS}(M,Q) \geq 1.9$) und die Anzahl der Unfälle ≤ 3 zu innerhalb des 100-Jahres-Intervalls zu reduzieren.

Um diese Ziele zu erreichen, werden im Fall von Anlage Nr. 1 zwei Maßnahmenzenarien angenommen:

- Sz_1A – impliziert häufige Reparaturen, vgl. Bild 6-43a, und
- Sz_1B – impliziert den Ersatzneubau (keine Erhöhung der Widerstandswerte gegenüber dem ursprünglichen Design), vgl. Bild 6-43b

a)



b)

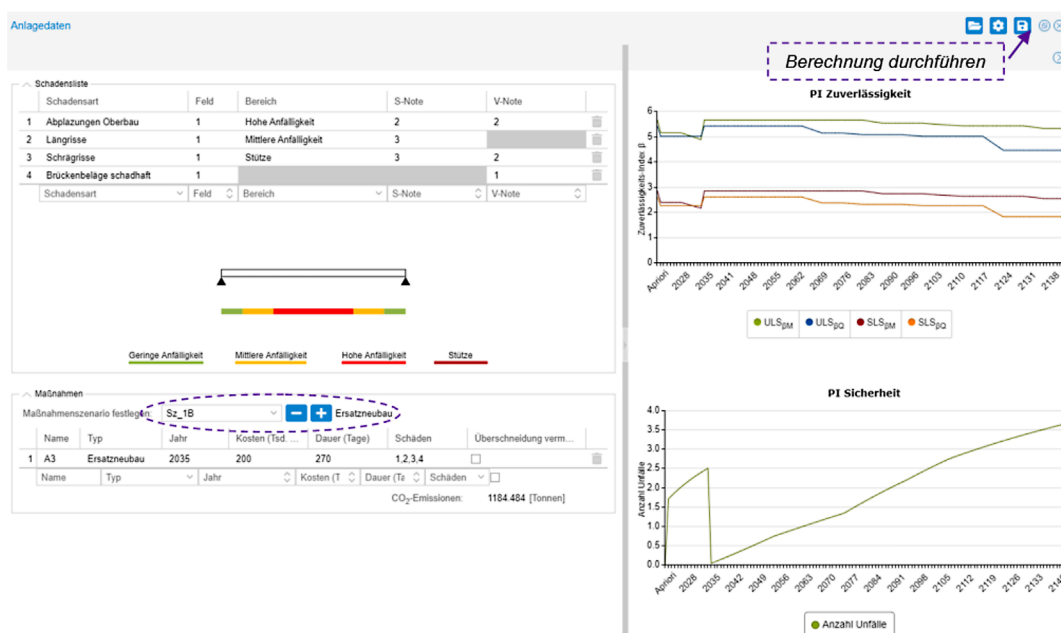


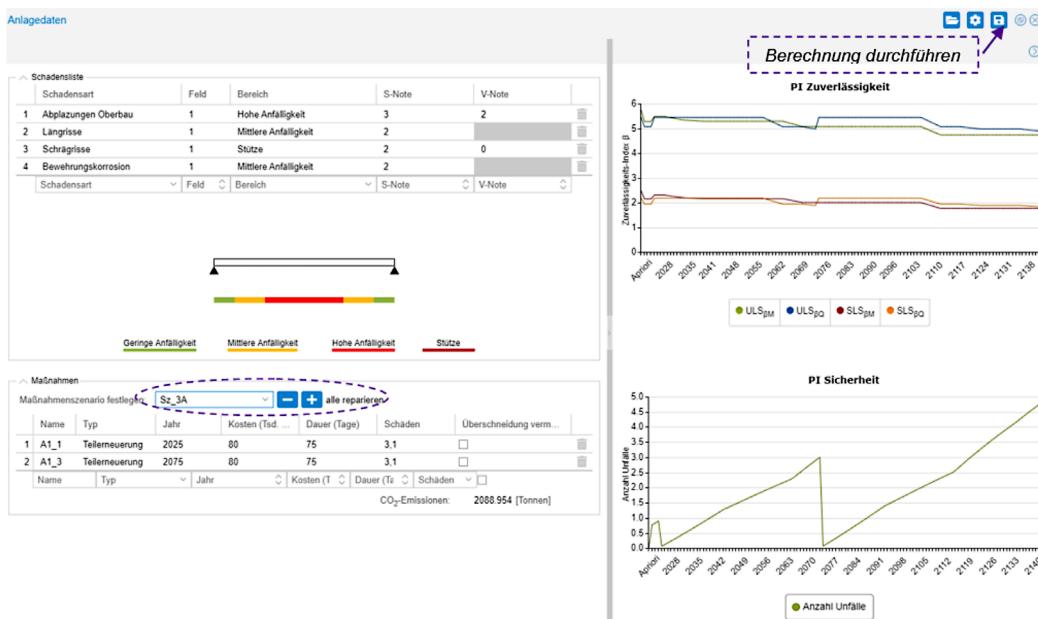
Bild 6-43: Festlegen eines neuen Maßnahmenzenarios im Menüpunkt Anlagendaten für Anlage Nr.1: a) Sz_1A; b) Sz_1B

Im Fall von Anlage Nr. 3 werden ebenfalls zwei Maßnahmenzenarien angenommen:

- Sz_3A – impliziert häufige Reparaturen, vgl. Bild 6-44a, und
- Sz_3B – impliziert den Ersatzneubau (keine Erhöhung der Widerstandswerte gegenüber dem ursprünglichen Design), vgl. Bild 6-44b

Im Allgemeinen ist die Anzahl an Maßnahmen pro Maßnahmenzenario beliebig, ebenso wie die Anzahl der Maßnahmenzenario pro Anlage. Die Daten zu den berechneten PI werden nicht dauerhaft gespeichert. Um die Ergebnisse für eine andere Anlage zu sehen, muss die Berechnung jedes Mal wiederholt werden. Weitere Informationen zu den Funktionen in diesem Fenster finden Sie im Kapitel 6.9.3.

a)



b)



Bild 6-44: Festlegen eines neuen Maßnahmenzenarios im Menüpunkt Anlagedaten für Anlage Nr.3: a) Sz_3A; b) Sz_3B

6.10.3 Festlegen von Erhaltungsstrategien

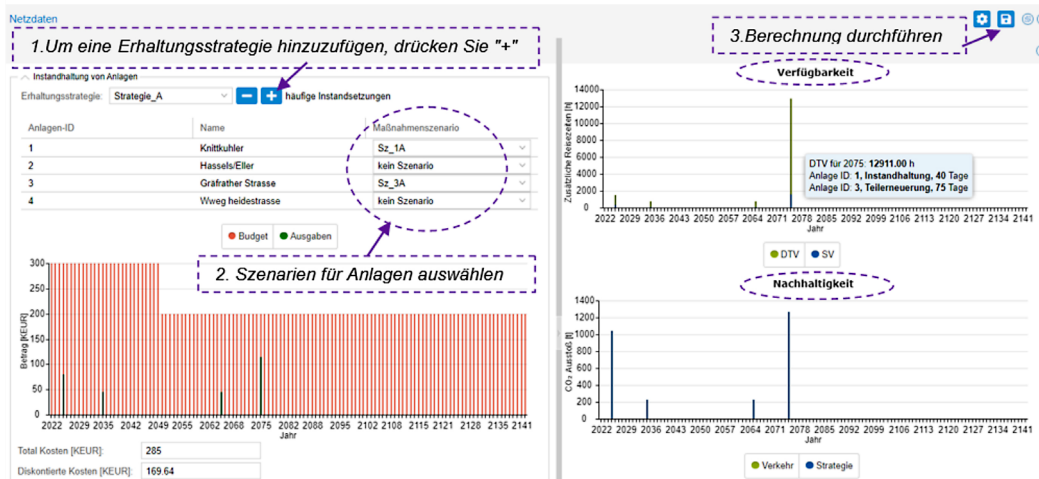
Innerhalb des Menüpunkt Netzdaten werden die Erhaltungsstrategien festgelegt. Um in diesem Menüpunkt zu arbeiten, ist es notwendig, dass für jede Anlage Schäden definiert werden, wie in Kapitel 6.10.1 erläutert. Die Anzahl der vordefinierten Maßnahmenzenarien gemäß Kapitel 6.10.2 ist beliebig. Die entsprechenden Auswirkungen einer Erhaltungsstrategie auf die KPI Verfügbarkeit, Nachhaltigkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit auf der Netzebene sind im rechten Bereich des Ansichtsfensters dargestellt (vgl. Kapitel 6.9.4). Die KPI werden in nativen Einheiten angegeben. Im Folgenden werden zwei Strategien erstellt:

- Strategie_A – häufige Reparaturen an Anlage Nr.1 und Nr.3 (Maßnahmenszenarien Sz_1A und Sz_3A), während für die Assets Nr.2 und Nr.4 keine Instandhaltung geplant ist (vgl. Bild 6-45)

und

- Strategie_B – neues Brückenbauwerk für Asset Nr.1 und Nr.3 (Maßnahmenszenarien Sz_1B und Sz_3B), während für die Assets Nr.2 und Nr.4 keine Instandhaltung geplant ist (vgl. Bild 6-46).

a)



b)

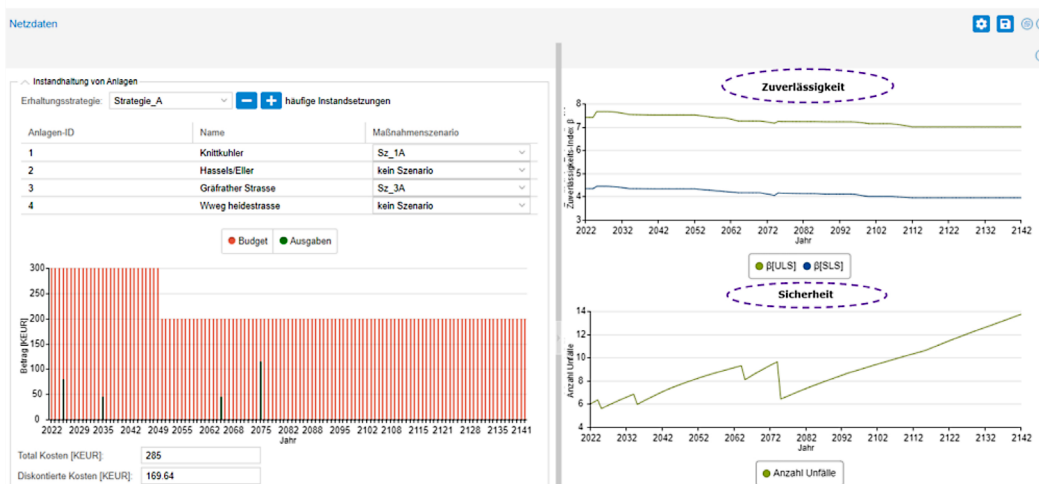
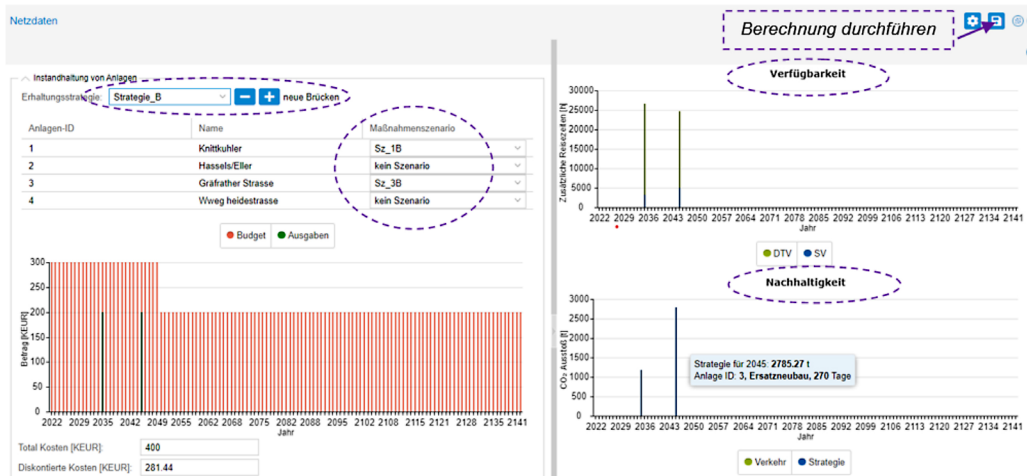


