

# **Wirtschaftlichkeits- untersuchungen von Monitoringmaßnahmen**

**Entwicklung eines Konzepts für die  
Analyse von Nutzen und Kosten**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 156**

**bast**

# Wirtschaftlichkeits- untersuchungen von Monitoringmaßnahmen

Entwicklung eines Konzepts für die  
Analyse von Nutzen und Kosten

von

Matthias Schubert  
Michael H. Faber  
Matrisk GmbH, Affoltern a. A. (CH)

Wolfgang Betz  
Daniel Straub  
Eracons GmbH, München

Eileen Niemeier  
Daniel Ziegler  
Christoph Walther  
PTV Group, Karlsruhe

Michal Majka  
ASECon, Wrocław (PL)

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 156

**bast**

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.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

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

## Impressum

### **Bericht zum Forschungsprojekt: 89.0331**

Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen –  
Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten  
von Monitoringmaßnahmen

### **Fachbetreuung**

Iris Hindersmann

### **Referat**

Betonbau

### **Herausgeber**

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

### **Redaktion**

Stabsstelle Presse und 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](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293

ISBN 978-3-95606-531-6

Bergisch Gladbach, Oktober 2020

## Kurzfassung – Abstract

### **Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten von Monitoringmaßnahmen**

Dieser Bericht beschreibt ein Konzept zur Bestimmung des Nutzens von Monitoringüberwachung an Brückenbauwerken.

Infrastrukturbetreiber sind mit alternder Infrastruktur und knappen Ressourcen für Unterhalt und Instandsetzung konfrontiert. Um den Ressourceneinsatz zu optimieren, kann die Entscheidungsfindung bei Unterhalts- und Instandsetzungsfragestellungen durch Monitoring-überwachungen unterstützt werden: dank dem Monitoring stehen bessere Informationen zum Bauwerkzustand und dessen Entwicklung zur Verfügung, die es erlauben Unterhalt und Instandsetzungen optimal zu planen und umzusetzen.

Monitoringmaßnahmen verursachen aber auch Kosten, und es stellt sich die Frage nach der Wirtschaftlichkeit der Monitoringmaßnahmen. Diese Frage ist nicht einfach zu beantworten, weil der Nutzen stark kontextabhängig ist. Folgende Einflussgrößen müssen dabei berücksichtigt werden: die Schädigung der Brücke und deren erwartete zeitliche Entwicklung, die Zuverlässigkeit der Brücke, sämtliche Wirkungen der Brücke auf übergeordnete Systeme (Verkehrssystem, Gesellschaft, Wirtschaft, Umwelt), die Kosten der Instandsetzung und nicht zuletzt die Installations- und Unterhaltskosten des Monitorings.

Das in diesem Forschungsbericht entwickelte Konzept erlaubt es, den Nutzen von Monitoringmaßnahmen in Funktion von diesen Einflussgrößen zu bestimmen. Das Konzept basiert auf der Value of Information Analyse, die ihrerseits auf der Bayes'schen prä-posteriori Entscheidungsanalyse aufbaut. Das Konzept ist praxisnah aufgebaut und berücksichtigt das etablierte Expertenwissen. Das Konzept nutzt das Schwellwertmonitoring und ist allgemein ausgelegt, um breit anwendbar zu sein. Es ist nicht schadensspezifisch, monitoringsystemspezifisch oder brückentypspezifisch. Getroffene Annahmen und Vereinfachungen zielen darauf ab, das Konzept für die Bestimmung des Nutzens bei bestehender Brückenvorschädigung in der Praxis ohne vertiefte Kenntnisse der probabilistischen

Modellierung und der Zuverlässigkeitsrechnung anwendbar zu machen. Dabei wird insbesondere darauf geachtet, welche Informationen dem Entscheidungsträger vor der Installation des Monitoringsystems zur Verfügung stehen und verwendet werden können.

Nach den einleitenden Kapiteln werden in Kapitel 2 die Grundlagen im Rahmen einer Literaturrecherche zusammengestellt. Die Bestimmung der Kosten infolge von Verkehrsbehinderungen hat dabei eine große Bedeutung.

In Kapitel 3 wird die Bayes'sche Entscheidungsfindung und deren Anwendung auf die Nutzenbestimmung von Monitoring erläutert.