Bild 6-45: Übersicht zu den Auswirkungen der Erhaltungsstrategie – Strategie_A auf die KPI: a) Verfügbarkeit & Nachhaltigkeit; b) Zuverlässigkeit und Sicherheit

a)



b)

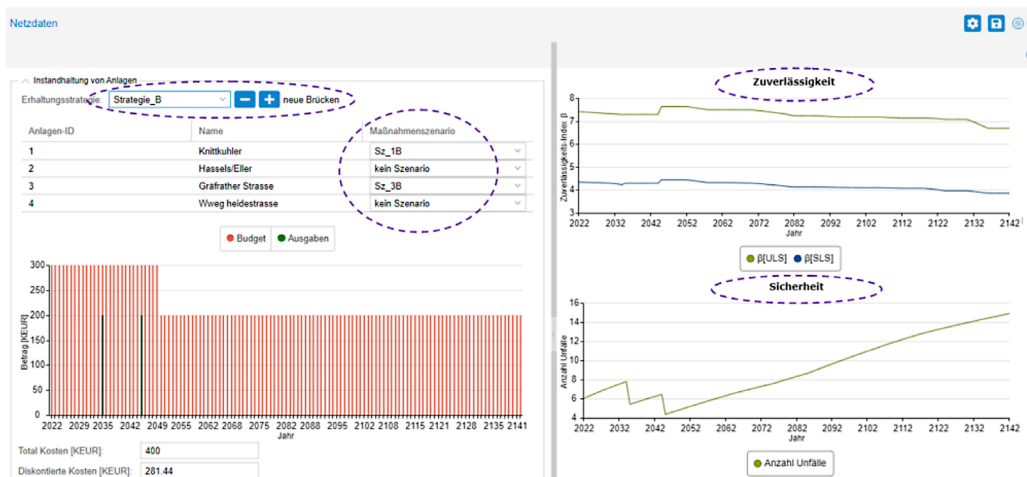


Bild 6-46: Übersicht zu den Auswirkungen der Erhaltungsstrategie – Strategie_B auf die KPI: a) Verfügbarkeit & Nachhaltigkeit; b) Zuverlässigkeit und Sicherheit

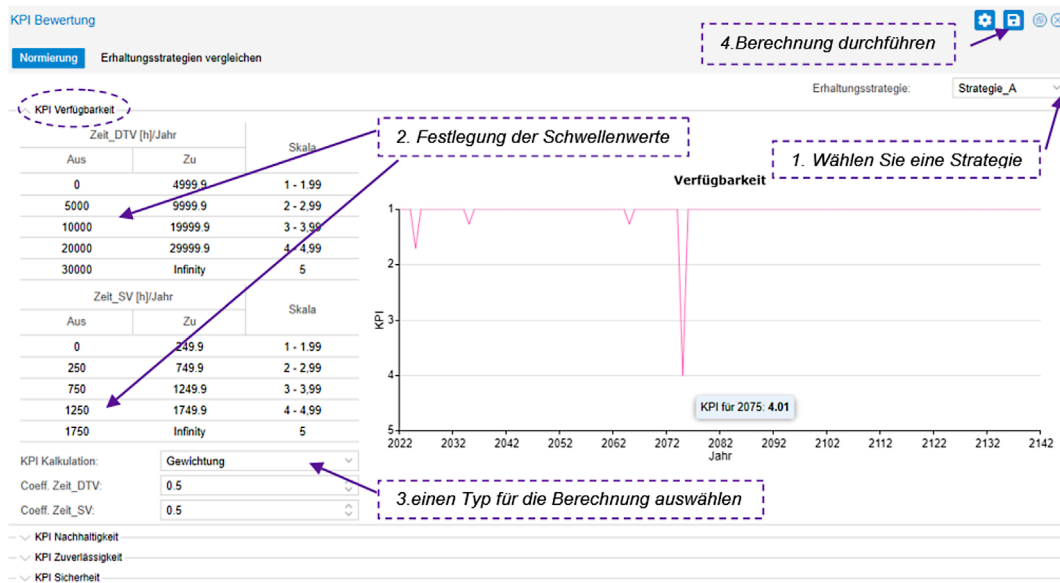
Im Fall von Strategie_A ist zu erkennen, dass sich die Maßnahmen im Jahr 2075 überschneiden, was zu größeren Auswirkungen auf die KPI Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit führt, als wenn die Maßnahmen nicht gleichzeitig stattfänden. Die zeitliche Überschneidung von Maßnahmen kann vermieden werden, wenn für eine dieser Maßnahmen Überschneidung vermeiden ausgewählt wird (vgl. Bild 6-24).

Die Höhe des Budgets kann manuell (vgl. Bild 6-31 und Kapitel 6.9.4) angegeben werden. Das Budget hat jedoch keinen Einfluss auf die Ergebnisse und wird hier nur zum Vergleich mit den Kosten der Maßnahmen dargestellt. Die Gesamtkosten und die diskontierten Kosten werden automatisch berechnet.

6.10.4 Festlegen von Normierungsparametern

Innerhalb des Menüpunkt KPI Bewertung werden die Normierungsparameter festgelegt und die im Menüpunkt Netzdaten berechneten Werte in nativen Einheiten der KPI werden hier skaliert. Die Normierungsparameter werden für alle Strategien verwendet, wobei die Skala von 1 bis 5 festgelegt ist. Die Schwellenwerte können frei überschritten werden und die KPIs werden anhand von zwei Parametern berechnet (Ausnahme ist die Sicherheit, für die es nur einen KPI-Parameter gibt). Diese werden entweder mit den angegebenen

a)



b)

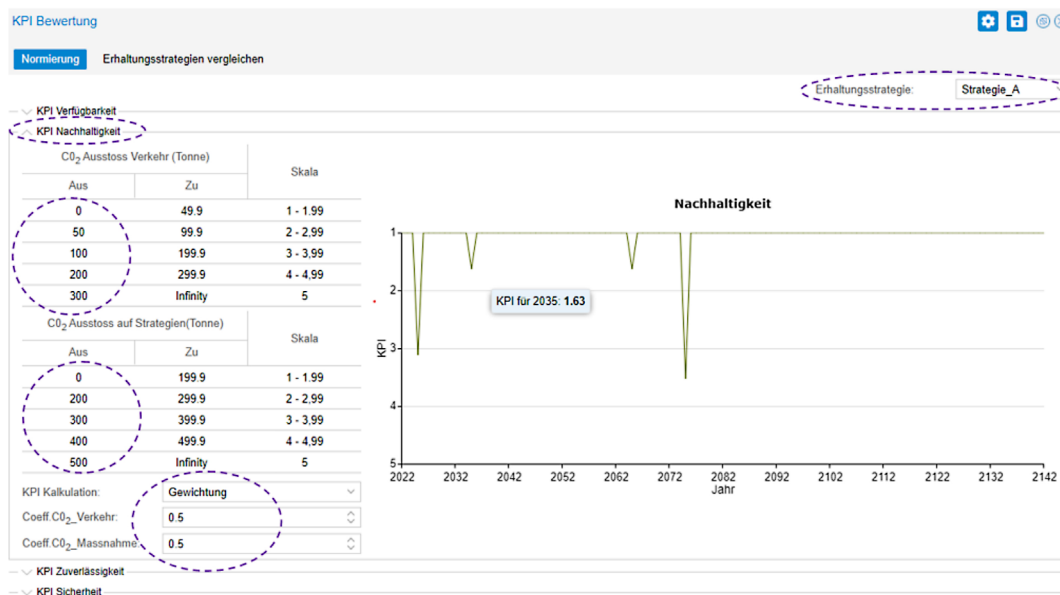
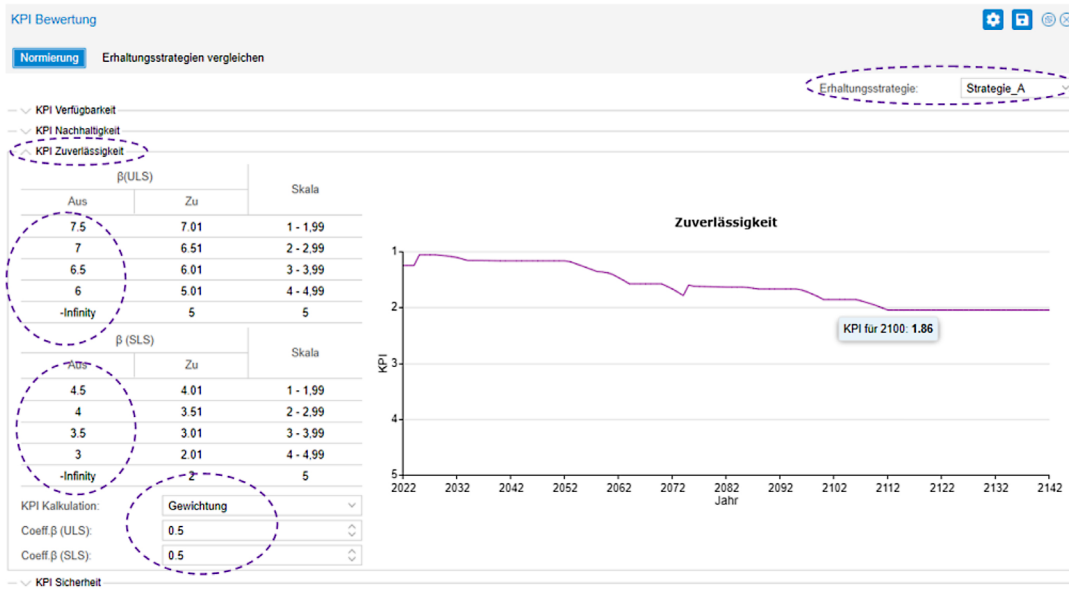


Bild 6-47: Überblick über die normalisierten KPI-Werte für Erhaltungsstrategie- Strategie_A: a) Verfügbarkeit; b) Nachhaltigkeit

Koeffizienten gewichtet oder es wird das Maximum der beiden Parameter in einem Jahr berücksichtigt. Die Ergebnisse der Normierung können je Strategie angezeigt werden (vgl. Bild 6-47 und Bild 6-48). Es ist zu beachten, dass die eingegebenen Bewertungsmaßstäbe für die Endergebnisse so realistisch wie möglich gewählt werden sollten – sowohl in Bezug auf das analysierte Netz als auch auf die in der Praxis verwendeten Bewertungsmaßstäbe.

a)



b)

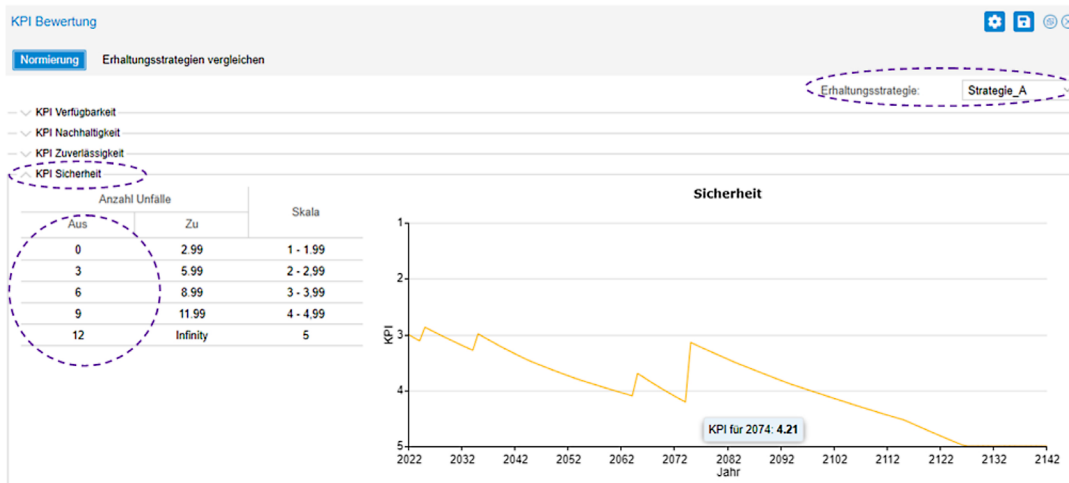


Bild 6-48: Überblick über die normalisierten KPI-Werte für Erhaltungsstrategie- Strategie_A: a) Zuverlässigkeit und b) Sicherheit

6.10.5 Erhaltungsstrategien vergleichen

Die Berechnungsergebnisse für die in Kapitel 6.10.3 definierten Erhaltungsstrategien werden in dem Menüpunkt KPI Bewertung, Tab Erhaltungsstrategien vergleichen verglichen. Hier werden die Normierungsparameter aus Kapitel 6.10.4 angewendet. Im vorliegenden Fall wurden für den Vergleich die Erhaltungsstrategien Strategie_A und Strategie_B ausgewählt (vgl. Bild 6-49). Weitere Informationen zu den Funktionen in diesem Fenster finden Sie im Kapitel 6.9.5.

Die Strategie_A beinhaltet Kosten von 285.000 € bzw. diskontierte Kosten (DK) von 169.640 €. Das zugehörige Volumen beträgt 1.531,41 KPI-Einheiten bzw. 824,68 im Falle einer Diskontierung (DV). Daraus ergibt sich ein Verhältnis aus diskontiertem Volumen zu diskontierten Kosten von 4,86 (DV/DK). Demgegenüber beinhaltet die Strategie_B Kosten von 400.000 € bzw. diskontierte Kosten von 281.440 €. Das zugehörige Volumen beträgt 1.597,89 KPI-Einheiten bzw. 851,30 im Falle einer Diskontierung. Daraus ergibt sich wiederum ein Verhältnis aus diskontiertem Volumen zu diskontierten Kosten von 3,02. Dement-

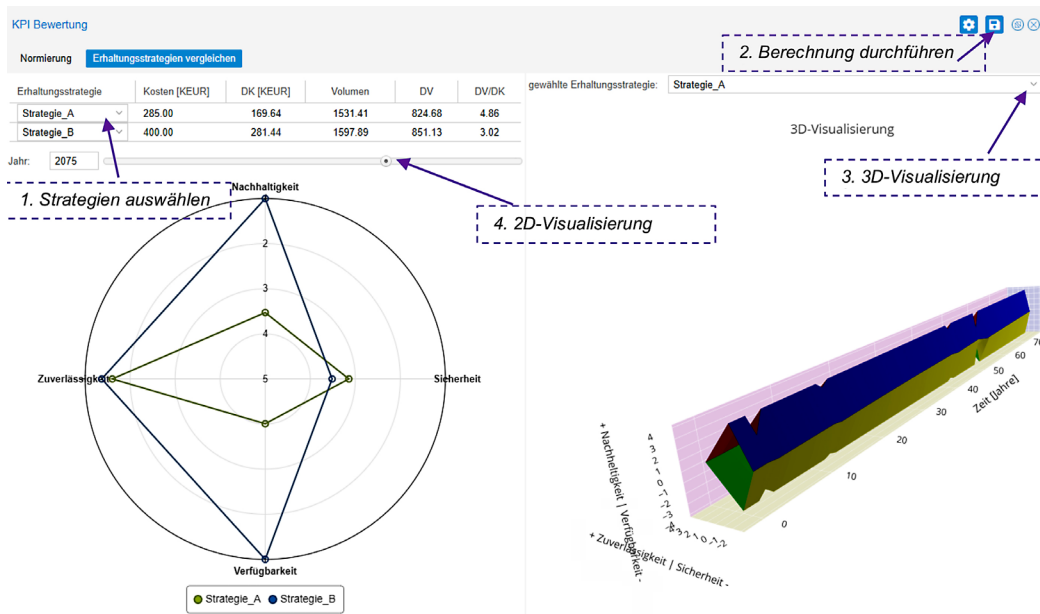


Bild 6-49: Anzeige der Ergebnisse der Erhaltungsstrategie anhand des 3D-Spinnendiagramms und des orthogonalen Schnittes zu einem gewählten Zeitpunkt (Jahr 2075)

sprechend ist die Strategie_A zu bevorzugen. Die erzielten Ergebnisse bei der Berechnung der PI und KPI sowie der Vergleich bzw. die Visualisierung von Strategien sind stark von den Berechnungsparametern abhängig. Die Konfiguration dieser Parameter wird im Folgenden erläutert.

6.10.6 Berechnungseingaben Setup

Bei den im Rahmen des LZM-Tools durchgeführten Berechnungen sind einige Parameter vordefiniert und andere benutzerdefiniert. Wenn sich ein Anwender zum ersten Mal im IT-Prototyp anmeldet, werden die Standardwerte für die benutzerdefinierten Daten vorgegeben. Damit die Änderung von Parametern wirksam wird, muss stets die Taste Speichern gedrückt werden.

In dem Menüpunkt der Anlagedaten gibt es folgende Berechnungseingaben:

- Schadensprognosemodell – benutzerdefiniert
- Verschlechterungsmatrizen – vordefiniert
- Schadensprognosefunktion – vordefiniert
- Auswirkungen der Maßnahmen auf die Sicherheit – vordefiniert
- Auswirkungen der Maßnahmen auf die Nachhaltigkeit – benutzerdefiniert
- Geometrische Eigenschaften – vordefiniert
- CO₂-Ausstoß Bauwerkstyp – benutzerdefiniert
- Massnahmeneffekte – vordefiniert

In Bild 6-50 wird ein Überblick zu den benutzerdefinierten Parametern gegeben, die innerhalb des aufgezeigten Beispiels zur Anwendung kamen.

In dem Menüpunkt der Netzdaten sind alle Berechnungseingaben benutzerdefiniert (vgl. Bild 6-51)

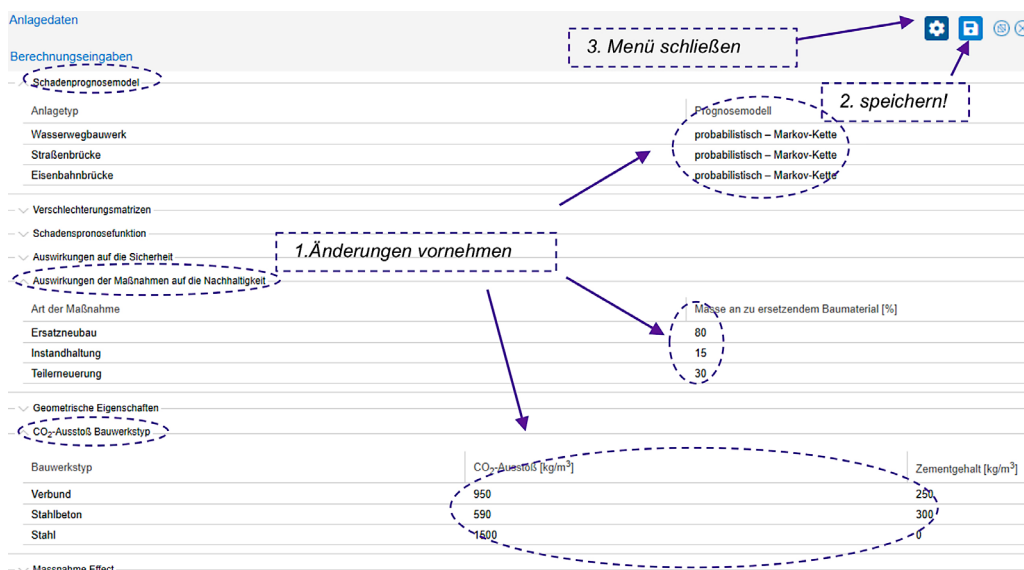


Bild 6-50: Anzeige der Berechnungseingaben im Menüpunkt zur KPI Bewertung

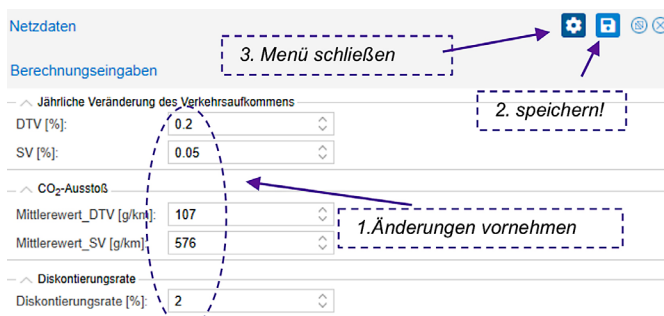


Bild 6-51: Anzeige der Berechnungseingaben im Menüpunkt zu den Netzdaten

In dem Menüpunkt zur KPI Bewertung und dem Tab Erhaltungsstrategien vergleichen kann der Anwender das Intervall für die Berechnungen festlegen (vgl. Bild 6-52). Dieses muss größer sein als das Intervall für das Zeichnen des 3D-Volumenkörpers.

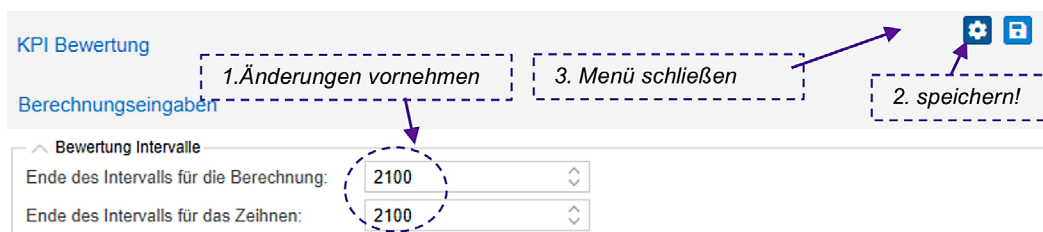


Bild 6-52: Anzeige der Berechnungseingaben im Menüpunkt zur KPI Bewertung

6.11 Kapitelzusammenfassung

Um die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Methodik zu überprüfen erfolgte in diesem Kapitel die prototypische Umsetzung im Rahmen einer Webanwendung. Zunächst galt es die grundlegenden Funktionen innerhalb des IT-Prototyps zu konzipieren sowie die für die Anwendung benötigte Datengrundlage aufzubereiten. Dazu wurde erörtert, welche Eingangsdaten zur Anwendung des IT-Prototyps benötigt werden und in welcher Form diese aufzubereiten sind. Weiterhin wurde aufgezeigt, welche theoretischen Annahmen und Berechnungsschritte für die Ermittlung der vier Key Performance Indikatoren Zuverlässigkeit, Sicherheit für Nutzer und Dritte, Verfügbarkeit sowie Nachhaltigkeit angewendet

werden. Im Rahmen der Normierung werden die dimensionsbehafteten Leistungsindikatoren in dimensionslose Kennzahlen überführt und, je nach Schlüsselindikator, zu KPI miteinander verknüpft. Die Visualisierung der Ergebnisse erfolgt schließlich anhand eines 3D-Spinnendiagramms, welches die zeitlichen Verläufe der vier KPI grafisch darstellt. Zusätzlich kann der Anwender Nutzen-Kosten-Verhältnisse je Erhaltungsstrategie für beliebig auswählbare Analysezeiträume analysieren und vergleichen. Das entwickelte LZM-Tool liefert die Grundlage für eine zukünftige Weiterentwicklung der Methodik, die an die verkehrsträgerspezifischen Anforderungen kontinuierlich erweitert werden kann.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Allgemeines

Die Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur wachsen stetig. Züge, Schiffe und LKW befahren in immer höherer Frequenz die Schienen, Wasserwege und Straßen des Landes. Hinzu kommt, dass die Belastungen für Netz und Bauwerke durch immer größere und schwerere Fahrzeuge steigen. Die Anlagen haben oft einen Großteil ihrer geplanten Nutzungsdauer erreicht und stoßen häufig an ihre Kapazitätsgrenzen. Zudem hat sich in der Vergangenheit ein Stau von notwendigen (Bau-)Maßnahmen ergeben.