In Kapitel 4 wird das Konzept zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen dargestellt. In Kapitel 4 wird auch die Kostenbestimmung infolge von Verkehrsbehinderungen unter Verwendung von Informationen aus einem Verkehrsmodell erklärt.

In Kapitel 5 wird eine Methode dargestellt, mit der sich ohne automatisierte Berechnung im Verkehrsmodell die gesamtwirtschaftlichen Effekte ermitteln lassen.

In Kapitel 6 ist die Umsetzung des Konzepts in einem Microsoft Excel-Tool detailliert beschrieben.

In Kapitel 7 und 8 wird das Konzept und das Excel-Tool auf zwei reale Praxisbeispiele angewendet. Anhand der beiden Beispiele wird exemplarisch die Wirtschaftlichkeit der Monitoringstrategie untersucht. Basierend darauf wird eine Entscheidungsempfehlung für oder gegen die Installation des Monitoringsystems gegeben.

In diesem Forschungsauftrag wurde ein einfach anzuwendendes und praxistaugliches Konzept entwickelt, um den wirtschaftlichen Nutzen von Monitoring zu bestimmen. Abschließend wurden aufgrund der Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt weitere Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten identifiziert.

### **Economic feasibility studies of structural health monitoring – Development of a concept for the analysis of benefits and costs of monitoring measures**

This report describes a concept for determining the benefits of monitoring surveillance on bridge structures.

Infrastructure operators are confronted with ageing infrastructure and scarce resources for maintenance and repair. In order to optimize the use of resources, the decision making process for maintenance and repair issues can be supported by monitoring: thanks to monitoring, better information about the condition of the structure and its development is available, which allows to plan and implement maintenance and repair in an optimal way.

However, monitoring measures also incur costs, and the question arises as to the economic efficiency of the monitoring measures. This question is not easy to answer because the benefits are strongly context-dependent. The following influencing variables must be taken into account: the damage to the bridge and its expected development over time, the reliability of the bridge, all effects of the bridge on superordinate systems (traffic system, society, economy, environment), the costs of repair and, last but not least, the installation and maintenance costs of the monitoring.

The concept developed in this research report makes it possible to determine the benefit of monitoring measures as a function of these parameters. The concept is based on the Value of Information Analysis, which in turn builds on Bayesian pre-posteriori decision analysis. The concept is practically oriented and takes established expert knowledge into account. The concept uses threshold value monitoring and is designed to be broadly applicable. It is not damage specific, monitoring system specific or bridge type specific. Assumptions and simplifications made aim at making the concept applicable for the determination of the benefit in case of existing bridge damage in practice without in-depth knowledge of probabilistic modelling and reliability analysis. Special attention is paid to the information that is available and can be used by the decision maker before the monitoring system is installed.

After the introductory chapters, chapter 2 compiles the basic principles within the framework of a literature search. The determination of the costs

resulting from traffic obstructions is of great importance in this context.

In chapter 3, Bayesian decision making and its application to the benefit determination of monitoring is explained.

Chapter 4 presents the concept for determining the cost-effectiveness of monitoring measures. Chapter 4 also explains how to determine the costs of traffic congestion using information from a traffic model.

Chapter 5 presents a method for determining the macroeconomic effects in the transport model without automated calculation.

Chapter 6 describes in detail how to implement the concept in a Microsoft Excel-Tool.

In chapters 7 and 8 the concept and the Excel-Tool are applied to two real practical examples. Using the two examples, the economic efficiency of the monitoring strategy is examined. Based on this, a decision recommendation for or against the installation of the monitoring system is given.

In this research assignment an easy to use and practical concept was developed to determine the economic benefit of monitoring. Finally, further research and development opportunities were identified based on the findings of this research project.

## Summary

### **Economic feasibility studies of structural health monitoring – Development of a concept for the analysis of benefits and costs of monitoring measures**

Infrastructure operators are confronted with aging infrastructure and scarce resources for maintenance and repair and have a social responsibility to use these resources responsibly and optimally. Monitoring can support the decision-making process and planning of maintenance and repair actions: thanks to monitoring, better information on the condition of the structure is available, allowing maintenance and repairs to be optimally planned and implemented.