Gleichzeitig sind die Möglichkeiten zum Neu- und Ausbau von Verkehrssystemen begrenzt. Daher gewinnen die Investitionen in die Leistungsfähigkeit der bestehenden Verkehrsinfrastruktur immer stärker an Bedeutung. Wesentliche Kernaufgaben der Zukunft bestehen in der systematischen Modernisierung des Bauwerksbestandes, auch unter Betrieb. Hierbei ist die Abkehr vom aktuellen reaktiven Erhaltungsmanagement hin zu einem integralen, vorrausschauenden und systematischen Vorgehen notwendig. Ein effizientes Lebenszyklusmanagement (LZM) der Infrastrukturbauwerke soll dabei helfen, die Lebensdauer der Bauwerke zu erhöhen und die notwendigen Eingriffe in den Verkehr zu minimieren. Zur Steuerung dieses Prozesses sind geeignete Key Performance Indikatoren (KPI) zu verwenden, die eine Bewertung von unterschiedlichen Lebenszyklusszenarien ermöglichen. Diese KPI bilden die oberste Hierarchieebene der Leistungsindikatoren. Das zu entwickelnde Kennzahlensystem sollte dabei verkehrsträgerübergreifend anwendbar und zukünftig mit weiteren Leistungsindikatoren erweiterbar sein.

Die Möglichkeiten moderner, innovativer Technologien sollten genutzt werden, um bei Planung, Kontrolle und Verwaltung von Verkehrsbauwerken und -netzen kostengünstiger und nachhaltiger zu agieren. Neue Formen der Datengewinnung und -verarbeitung helfen dabei, Mängel frühzeitig zu erkennen und zu adressieren. Die innovativen Technologien liefern zusätzliche physikalische Parameter bzw. Indikatoren, die in das entwickelte Kennzahlensystem integriert werden können. Weiterhin ermöglicht das Monitoring eine verbesserte Abschätzung von spezifischen Schadensentwicklungen an einem Bauwerk und unterstützt damit die Auswahl geeigneter Erhaltungsmaßnahmen innerhalb des Lebenszyklus eines Bauwerks.

Ziel dieses Projektes war es, eine Grundlage für ein Lebenszyklusmanagementtool für die Verkehrsinfrastruktur zu entwickeln. Hierfür mussten in einer ersten Phase die vorhandenen Informationen zum Bauwerks- und Infrastrukturmanagement bei den drei Verkehrsträgern Straße, Wasser und Schiene gesammelt werden. Dabei war zu klären, welche Daten im Rahmen der Instandhaltung und Bauwerksprüfung erhoben und wie diese gepflegt werden. In der zweiten Phase waren die in Phase 1 erhobenen Daten, mithilfe von Beispieldatensätzen, zusammenzuführen und ein IT-Prototyp für das Datenmanagement zu erstellen. Dieser funktioniert als selbstständiges Tool. Die Funktionalitäten des IT-Prototyps wurden mit einer Beschreibung der Handhabung dokumentiert.

Nachfolgend werden die erarbeiteten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt und Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Arbeiten gezogen. Weiterhin werden Empfehlungen in Hinblick auf eine zukünftige Entwicklung eines indikatorengestützten LZM-Tools ausgesprochen. Hierbei wird insbesondere auch der zukünftige Forschungsbedarf in diesem Zusammenhang aufgezeigt.

7.2 Zusammenfassung

Als Basis diente eine, zunächst unvollständige Indikatorenliste, welche die BAST erarbeitet hatte und zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellt hatte. Diese Indikatorenliste diente zur Entwicklung eines Kennzahlensystems mit hierarchischer Übersicht aller Kriterien und zugehörigen Indikatoren. Weiterhin erfolgte eine Überprüfung der vorhandenen Datengrundlagen der drei Verkehrsträger. Hierbei galt es, den Umfang, die Aktualität, die Qualität, die verwendeten Formate sowie die Form der Speicherung und Wartung der Daten zu dokumentieren. In Bezug auf die Ergebnisse der Experteninterviews wurde zudem überprüft, ob und in welchem Umfang die Daten der unterschiedlichen Verkehrsträger kompatibel sind. Auf technischer Ebene galt es zu eruieren welche Datenbanksysteme und Datenformate genutzt werden können, wer für die Pflege zuständig ist und in welchem Turnus die Daten aktualisiert werden. Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines Workshops interessierten Anwendern vorgestellt und mit diesen diskutiert.

Damit erste Modellberechnungen durchgeführt werden konnten, mussten die benötigten Daten identifiziert und bewertet werden. Grundlage dieser Berechnungen waren Indikatoren, die den Erfüllungsgrad von zuvor definierten Kriterien messen. Die Erfüllung dieser Kriterien war wiederum die Voraussetzung, um die verkehrspolitischen Ziele zu erreichen. Gemeinsam mit den Anwendenden der Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasser wurde eine Indikatorenliste weiterentwickelt. Dies erfolgte u. a. im Rahmen von Experteninterviews und Workshops.

Im Rahmen der zweiten Projektphase galt es, die vorhandenen Informationen aufzuarbeiten und das konzipierte indikatorengestützte Kennzahlensystem im Rahmen einer Web-Anwendung IT-prototypisch umzusetzen. Da ein umfassender Zugriff auf die Instandhaltungsdaten der drei Verkehrsträger nicht möglich war, wurden Beispieldatensätze von ausgewählten Infrastrukturbauwerken aufbereitet und für die Anwendung verwendet. Unter Berücksichtigung von vorhandenen Bauwerksschäden wurde die Zuverlässigkeit der Bauwerke auf Objekt- und Netzebene mithilfe eines bayes'schen Ansatzes beurteilt. In Abhängigkeit der Schadensart wurde zudem die Sicherheit der Bauwerke für die Nutzer sowie Dritte bewertet. Weiterhin erfolgte die Bewertung der Verfügbarkeit anhand von zusätzlichen Reisezeiten, die durch die vom Anwender zu definierenden Erhaltungsmaßnahmen hervorgerufen werden. Der Aspekt der Nachhaltigkeit wurde sowohl auf Objekt- als auch auf Netzebene ermittelt. In Abhängigkeit der Maßnahmenart wurden die zu erwartenden CO₂-Emissionen auf der Objektebene ermittelt. Auf der Netzebene hingegen erfolgte die Berechnung der CO₂-Emissionen anhand der zusätzlichen Reisewege aufgrund von Umleitungen in Abhängigkeit der Verkehrsmengen und -zusammensetzung. Die wirtschaftlichen Kosten wurden schließlich aus der Summe der Einzelkosten der gewählten Maßnahmenarten innerhalb eines Erhaltungsszenarios ermittelt. Mithilfe von 3D-Volumenkörpern konnten die Ergebnisse von beliebigen Erhaltungsszenarios miteinander verglichen werden und das jeweilige Kosten-Nutzen-Verhältnis über beliebige Analysezeiträume ausgewertet werden.

7.3 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts konnten anhand der Bearbeitung und der erzielten Ergebnisse verschiedene Erkenntnisse gewonnen und daraus entsprechende Schlussfolgerungen gezogen werden.

Die international durchgeführte Literaturrecherche zur Verwendung von Indikatoren und Kennzahlensystemen zum Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken zeigte,

dass im nationalen Bereich derzeit insbesondere die Daten aus der Bauwerksinspektion bei der Auswahl und Zeitpunkt von Erhaltungsmaßnahmen Berücksichtigung finden. Zusätzlich erfolgt oftmals die Einbeziehung des Verhältnisses zwischen vorhandener Tragfähigkeit und der tatsächlich vorzufindenden Verkehrsbelastung. Im internationalen Vergleich wurde deutlich, dass neben dem baulichen Zustand eines Bauwerks auch weitere Kennzahlen, wie z. B. die Verfügbarkeit und umweltrelevante Indikatoren, Anwendung finden. Die Definition von praxistauglichen und aussagekräftigen Indikatoren für die verschiedenen Leistungsziele stellte sich als eine große Herausforderung dar. Für den zukünftigen Einsatz eines indikatorengestützten Lebenszyklusmanagement-Tools sind die vorhandenen Datengrundlagen von besonderer Bedeutung. Sowohl die Literaturrecherche als auch die durchgeführten Experteninterviews lieferten hierbei wichtige Informationen. So zeigte sich u. a., dass im Bereich der Naturgefahren bereits eine große Datengrundlage oftmals frei zugänglich ist und in Kombination mit dem Bauwerksbestand flächendeckend ausgewertet werden kann. In diesem Zusammenhang gilt es, zukünftig geeignete Indikatoren zu identifizieren, die in Abhängigkeit des Verkehrsträgers zur Unterstützung der Entscheidungsfindung genutzt werden können.

Das entwickelte IT-Tool bietet die Möglichkeit über einen langen Analysezeitraum den jeweiligen Nutzen und die Kosten von Erhaltungsstrategien miteinander zu vergleichen. Zusätzlich zu den bisher genutzten wichtigen Daten aus der Bauwerksinspektion wird innerhalb des entwickelten Kennzahlensystems nicht nur der bauliche Zustand beurteilt. Zu den weiteren Leistungszielen zählen die Sicherheit der Nutzer sowie Dritter, die Verfügbarkeit der Infrastruktur sowie Aspekte der Nachhaltigkeit von Erhaltungsszenarien. Aufgrund der Möglichkeit verschiedene Erhaltungsszenarien über einen langen Analysezeitraum miteinander zu vergleichen, sowie deren Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und umwelttechnische Aspekte bietet das entwickelte LZM-Tool eine verkehrsträgerübergreifende und indikatorengestützte Bewertung von denkbaren Handlungsoptionen über den kompletten Lebenszyklus von Infrastrukturbauwerken.

7.4 Empfehlungen und Ausblick

Die Konzeptionierung, Entwicklung und Umsetzung einer prototypischen Anwendung für das indikatorengestützte Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken erfolgte in engem Austausch mit dem Auftraggeber sowie zahlreichen Vertretenden aus den Bereichen der drei Verkehrsträger. Aufgrund der mehrfachen Rückkopplung der (Zwischen-) Ergebnisse mit den zukünftigen potenziellen Anwendenden des IT-Tools konnten während der Projektlaufzeit bereits zahlreiche Verbesserungen umgesetzt werden. Gleichwohl wurden im Rahmen der Bearbeitung einige Themenschwerpunkte identifiziert, zu denen weiterer Forschungsbedarf besteht:

Erweiterung der Datengrundlage

Aufgrund der prototypischen Anwendung der entwickelten Methodik erfolgte die Erprobung des Kennzahlensystems anhand einer beschränkten Anzahl von Infrastrukturbauwerken. Es wird empfohlen in einem nächsten Schritt, die Methodik auf einen größeren Datensatz anzuwenden. Hierbei müssen neben den Inventar- und Zustandsdaten der Bauwerke auch die relevanten Verkehrs- und Unfalldaten, Daten aus Verkehrssimulationen, Umwelt- sowie Naturgefahren Daten ergänzt werden. Weiterhin sind zukünftig IT-Schnittstellen zu SIB-Bauwerke und weiteren Bauwerksdatenbanken der verschiedenen Verkehrsträger berücksichtigt herzustellen, um einen automatisierten Input von Eingangsdaten zu ermöglichen.

Gewichtung und Verknüpfung von Leistungsindikatoren

Die entwickelte Methodik ermöglicht die Auswahl von beliebigen Gewichtungen von Leistungsindikatoren, die dadurch zu einem Schlüssel-Leistungsindikator zusammengesetzt werden. Bisher bestehen kaum Erfahrungswerte, welche Gewichtung für die Anwendung in der Praxis zielführend ist. Gleiches gilt für das indikatorenabhängige Normierungsverfahren. Hierbei gilt es zukünftig geeignete Grenzwerte für die Transformation zwischen den auf natürlichen Einheiten basierenden Leistungsindikatoren und den dimensionslosen KPI zu definieren.

Erweiterung der Leistungsindikatoren für die Nachhaltigkeit

Der KPI Nachhaltigkeit wird innerhalb des IT-Prototyps anhand des CO₂-Ausstoßes aufgrund der baulichen Erhaltungsmaßnahmen sowie der dadurch bedingten zusätzlichen Umleitungsstrecken ermittelt. Die damit verbundenen wirtschaftlichen Ausgaben werden anhand der anfallenden Kosten abgebildet. Im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes zur Beurteilung der Nachhaltigkeit sollten weitere Leistungsindikatoren ergänzt werden, die insbesondere auch sozio-kulturelle Aspekte innerhalb eines Lebenszyklusmanagements berücksichtigen. Denkbar ist hierbei bspw. die Beurteilung von geplanten Teilerneuerung von Infrastrukturbauwerken aus architektonischer Sicht oder die Beurteilung des Einflusses auf das Landschaftsbild.

Erweiterung des LZM-Ansatzes mit Building Information Modeling

Für die Beurteilung der Zuverlässigkeit eines Infrastrukturbauwerkes werden die in SIB-Bauwerke dokumentierten Schäden ausgewertet und deren Einfluss auf die Zustandsentwicklung des Bauwerks sowie die Beeinträchtigung der Sicherheit von Nutzern und Dritten abgeschätzt. Die Erweiterung dieses Ansatzes mithilfe der Building Information Modeling (BIM)-Methode würde die Möglichkeit einer präziseren Analyse von Schadensbildern ermöglichen. So könnte bspw. eine exaktere Lokalisierung sowie Visualisierung von Schäden zu einer verbesserten Abschätzung der Auswirkungen auf den weiteren Schadensprozess ermöglichen. Dies liefert einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung des informationsgetriebenen Entscheidungsprozesses innerhalb eines Lebenszyklusmanagements.

Integration des IT-Tools in die Prozesse eines Bauwerksmanagementsystems

Aufgrund der bisher prototypischen Umsetzung der Methodik sind einige Arbeitsschritte zur Datenaufbereitung bzw. für den Datenimport nicht automatisiert. Zukünftig wird daher empfohlen, weitere Schnittstellen zwischen den bestehenden IT-Systemen innerhalb des Bauwerkmanagements und den hierbei eingesetzten Werkzeugen und Instrumenten zu schaffen. Hierzu zählen bspw. der Datenimport aus SIB-Bauwerke sowie die Integration von Ergebnissen aus Verkehrssimulationen für einzelne Erhaltungsstrategien. Dadurch kann die Interoperabilität und Bedienungsfreundlichkeit für die Anwender der einzelnen Module verbessert werden.

Zusammenfassend bieten die Ergebnisse des Projektes die Grundlage für eine Verbesserung des Verkehrsinfrastrukturmanagements – weg von reaktiven und vorbeugenden Maßnahmen hin zu einem prädiktiv, kognitiven Lebenszyklusmanagement. Durch die Bündelung vorhandener Daten und eine verkehrsträgerübergreifende Strategie, entstehen Synergien, die für Einsparung von Ressourcen und der Steigerung von Kapazitäten führen.

Literatur

ADHIKARI, R. S., O. MOSELHI, & A. BAGCHI (2013): Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection.: Automation in Construction, v. 39, p. 180-194.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2010): Highway Safety Manual. 1st Edn. Washington, DC. USA.

ARE, ASTRA (2006): Der Nutzen des Verkehrs – Teilprojekt: Beitrag des Verkehrs zur Wertschöpfung in der Schweiz), Amt für Raumplanung ARE und Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern

ARMESTO, J., ROCA-PARDIÑAS, J. LORENZO, H. & ARIAS, P. (2010): Modelling masonry arches shape using terrestrial laser scanning data and nonparametric methods, Engineering Structures 32 607615.

ASFiNAG (2019): Netzzustand 2019 – Netzzustandsbericht 2019. ASFiNAG Bau Management GmbH. Wien

ASFiNAG (2020): Wege zur nachhaltigen Mobilität – Nachhaltigkeitsbericht 2020. ASFiNAG Bau Management GmbH. Wien

ASTRA (2005): Richtlinie Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen. Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern

ASTRA (2016): KUBA 5 Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel – Leitfaden für Inspektoren, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern

ASTRA (2020): Netzzustandsbericht der Nationalstrassen – Ausgabe 2020. Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.

Die Autobahn GmbH des Bundes (2020): Finanzierungs- und Realisierungsplan (FRP) 2021 bis 2025 für die Bundesautobahnen und Bundesstraßen in Bundesverwaltung. Berlin

BEA, F., HAAS, J. (2009): Strategisches Management, 5. Auflage, Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart

BIÉN, J., GLADYSZ-BIÉN, M., KUZAWA, M. & KAMINSKI, T. (2016): Quality control of road bridges in Poland. In: Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks (pp.305-305). DOI:10.1201/9781315207681-147

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (2015): Bauwerksinspektion (MBI), BAWMerkblatt, Ausgabe 2010, Karlsruhe.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (2018): Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV), BAWMerkblatt, Ausgabe 2018, Karlsruhe.

Bundesamt für Strassen (2005): Richtlinie zur Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen, Schweiz

Bundesamt für Strassen (2014): Management von Naturgefahren auf den Nationalstrassen, Schweiz

Bundesamt für Strassen (2016): Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten, Forschungspaket AGB1, 11 Berichte, Bundesamt für Strassen, 2009 – 2010, Schweiz

Bundesamt für Strassen (2020): Netzzustandsbericht 2020, Schweiz

BORRMANN, FISCHER, DORI, WILD (2014): Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 104, Bergisch Gladbach.

British Waterways Direction (2008): Asset Inspection Procedures (AIP 2008), UK

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2017a): Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2017b): Richtlinien zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 – RI-EBW-PRÜF, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2017c): Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 – Schadensbeispiele. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2018): Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten (ASB-ING). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2020a): Richtlinien für die strategische Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken (RPE-ING). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2020b): ARS Straßenbau Nr. 09/2020: Einführung des Traglastindex, Übergabe der Daten an die Bundesanstalt für Straßenwesen. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2010): Bauwerksinspektion – VV-WSV 2101 (Verwaltungsvorschrift der Wasser-Schiffahrtsverwaltung des Bundes) [WWW Document]. URL https://izw.baw.de/publikationen/bautechnikbetrieb/0/vv-wsv-2101_2010_09.pdf (abgerufen am 22.08.21).

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (2022): ÖKO-BAUDAT – Informationsportal Nachhaltiges Bauen. https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html (abgerufen am 18.08.22).

CAN/CSA-Q850-97 Risk Management (2002): Guideline for Decision-Makers, Canadian Standards Association, 1997 (reaffirmed 2002), Canada

CLUBLEY, S.K.; MANES, C.; RICHARDS, D.J. (2015): High resolution sonars set to revolutionise bridge scour inspections. Proc. Inst. Civ. Eng. Civil Engineering, 168, 35–42

COLESANTI C. & WASOWSKI J. (2006): Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. Eng Geol 88(3–4):173–199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeol.2006.09.013>

DAHL, A.; KINDL, A.; WALTHER, C.; PAUFLERMANN, D.; ROOS, A.; WASSMUTH, V.; WEINSTOCK, F.; RÖHLING, W.; MANN, H.-U. (2016): Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030

DB Netze AG (2000): Ingenieurbauwerke planen, bauen und instandhalten: Bautechnik, Leit-, Signal- und Telekommunikationstechnik, Inspektion von Ingenieurbauwerken. Richtlinie 804.8001 bis 804.8004. Karlsruhe DB Services Technische Dienste. Karlsruhe.

Deutsche Bahn AG (2021): Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung – infrastrukturzustandsbericht- und -entwicklungsbericht 2020. Deutsche Bahn AG. Berlin.

Deutsches Institut für Normung (1999): DIN 1076 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen; Überwachung und Prüfung, Ausgabe 11/1999

ERATH A.; BIRDSALL J.; AXHAUSEN K. (2009): Vulnerability Assessment Methodology for Swiss Road Network. Transportation Research Records, 2137, 118-126. Washington, D.C., USA

FATHI, H., & BRILAKIS, I. (2011): Automated sparse 3D point cloud generation of infrastructure using its distinctive features, Advanced Engineering Informatics Vol. 25, No.4, pp 760-770.

FIEDLER, A., OFFERGELD, B., FUNKE, J., ESCHENBRUCH, K., FANDREY, A., RÖWEKAMP, H. (2016): Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 271, Bergisch Gladbach

FISCHER, J., STRAUB, D., SCHNEIDER, R., THÖNS, S., RÜCKER, W. (2014): Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen. Brücken- und Ingenieurbau Heft B 99, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, Bergisch Gladbach.

Florida DOT (2013): Development of the Risk Models for Florida's Bridge management system, USA

FSV (2003): RVS 15.01.11: Qualitätskriterien für die Planung von Brücken. Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr. Wien.

FSV (2011): RVS 13.03.11: Qualitätssicherung bauliche Erhaltung Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten Straßenbrücken. Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr. Wien.

GEHLEN, CH., MAYER, T. & SCHIEßL, P. (2008): Von Bausteinen eines nachhaltigen Lebenszyklusmanagements für Ingenieurbauwerke. Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen zerstörungsfreier Prüfungen und zukunftsauflagen, Berlin

HOLLAND, G. (2014): Asset Management in the Waterways, Canal & River Trust (formerly British Waterways), Presentation, May 2014

HAJDIN, R. (2016): Machbarkeitsstudie zu risikobasierten, objektbezogenen Ansätzen der Erhaltungsplanung von Brücken und Wasserbauwerken. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

HAJDIN, R. (2016): Quality Control Plans for Bridges. Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks – Bittencourt, Frangopol & Beck, Taylor & Francis Group, London

HAJDIN, R., BÜCHEL, B., FASTRICH, A., NOVÁK, B., BUNZ, M. (2016): Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksprüfung – Konzeption und fachliche Lösungen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 15.0628/2016/LRB, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

- HAJDIN, R., KUSAR, M., MASOVIC, S., LINNEBERG, P., AMADO, J., TANASIC, N. (2018): Quality Specifications for Roadway Bridges, Standardization at a European Level. TU1406 Cost Action, WG3 Technical Report – Establishment of a Quality Control Plan
- HAJDIN, R. (2019): Inspection of Existing Bridges – moving on from condition rating, IABSE Symposium, Guimaraes, Portugal
- HAJDIN, R., SCHIFFMANN, F. (2019): infFaros – Road Infrastructure Management Systems for Research and Practice, IABSE Symposium, Guimaraes, Portugal
- HAJDIN, R., FASTRICH, A. (2019): Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksprüfung – Feinkonzept, Entwurf Schlussbericht zu FE 89.0333/2017. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Unveröffentlicht
- HEGEWALD, A., FÜRNEISEN, S., TAUTZ, W. (2015): Motorradunfälle – Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 268, Bergisch Gladbach
- HEINEN, E. (1966): Das Zielsystem der Unternehmung: Grundlagen betriebswirtschaftlicher Entscheidungen, Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, Wiesbaden
- HERRMANN, C. (2010): Ganzheitliches Life Cycle Management; Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen, Springer Verlag, <http://www.springer.com/978-3-642-01420-8>
- HOLST, R. (2018): Bauwerksprüfung im Verkehrssektor außerhalb der Straße – Entwicklungen und Chancen. In: Erfahrungsaustausch des Bauwerksprüfpersonals, Koblenz
- Infrastructure Management Consultants GmbH (IMC) (2022): infTruck – Zuverlässige und effiziente Beurteilung von Sondertransporten. <https://imc-ch.com/de/produkte/>
- ISAILOVIĆ, D., PETRONIJEVIĆ, M., HAJDIN, R. (2019): The future of BIM and Bridge Management Systems, IABSE Symposium, Guimaraes, Portugal
- ISAILOVIĆ, D., STOJANOVIC, V., TRAPP, M., RICHTER, R., HAJDIN, R. & J. DÖLLNER (2020): Bridge damage: Detection, IFC-based semantic enrichment and visualization. Journal of Automation in Construction, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aut-con.2020.103088>
- ISO 55000 Asset management – Overview, principles and terminology, 2014, International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- ITRC WS2 (2012): A Method Statement for Infrastructure Network Risk Analysis, UK Infrastructure Transitions Research Consortium, UK
- JCSS Joint Committee on Structural Safety (2008): Risk Assessment in Engineering – Principles, System Representation & Risk Criteria, Switzerland
- KEENEY, R. L. & H. RAIFFA (1976): Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs, John Wiley & Sons, New York, Santa Barbara, London, Sydney, Toronto
- KRIEGER, J., GEHRLICHER, K. (2000): Die Entwicklung der Erhaltungsausgaben für die Brücken der Bundesfernstraßen, Bautechnik 77, Heft 11, Ernst & Sohn Verlag, Hoboken, New Jersey, USA
- KRIEGER, J. (2020): Risiko- und Resilienzmanagement im Kontext von Asset Management, in: Straße und Autobahn, Heft 7, S. 582-590, Kirschbaum Verlag, Bonn