However, monitoring measures also generate costs and the question arises as to the cost-effectiveness of the monitoring measures. This question is not easy to answer because the benefit is highly contextual.

The concept and procedure developed in this research work is a tool that should make it possible to assess in which cases it is worthwhile to collect additional information on the structure with the help of a monitoring system. The concept refers to threshold monitoring and is generally applicable. It is not damage specific, monitoring system specific or bridge type specific.

## 1 Introduction

The public discussion about the deterioration of the German road network has intensified in recent years, see [1]. The main reasons identified for the deterioration of the perceived road conditions are an investment backlog at the administrative levels together with high capacity utilization and a lack of resources in the construction sector.

The scarce resources are not sufficient to implement all desirable maintenance and repair measures. It is therefore necessary to prioritize these measures. For this reason, the inspection and monitoring of engineering structures is becoming increasingly important: they allow the condition of the structure to be recorded and monitored. Based on this, economic decisions can be made in bridge

management. Every inspection and monitoring can help improve bridge management, reduce maintenance costs, prioritize actions and extend the life of a structure.

Despite potential benefits, there seems to be some reluctance to invest in monitoring. One understandable reason for this reluctance is that only their costs are known in advance, but their benefits are not. Every decision as to whether and when a monitoring system should be installed raises the question: Does the benefit generated by the monitoring system justify the costs incurred?

### 1.1 Damage and thresholds

A large part of the German road infrastructure is ageing and so are the bridges: 60% of the German bridges on federal highways are more than 35 years old, 20% even more than 50 years old. These are service lives during which the structures can usually still fulfil their function without any problems. However, damage problems are increasingly occurring and maintenance and repair costs are increasing to ensure stability, road safety and durability (see [2]). In addition to the ageing of bridges, changing traffic volumes do also pose challenges. The problem is not necessarily the volume of total traffic, but the proportion of heavy goods vehicles, which has increased disproportionately in recent years, and the weight of registered trucks, which has risen in the last 50 years from 24t to 44t today.

At the superstructure, exposed reinforcement, cracks in the concrete as well as spalling and concrete chipping occur most frequently [3].

A so-called threshold value monitoring system can be used to monitor these damages. In threshold value monitoring, a (damage) condition is observed and, once a threshold value is exceeded, a measure is executed that was usually already defined and determined when the monitoring was planned.

### 1.2 Benefits of monitoring

Monitoring measures provide information on the condition of the monitored bridge structure. The information gained can be used to better understand the current condition and future development of the

condition and, for example, to optimally plan and carry out repairs, see [4].

In recent years, great advances have been made in sensor technology and in data transmission and analysis, so that more and more bridge structures can be monitored. As technology matures, the focus of research and development shifts to the use of collected data. With technical development, the question of the cost-benefit ratio of monitoring measures must be raised more frequently.

In order to achieve the optimal effect with the available budget, the following questions must be answered:

- How can the benefits of monitoring measures be maximized?
- In which cases is the benefit of the measures greater than the costs incurred?
- When and where are monitoring measures (macroeconomically) profitable?

There are no simple answers to these questions because the value of the information is context-dependent. The influencing variables that influence the benefit of monitoring measures are shown in figure 1.

A method based on Bayesian decision theory (Value of Information Concept [4]) is used in this project to determine the economic efficiency of a monitoring measure.

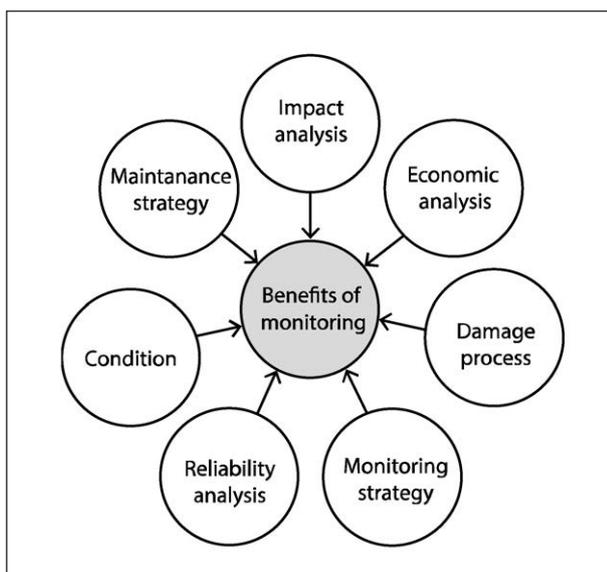


Fig. 1: Influencing factors that must be known in order to determine the benefits of monitoring measures

### 1.3 Risk-based decision-making

The road administrations have the task to ensure the functionality of the infrastructure and to use the resources of the society optimally.