- KUŠAR, M., GALVÃO, N. & SEIN, S. (2019): Regular bridge inspection data improvement using non-destructive testing, In *Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision – Caspeele, Taerwe & Frangopol (Eds) 2019 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-62633-1*
- LEBHARDT, A., SEILER, D., GERDES, A., BOMBECK, A., LENNERTS, K. (2020): *Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorengestützten Systems. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 159, Bergisch Gladbach*
- LoBEG (2011): *Good Practice Guide: Phase I – Maintenance Prioritisation for Highway Structures, Version 4.0, LoBEG (London Bridges Engineering Group), UK*
- LUBOWIECKA, I., ARMESTO, J. ARIAS, P. AND LORENZO, H. (2009): Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics, *Engineering Structures* 31 (11) 2667-2676.
- LÜKING, J., SCHNEIDER, A., HAFEN, M. & ALBRECHT, J. (2014): *Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen. VSS 2011/705, Bundesamt für Strassen, Schweiz.*
- Main Roads Western Australia (2004): *Annual Report 2004. (online) <http://www.mainroads.wa.gov.au>*
- MAŠOVIĆ, S., HAJDIN, R., (2014): Modelling of bridge elements deterioration for Serbian bridge inventory. *null* 10, 976–987. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.774426>, abgerufen am 25.09.2022
- MIELECKE, T., KISTNER, V., GRAUBNER, C.-A., KNAUF, A., FISCHER, O. & SCHMIDT-THRÖ, G. (2010): *Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke in Hinblick auf Nachhaltigkeit Straßeninfrastruktur. Forschungsbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, B 125, Bergisch Gladbach.*
- MILILLO, P., GIARDINA, G. PERISSIN, D. MILILLO, G. COLETTA, A. & TERRANOVA, C. (2019): Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy, Remote Sensing. Volume.11, 1403; doi:10.3390/rs11121403w
- MURPHY, R., STEIMLE, E., HALL, M., LINDEMUTH, M., TREJO, D., HURLEBAUS, S. & MEDINACETINA, Z., (2011): Robot-assisted bridge inspection. *Journal of Intelligent Robot Systems*, 64(1), 77– 95.
- NARANIECKI, H. & MARX, S. (2019): *Zustandsentwicklung und -prognose von Eisenbahnbrücken. 60. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Hannover.*
- PELZETER, A., (2017): *Lebenszyklus-Management von Immobilien: Ressourcen- und Umweltschonung in Gebäudekonzeption und -betrieb, 1. Auflage. ed, Beuth Praxis. Beuth Verlag GmbH, Berlin Wien Zürich.*
- PHARES, B. M., WASHER, G. A., ROLANDER, D. D., GRAYBEAL, B.A. & MOORE, M. (2004): Routine highway bridge inspection condition documentation accuracy and reliability. *Journal of Bridge Engineering*,9(4), 403–13.
- PIEVC (2011): *Engineering Protocol for Infrastructure Vulnerability Assessment and Adaptation to a Changing Climate”, Canadian Council of Professional Engineers, Canada*
- POPESCU, C., TÄLJSTEN, B., BLANKSVÄRD, T. & ELFGREN, L. (2019): 3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(7).

Rijkswaterstaat (2012): Leidraad RAMS—sturen op prestaties van systemen (in Dutch)., Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

ROSENTHALER, CH., KOCH, R., HAJDIN, R. & BOTZEN M. (2015): Zeitaspekte und Historisierung. Forschungsprojekt 2011/711 auf Antrag VSS, Bundesamt für Strassen, Ittigen, Schweiz

RØDSETH, KL., WANGSNESS, P., VEISTEN, K., HØYE, A., ELVIK, R., KLAEBØE, R., (2019): The external costs of transport – Marginal damage cost estimates for passenger and Freight transport in Norway. (TOI-Report). Oslo: Institute of Transport Economics. ISBN: 978-82—480-2244-2.

RUB (in Vorbereitung): Bridge Inspect – Bauwerksprüfung von Brücken mit Mixed Reality und Künstlicher Intelligenz. Laufendes Forschungsprojekt: <http://bridge-inspect.de/>

SBB (2020a): Überwachung und Unterhalt der Anlagenart Brücken – URL Brücken. IMS Infrastruktur.

SBB (2020b): Richtlinie für Überwachung und Unterhalt der Ingenieurbauten – Grundlagen. IMS Infrastruktur.

SCHENK, D., LAURSEN, C. (2018): WinD, DIBS und Co. Kolloquium Digitalisierung im Verkehrswasserbau. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

SCHENK, D., LAURSEN, C. (2020): Digitalisierung im Verkehrswasserbau: Aktuelle Entwicklungen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hrsg.): Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel. Dresdner Wasserbau-liche Mitteilungen 63. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 89-98.

SCHIFFMANN, F. (2014): Entscheidungsmodell zur Ermittlung optimaler Baustellenabschnitte an Autobahnen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht, Diss.-No. ETH 21665, <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-010182371>

SCHIFFMANN, F., HAJDIN, R., WEIS, C., VRTIC, M., VON SURY, J. (2020): Routenwahlverhalten durch baustellenbedingte Reisezeitveränderungen infolge geplanter Erhaltungsprojekte – RobaRE, UVEK, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern

SCHMIDT-THRÖ, G., MIELECKE, T., JUNGWIRTH, J., GRAUBNER, C.-A., FISCHER, O., KUHL-MANN, U. & HAUF, G. (2016).

Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus. Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.0522/2011/FRB. Brücken- und Ingenieurbau Heft B 131, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, Bergisch Gladbach

SCHMELLEKAMP, C. (2016): Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 129, Bergisch Gladbach

SCHNELLENBACH-HELD, M., PEETERS, M. & MIEDZINSKI, G. (2015): Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton. Brücken- und Ingenieurbau Heft B 110, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, Bergisch Gladbach

SCHULENBURG, N. & P. D. M. HÜLSMANN (2008): Entstehung von Unternehmenskrisen: Eine evolutionstheoretische Erklärung, Gabler Verlag, Wiesbaden

- SN 588 469 (1997): SIA 469: Erhaltung von Bauwerken, Schweizerische Ingenieur- und Architektenverband (SIA), Zürich
- SN 640 900 (2022): Erhaltungsmanagement (EM), Grundnorm, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- State Emergency Management Committee (2014): Western Australian Emergency Risk Management Guide, Australia
- Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (2022): Verkehrsunfälle. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/_inhalt.html;jsessionid=BC954BD7C33A-2C2AB88EF5104109222C.live712, abgerufen am 25.09.2022, 15:03 Uhr.
- STÖCKNER, M., HAJDIN, R., KÖNIG, M., GAVIN, K., ZWERNEMANN, P., LIU, L., BLUMENFELD, T., SCHIFFMANN, F. (2022): Report outlining current assessment techniques and identifying opportunities how to incorporate new data streams in condition assessment. CEDR-Project AMSfree.
- STRAUSS, A., MANDIĆ, A., IVANKOVIĆ (2016): Performance Indicators for Roadway Bridges of Cost Action TU1406, (online) https://www.tu1406.eu/wp-content/uploads/2016/10/COST_TU1406_WG1_TECH_REPORT.pdf (16.07.2020).
- STUPPAK, MAURER (2018): Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Bügel- und Torsionslängsbewehrung bei kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion. 3. Brückenkolloquium. Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken, 19. und 20. Juni 2018. Tagungshandbuch 2018
- Transit New Zealand (2004): Risk Management Process Manual, New Zealand
- Transport for London (2011): TfL Good Practice Guide: Risk Based Inspection for Highway Structures, UK
- TRB (2014): Proposed Guideline for Reliability-Based Bridge Inspection Practices, TRB, NCHRP Report 782, USA
- TRUONG-HONG, L., & D. LAEFER (2014): Application of Terrestrial Laser Scanner in Bridge Inspection: Review and an Opportunity, 37th IABSE Symposium: Engineering for Progress, Nature and People., Madrid, Spain, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE).
- TRUONG-HONG, L., FALTER, H. LENNON, D. & LAEFER, D. (2016): Framework for bridge inspection with laser scanning." In Proc., 14th East Asia-Pacific Conf. on Structural Engineering and Construction (EASEC-14), 1–9. Ho Chi Minh City, Vietnam: EASEC.
- US army corps of engineers (2014): Safety of dams – policy and procedures, 2014
- U.S. DOT (2015): Industry Snapshots: Uses of transportation, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation.
- WAGNER, W., VAN GELDER, P.H.A.J.M. (2014): Applying RAMSSHEEP analysis for risk-driven maintenance, Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon – Steenbergen et al. (Eds.), Taylor & Francis Group, London
- WEILER, S. (2019): Robustheit und Vulnerabilität der Wasserstraßeninfrastruktur. 4. BIH-Treffen. Interdisziplinäre Forschung – Chancen und Herausforderungen. Dresden.
- WESLEY, W. (2012): RAMSSHEEP Analysis: A Tool for Risk-driven Maintenance – Applied for Primary flood Defense Systems in the Netherlands

ZWERGER, J., KÖNIG, W., SCHIMSCHAL, B., PINNEL, R., SCURIC, Z., DEGENHARDT, K. & JACKMUTH, A. (2019): EPING: Erhaltungsbedarfsprognose für Ingenieurbauwerke, in: Straßenverkehrstechnik, Heft 11, S. 807-811, Kirschbaum Verlag, Bonn.

Bilder

Bild 1-1: Methodische Vorgehensweise.....	18
Bild 1-2: Übersicht zur Struktur des Forschungsberichtes	19
Bild 2-1: Grundsätzlicher Ansatz zur mittel- bis langfristigen Planung von Erhaltungsmaßnahmen innerhalb eines Lebenszyklusmanagements für Infrastrukturbawerke	23
Bild 2-3: Vollständige Zielformulierung	25
Bild 2-4: Überblick zu Verfahren zur Zustandserfassung eines Bauwerks.....	27
Bild 2-5: Ergebnisse der Zustandsbewertung einer Brücke in schlechtem Zustand.....	28
Bild 2-6: Ergebnisse der Zustandsbewertung einer Brücke in gutem Zustand.....	28
Bild 2-7: Mit LiDAR aufgenommene Punktwolke der historischen Bogenbrücke Pont de Carouge, Geneva, Schweiz	31
Bild 2-8: Photogrammetrische Rekonstruktion der historischen Bogenbrücke Pont de Carouge, Geneva, Schweiz.....	31
Bild 2-9: Beispielhafter Vergleich zwischen prognostiziertem Schadensverlauf anhand der Bauwerksinspektion und Monitoringdaten	33
Bild 2-10: IFC-Struktur für die geometrische Darstellung von Schäden (ISAILOVIC et al. 2020).....	34
Bild 2-11: Zustandsbewertung von Brücken auf verschiedenen Gliederungsebenen	35
Bild 2-12: Prognose der Kennzahlen Zuverlässigkeit β und Eintrittswahrscheinlichkeit p_f .	41
Bild 3-1: Leistungsziele der ASFiNAG (ASFiNAG 2020)	47
Bild 3-2: Übersicht zu Wiederbeschaffungswert, Zustand und Ausgaben zum Unterhalt 2020 (ASTRA 2020)	49
Bild 3-3: Leistungsziele der Schweizer Bundesbahnen (SBB).....	50
Bild 3-4: Absolute Häufigkeiten von verwendeten Key Performance Indikatoren (KPI) für das Bauwerksmanagement in Europa (STRAUSS et al. 2016)	54
Bild 3-5: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der KPI Zuverlässigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Umwelt (HAJDIN et al. 2018).....	55
Bild 3-6: Absolute Häufigkeiten der PIs (HAJDIN 2019)	55
Bild 4-1: Begriffsverknüpfung auf der Ebene einer Anlage	63
Bild 4-2: Begriffsverknüpfung auf der Netzebene.....	64
Bild 4-3: Verknüpfung von Eigenschaften zu Indikatoren (PI) und zu Schlüsselindikatoren (KPI).....	65
Bild 4-4: Grafische Gegenüberstellung von Einwirkung (E) und Widerstand (R) mithilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen	66

Bild 4-5: Zeitliche Entwicklung der KPIs Zuverlässigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit eines Brückenbauwerks	69
Bild 4-6: Differenzenvergleich von Szenarien als Bewertungskriterium der Resilienz	70
Bild 4-7: Beispiel für die Berechnung der Resilienz für die Fälle ohne Instandhaltung (oben) und mit Instandhaltung (unten).....	70
Bild 4-8: Bayes'sches Netz für eine Winkelstützmauer.....	72
Bild 4-9: PI-Typ (links); PI-Ebene (rechts).....	74
Bild 5-1: Datenstruktur in SIB-Bauwerke	78
Bild 5-2: Datenstruktur für Wasserbauwerke	80
Bild 5-3: Bewertung der Datengruppen für den Bereich Straße.....	83
Bild 5-4: Bewertung der Datengruppen für den Bereich Schiene.....	83
Bild 5-5: Bewertung der Datengruppen für den Bereich Wasserwege	83
Bild 6-1: Übersicht an notwendigen Eingangsdaten für den IT-Prototyp.....	90
Bild 6-2: Beispiel für eine Systemskizze eines Netzwerks	90
Bild 6-3: Datenmodell des IT-Prototyps	91
Bild 6-4: Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Zuverlässigkeit eines Bauwerks..	93
Bild 6-5: a) Balkenmodelle für eine Brücke; b) Beispiel einer Bemessungsnorm	95
Bild 6-6: Grundwerte von Lastmodell 1 nach DIN EN 1991-2:2010-12 (Verkehrsnorm)...	96
Bild 6-7: Versagensarten und sich daraus ergebende gefährdete Bereiche bei Einfeld- und Mehrfeldträgern in Bezug auf Momentenbelastung unter Berücksichtigung der Lage der Schäden im Querschnitt (HAJDIN & FASTRICH 2019)	96
Bild 6-8: Modellierung der Änderung des Widerstandes infolge von Schäden (HAJDIN & FASTRICH 2019).....	97
Bild 6-9: Mögliche Kombinationen für die Sperrung der Verbindung von A nach B (gleichzeitiger Ausfall von mehreren Anlagen).....	98
Bild 6-10: Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Sicherheit eines Bauwerks.....	99
Bild 6-11: Getroffene Annahme der zu erwartenden Anzahl an Unfällen je Mio.-Fz. in Abhängigkeit der V-Bewertung, Bildschirmfoto des LZM-Prototyps	100
Bild 6-12: Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Verfügbarkeit einer Erhaltungsstrategie.....	104
Bild 6-13: Prinzip zur Bewertung der Kombinationen von Verkehrsstörungen	104
Bild 6-14: Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Nachhaltigkeit einer Erhaltungsstrategie	106
Bild 6-15: Methodik zur Ermittlung und Bewertung der KPI Nachhaltigkeit einer Erhaltungsstrategie aufgrund Umleitungsstrecken	108
Bild 6-16: Übersicht der Infrastrukturbauwerke in der Kartendarstellung	110

Bild 6-17: Fensteransicht zu den Anlagedaten (keine Maßnahmenzenarien angewendet)	111
Bild 6-18: Liste mit Schadensarten	111
Bild 6-19: Bayes'sches Netz zur Berechnung von a priori Zuverlässigkeitsindizes: Widerstand/Gebrauchsgrenze Eingabedaten	112
Bild 6-20: Widerstandverminderung aufgrund vordefinierter Schäden: Bayes'sches Netz für die Berechnung (oben); resultierender reduzierter Widerstand (unten)	113
Bild 6-21: Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen in Abhängigkeit des Schadensmerkmals für die probabilistische Zustandsprognose	113
Bild 6-22: Auswahl des Funktionstyps für die deterministische Zustandsprognose	114
Bild 6-23: Hinzufügen eines neuen Maßnahmenzenarios.....	114
Bild 6-24: Ansichtsfenster zur Festlegung von Maßnahmenarten innerhalb eines Maßnahmenzenario.....	114
Bild 6-25: Auswirkungen der Maßnahmenart auf den Schweregrad eines bestimmten Schadens	115
Bild 6-26: Fensteransicht zu den Anlagedaten (Beispiel für ein angewandtes Szenario)..	115
Bild 6-27: Benutzerdefinierte Daten zur Berechnung der CO ₂ -Emissionen aufgrund einer Maßnahmentyp.....	116
Bild 6-28: Fensteransicht zu den Netzdaten	116
Bild 6-29: Beispiel für das Definieren einer netzweiten Erhaltungsstrategie.....	117
Bild 6-30: Fensteransicht zu den Einstellungen der Netzdaten.....	117
Bild 6-31: Darstellung von vorhandenem Budget (rot) und Ausgaben (grün) aufgrund der gewählten Erhaltungsstrategie	118
Bild 6-32: Fensteransicht zur Normierung innerhalb der KPI-Bewertung (ein Beispiel für Verfügbarkeit)	118
Bild 6-33: Fensteransicht zum Vergleich von Erhaltungsstrategien	119
Bild 6-34: Auswahl des Analysezeitraums zur KPI Bewertung	119
Bild 6-35: Vergleich von zwei Erhaltungsstrategien: anhand des Volumenkörpers und den Kosten (obere Tabelle), anhand der vier KPI zu diskreten Zeitpunkten (untere Grafik).....	120
Bild 6-36: 3D-Visualisierung der KPI-Verläufe (1)	120
Bild 6-37: 3D-Visualisierung der KPI-Verläufe (2)	121
Bild 6-38: Startfenster mit ausgewähltem Bauwerk	122
Bild 6-39a: Anzeige der zukünftigen Entwicklung der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit ohne Durchführung von Maßnahmen für Anlage Nr.1: a) Auswirkungen von zwei Schäden	122

Bild 6-39b: Anzeige der zukünftigen Entwicklung der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit ohne Durchführung von Maßnahmen für Anlage Nr.1: b) Auswirkungen von zwei Schäden	123
Bild 6-40: Anzeige der zukünftigen Entwicklung der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit ohne Durchführung von Maßnahmen für Anlage 2.....	123
Bild 6-41: Anzeige der zukünftigen Entwicklung der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit ohne Durchführung von Maßnahmen für Anlage 3.....	124
Bild 6-42: Anzeige der zukünftigen Entwicklung der PI Zuverlässigkeit und Sicherheit ohne Durchführung von Maßnahmen für Anlage 4.....	124
Bild 6-43: Festlegen eines neuen Maßnahmenzenarios im Menüpunkt Anlage- daten für Anlage Nr.1: a) Sz_1A; b) Sz_1B	125
Bild 6-44: Festlegen eines neuen Maßnahmenzenarios im Menüpunkt Anlage- daten für Anlage Nr.3:a) Sz_3A; b) Sz_3B	126
Bild 6-45: Übersicht zu den Auswirkungen der Erhaltungsstrategie – Strategie_A auf die KPI: a) Verfügbarkeit & Nachhaltigkeit; b) Zuverlässigkeit und Sicherheit..	127
Bild 6-46: Übersicht zu den Auswirkungen der Erhaltungsstrategie – Strategie_B auf die KPI: a) Verfügbarkeit & Nachhaltigkeit; b) Zuverlässigkeit und Sicherheit..	128
Bild 6-47: Überblick über die normalisierten KPI-Werte für Erhaltungsstrategie- Strategie_A: a) Verfügbarkeit; b) Nachhaltigkeit	129
Bild 6-48: Überblick über die normalisierten KPI-Werte für Erhaltungsstrategie- Strategie_A: a) Zuverlässigkeit und b) Sicherheit	130
Bild 6-49: Anzeige der Ergebnisse der Erhaltungsstrategie anhand des 3D-Spinnen- diagramms und des orthogonalen Schnittes zu einem gewählten Zeit- punkt (Jahr 2075)	131
Bild 6-50: Anzeige der Berechnungseingaben im Menüpunkt zur KPI Bewertung	132
Bild 6-51: Anzeige der Berechnungseingaben im Menüpunkt zu den Netzdaten.....	132
Bild 6-52: Anzeige der Berechnungseingaben im Menüpunkt zur KPI Bewertung	132

Tabellen

Tab. 2-1: Beurteilung der Wirksamkeit von zerstörungsfreien Prüfmethoden (KUSAR et al. 2018)	30
Tab. 2-2: Notenbereiche der Zustandsbewertung (RI-EBW-PRÜF)	36
Tab. 2-3: Notensystem zur Beurteilung des Bauwerkszustands	37
Tab. 2-4: Objektbeurteilung gemäß RVS 13.03.11 (FSV 2011)	37
Tab. 2-5: Zustandsklassen mit Beschreibung (SN 588 469)	38
Tab. 2-6: Zustandskategorien der Zustandsbewertung für Eisenbahnbrücken (DB Netz AG 2000)	39
Tab. 2-7: Zustandsklassen der Zustandsbewertung der SBB (SBB 2020a)	39
Tab. 2-8: Schadensklassen der Zustandsbewertung für Wasserbauwerke (BAW 2015) ...	40
Tab. 2-9: Übersicht zu eingesetzten Prognosemethoden für Infrastrukturbauwerke	42
Tab. 2-10: Kennwerte bzw. Grenzwerte für die Planung u. Einleitung von Erhaltungsmaßnahmen der Infrastrukturbetreiber	42
Tab. 2-11: Übersicht zum Stand der Technik in der Praxis in Bezug auf die Durchführung einer Erstinspektion und die Analyse von Kosten u. Wirkung von durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen	43
Tab. 3-1: Kriterienkatalog – baulicher Objektzustand (LEBHARDT et al. 2020)	52
Tab. 3-2: Bewertungskriterien auf Netzebene (LEBHARDT et al. 2020)	52
Tab. 4-1: Übersicht an Schadensprozessen (HAJDIN et al. 2018)	61
Tab. 4-2: Übersicht zur Anzahl an PIs, die mit den KPIs einfach verknüpft wurden	74
Tab. 4-3: Übersicht zur Anzahl an PIs, die mit den KPIs mehrfach verknüpft wurden.....	74
Tab. 5-1: Kriterien zur Bewertung der Datengrundlagen	76
Tab. 6-1: Normierung der Zeitverluste für den Personenverkehr	88
Tab. 6-2: Normierung der Zeitverluste für den Güterverkehr	88
Tab. 6-3: Beispielhafte Daten zur Definition eines Netzwerks	91
Tab. 6-4: Schadensarten eines Brückenbauwerks und Auswirkungen auf Biegung und Querkraft (S-Bewertung)	94
Tab. 6-5: Beispielhafte Verteilungsfunktionen, Variationskoeffizienten und Quantile für die Einwirkungen und den Widerstand für Brückenbauwerke	97
Tab. 6-6: Schadensarten für Brücken in Bezug auf die Sicherheit (V-Bewertung)	100
Tab. 6-7: Beispiel für die Eingangsdaten in das LZM-Tool aus einer Verkehrssimulation	105
Tab. 6-8: Getroffene Annahmen zum CO ₂ -Ausstoß in Abhängigkeit der Maßnahmenart und Bauwerkstyp (in Anlehnung an BMWSB 2022)	107

Tab. 6-9: Beispiel für die Eingangsdaten der Verkehrssimulation (tägliche zusätzliche Entfernungen pro Verkehrsart)	109
Tab. 6-10: Beispiel für CO ₂ -Ausstoß je Fahrzeugkategorie (RØDSETH et al. (2019)	109

Anhang

a) **Indikatorenliste**

Der zum Zeitpunkt des Projektabschlusses (10/2022) aktuelle Stand der überarbeiteten Indikatorenliste wird im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> als Excel-Datei zur Verfügung gestellt.

b) Fragebogen der Experteninterviews

Datum: ...

Uhrzeit: ...

Hinweis zum Interview:

Zusätzlich ausgehändigte Unterlagen:

-

Grundlegende Informationen

1. Name der befragten Person:
2. E-Mail:
3. Unternehmen/Institution (+Website):
4. Position/Abteilung (falls zutreffend):
5. Dauer der Beschäftigung in der Position

Inventardaten

1. Welches sind die verschiedenen Anlageklassen im Bestand und welche Größe hat das Netz (Länge des Netzes, Anzahl der Anlageobjekte)?
2. Wie werden die einzelnen Anlageklassen gegliedert?

Messung der Qualität/Leistung der Infrastruktur

1. Werden für den Entscheidungsfindungsprozess für größere Erhaltungsmaßnahmen leistungsbezogene (z. B. bei der Erfüllung der Asset-Management-Ziele bei der Planung von Erhaltungsmaßnahmen mittels KPIs/Pis) oder eher zustandsbezogene Indikatoren verwendet?

Leistungsindikator (PI): Ein Befund (gemessene/aufgezeichnete Information), der zur Messung der Leistung (Qualität) einer Anlage verwendet werden kann (z. B. Rissbreite/-länge an einer bestimmten Stelle eines Bauwerks oder seines Elements, die mit dem Verlust der Tragfähigkeit in Verbindung gebracht werden kann)

Schlüssel-Leistungsindikator (KPI): Bewertet anhand eines oder mehrerer PI-Indikatoren, die zeigen, ob die Asset-Management-Ziele (Leistung) erreicht werden (z. B. strukturelle Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Umweltindex...)

2. Welche Ziele werden innerhalb des Asset Managements verfolgt?
 - a. Mobilität der Nutzer (z. B. Verfügbarkeit, Funktionsfähigkeit, Zuverlässigkeit der Reisezeit)
 - b. Tragsicherheit and Sicherheit für die Nutzer
 - c. Zufriedenheit und Komfort der Nutzer
 - d. Auswirkungen auf die Umwelt
 - e. Reputation der Firma
 - f. Wirtschaftlichkeit
 - g. Sonstiges (bitte nennen)

Bitte bewerten Sie die Wichtigkeit dieser Ziele (0-5, 0=nicht berücksichtigt, 5=höchste Wichtigkeit)

3. Messung der Einhaltung der Asset-Management-Ziele mittels KPIs/PIs:
Welche KPI/PI werden verwendet und wie/wann werden sie gemessen/berechnet?
 - a. Mobilität der Nutzer: Reisezeit, Reiseentfernung, Verkehrs-/Geschwindigkeitsbeschränkungen, netzweit belegter Anteil durch Baustellen, zeitliche Verfügbarkeit von Bahnstrecken, maximale Überlastungsstunden? Andere?
 - b. Tragsicherheit and Sicherheit für die Nutzer: Unfallrate/-zahl, spezifischer Anlagenzustand, Ausfallrate von Anlagen, Zuverlässigkeit, Sicherheitsindex? Andere?
 - c. Zufriedenheit und Komfort der Nutzer: Umfragen/Beschwerden, Reiseannullierungen/Verspätungen, Messungen der Gleisdynamik? Andere?
 - d. Auswirkungen auf die Umwelt: Lärmpegel, Lärmreduzierung, Schutz der Tierwelt, Ökologie (z. B. Gasemissionen)? Andere?
 - e. Reputation der Firma: finanziell, nicht-finanziell? Anderes?
 - f. Wirtschaftlich: Genauigkeit eines Budgets? Anderes?
 - g. Sonstiges?
4. Planung von Maßnahmen:
 - a. Planen Sie Erhaltungsmaßnahmen für jede Anlageklasse separat oder gibt es eine Koordinierung der Maßnahmen für verschiedene Anlageteilen? (z. B. Korridorplanung)
 - b. Wie nehmen Sie Abwägungen zwischen verschiedenen KPIs vor (z. B. monetär, qualitativ, ...)? Optimieren Sie z. B. im Rahmen eines Koordinationsprozesses der Erhaltungsplanung? Falls ja, wie wird dies umgesetzt?
 - c. Unterscheiden Sie Maßnahmen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit von Maßnahmen, die aufgrund eines bestimmten Anlagenzustands erforderlich sind? Kombinieren Sie diese Eingriffe?
 - d. Unterscheiden Sie zwischen Maßnahmen zur Verringerung des Risikos aufgrund von Naturgefahren und Maßnahmen, die aufgrund des Zustands der Anlage erforderlich sind? Kombinieren Sie diese Eingriffe?
 - e. Gibt es eine bestimmte Verkehrslinie oder bestimmte Anlagen, die Priorität haben? Aufgrund von welchen Indikatoren wird die Priorisierung durchgeführt? Wird die entsprechende Leistung der priorisierten Anlageobjekte auch mit gleichen KPI's (wie die übrigen Anlagen) gemessen oder haben diese eigene KPI's?
5. Wird eine Prognose des Zustands (oder der Leistung) unter Berücksichtigung geplanter Maßnahmen durchgeführt? Oder wird nur reaktive Erhaltung durchgeführt?
 - a. Werden deterministische oder probabilistische Modelle verwendet?
 - b. Was löst präventive Maßnahmen aus? Schwellenwert Zustand für jede Anlagenklassen vorhanden?
 - c. Werden langfristige Kosten berücksichtigt? Wie setzen sich diese zusammen?
6. Sind nach den Maßnahmen Inspektionen vorgesehen? Verfügen Sie über Aufzeichnungen der Wirksamkeit von Erhaltungsmaßnahmen?

Zustandsdaten

1. Wird der Zustand eines Anlageobjektes mit einer Bewertungsnote oder mit einem physikalischen Parameter angegeben (z. B. analog bei Fahrbahnen Spurrinnentiefe)?
2. Gibt es eine weitere Gliederung der Anlageobjekte für die Zustandserfassung (z. B. SIB Bauwerke -> Bauwerksteile, Einzelschäden)?
3. Wird der Zustand der einzelnen Anlagenklassen (nur) visuell erfasst?
4. Wenn ja,
 - a. Es gibt Schadenskataloge für alle Anlagenklassen und deren Objekte
 - b. Es erfolgt nur eine textliche Beschreibung
 - c. Anderes
5. Werden auch andere Erfassungsmethoden für die Zustandserhebung verwendet? Wenn ja, wie nutzen Sie diese erhobenen Daten?
 - a. Zerstörungsfreie Erfassungsmethoden (NDT non destructive testing) oder zerstörungssarme Methoden? Schnell fahrende Fahrzeuge oder Drohnen?
 - b. Nutzer (z. B. über Smartphone-Apps)? Fahrzeughersteller (Sensordaten)
6. Was sind die wichtigsten Indikatoren/Parameter für die einzelnen Anlagenklassen, die bei der Zustandsbewertung berücksichtigt werden (z. B. Durchbiegung, Risse, Abplatzungen, Elementzustandsbewertung)?
 - a. Welche sind es konkret?
 - b. Wie wirkt sich dies auf die Prioritätensetzung bei der netzweiten Erhaltungsplanung der Anlagen aus?
7. Wird die Lage von Schäden an einem Anlageobjekt berücksichtigt? Wie wird dies in der Entscheidungsfindung berücksichtigt (z. B. kostenbestimmendes/sicherheitsrelevantes Bauwerksteil)?

Verkehrsdaten

1. Wie erfolgt die Erhebung von Verkehrsdaten (z. B. automatische Zählstellen, temporäre Verkehrsdatenerhebung)? Werden spezifische Daten zu den Fahrzeugtypen erfasst (Sondertransporte, Lkw/Zug-Ladungen, Anzahl der Fahrgäste)?
2. Welchen Einfluss haben die Verkehrsdaten auf die Bewertung einer Anlage und die Entscheidungsfindung im Asset Management?
3. Verfügen Sie über ein (Netz-)Verkehrsmodell, und wenn ja, verwenden Sie es bei der Erhaltungsplanung?

Unfalldaten

1. Werden Unfälle klassifiziert und wie (z. B. standardisiertes Unfallprotokoll)? Wird die Ursache von Unfällen aufgezeichnet?
 - a. Wird geprüft, ob der Anlagezustand und/oder die vorhandene Geometrie eine mögliche Ursache sein kann?
2. Sammeln Sie Daten über das finanzielle Ausmaß der unfallbedingten Schäden (an Benutzern oder Infrastruktur)?

3. Wie werden Unfallstatistiken und geografische Daten über Unfälle im Asset Management verwendet (z. B. für die Priorisierung)?

Umweltdaten

1. Welche Daten erfassen/bewerten Sie? Was wird gemessen und wie oft?
 - a. Lärmpegel?
 - b. andere Umweltparameter (z. B. CO₂-Emissionen, NO₂-Emissionen)?
 - c. CO₂-Bilanz von Baustoffen?
2. Wie nutzen Sie Umweltdaten bei der Verwaltung der Anlagen (z. B. für die Priorisierung)?

Bonusfrage: Daten zu Naturgefahren

1. Führen Sie systematisch ein Gefahrenscreening durch oder holen Sie Gefahrendaten bei anderen Behörden und Institutionen ein?
2. Verfügen Sie über eine historische Datenbank zu Gefährdungen?
3. Verfügen Sie über Karten zur Gefahrenintensität?
4. Erläutern Sie kurz, wie/ob diese Daten bei der Verwaltung der Anlagen verwendet werden

c) Übersicht der Interviewpartner

Im Rahmen der Arbeitspakete 2 und 3 wurden zur Ergänzung Experteninterviews durchgeführt. Folgende Institutionen wurden interviewt:

Nr.	Verkehrsträger	Land	Organisation	Abteilung
1	Bahn	Deutschland	DB Netz AG	Anlagenmanagement
2	Bahn	Schweiz	SBB	Strategisches Anlagenmanagement von Ingenieurbauwerken
3	Straße	Deutschland	Autobahn GmbH – Niederlassung Ost	
4	Straße	Deutschland	LS Brandenburg	Bauwerksmanagement
5	Straße	Deutschland	VM BW	Referat 24
6	Straße	Österreich	ASFiNAG	Asset Management
7	Straße	Schweiz	ASTRA	
8	Wasser	Deutschland	BAW	

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)

Purtak, Möbius

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen

Staeck

€ 15,00

B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

Freundt, Böning, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn

Windmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung

Schreck, Decker, Wawrzyniak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten

Maurer, Wentzek, Hegger, Adam, Rombach, Harter, Zilch, Tecusan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau

Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 183: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brenninger, Zulauf, Locher

€ 18,00

B 184: Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken

Kindl, Stadler, Walther, Bornmann, Freitag

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 185: Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität

Hill, Bahlau, Butenhof, Degener, Klein, Kukushkin, Riedlinger, Oppermann, Lambracht, Mertens

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2023

B 186: Integration der Handlungsanweisungen Spannungsrisskorrosion und Koppelfugen in die Nachrechnungsrichtlinie

Zilch, Kriechbaum, Maurer, Heinrich, Weiher, Runtemund

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 187: Verstärkung des Deckblechs orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen

Friedrich

€ 18,00

B 188: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm

Butz, Rill, Freundt, Böning, Werner, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 189: Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie – Validierung erweiterter Nachweisformate zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken

Fischer, Thoma, Hegger, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 190: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken

Morgenthal, Rau, Hallermann, Schellenberg, Martín-Sanz, Schubert, Kübler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 191: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau

Thewes, Vollmann, Wahl, König, Stepien, Riepe, Weißbrod

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 192: Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur

Lindström, Zulauf, Rothenfluh, Bruns, Brunner, Roth, Caminada, Graf, Dahl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 193: Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke

Empelmann, Javidmehr, Rathgen, Hellenbrand, Ulbricht, Wagner, Kessel, Sietas

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 194: Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken

Taffe, Vonk

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 195: Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2

Geißler, Kraus, Freundt, Böning

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2024

B 196: Zukünftige Entwicklung eines Tools für ein indikatorengestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken

Hajdin, Schiffmann, Blumenfeld, Tanasić

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.


Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen · Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-775-4
<https://doi.org/10.60850/bericht-b196>

www.bast.de