An infrastructure structure is beneficial to society if it meets the following requirements:

- It is economically viable by fulfilling a certain purpose;
- It fulfils specified requirements with regard to the safety of exposed people;
- It meets specified requirements to limit its harmful effects on the environment.

In the light of these requirements, it can be stated that the primary duty of the decision-maker is to take decisions in such a way that they prove useful. The goal of decision-making in engineering is therefore to evaluate and compare decision alternatives in order to identify those that promise the greatest benefit. To enable a comparison between decision alternatives that is as objective as possible, a benefit function (or preference function) must be formulated that allows all costs and benefits to be taken into account according to the preferences of the decision-maker. As such, decision making in engineering is part of normative decision theory. This theory is applied in this project.

### 1.4 Costs of monitoring and consequences

In order to assess the cost-effectiveness of monitoring, the expected costs and failure consequences must be taken into account. In addition to the consequences that arise directly from an event (such as road closure or failure events), consequences that follow indirectly from the event should also be considered. Such consequences can be economic benefits or damages for the national economy, but also for the environment or society in the broader sense. These damages are also referred to as „Follow-up Consequences“ and can be much greater than the direct consequences. In order to be able to aggregate the expected costs of different events and to ensure the comparability of decision alternatives, all consequences are monetized in this project.

## 2 Determination of the economic efficiency of monitoring measures

The concept developed in this study is based on the assumption that the decision as to whether a monitoring system should be installed or not is made with knowledge of the current bridge condition. This means that it is assumed that a condition assessment was carried out shortly before the decision was taken. However, the well-known condition indicator is not used in this concept, but an ordinal scale that evaluates the structure. The introduction of an ordinal scale is necessary as the condition indicator is not fully transferable to the damage state and is generally broader. In addition, damage models are (so far) not always available in practice and modelling with the available information at the time of decision is not always possible. The ordinal scale is referred to in the concept as the threshold value group and represents the condition of the component (see figure 2).

It is also assumed that only a single bridge component is monitored. Local monitoring allows the condition of a component to be recorded directly without having to model the complex system behavior of the bridge structure in detail [9].

The benefit of monitoring results from the comparison of the expected costs from operation for „case 0: with monitoring“ with the expected costs for „case 1: no monitoring“.

Specifically, the following decision alternatives are available:

- $a_0$ : No monitoring system is installed; maintenance and repair measures are carried out according to current practice.

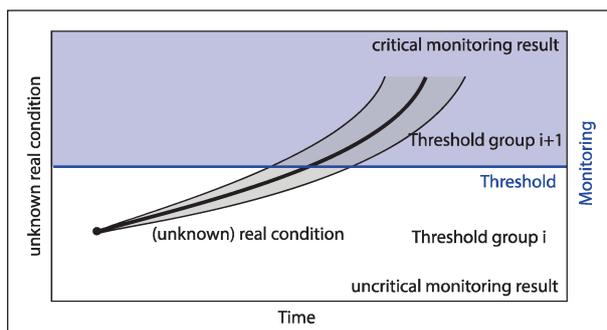


Fig. 2: Schematic representation of the threshold value monitoring and the threshold value groups

- $a_1$ : A monitoring system is installed; maintenance and repair measures are selected according to the state development.

This problem can be approached with Bayesian decision making, using a pre-posteriori decision analysis. For both decision alternatives, the expected costs are determined, discounted so that the benefits of monitoring can be determined as follows:

$$Vol = npv(a_0) - npv(a_1) \quad \text{Eq. 1}$$

Figure 3 shows the proposed concept. It is based on three main simplifications.

First, the maintenance and repair decisions are not optimized. It is assumed that experts can recommend a maintenance and repair strategy for a given component condition that will enable safe operation of the bridge structure at all times.

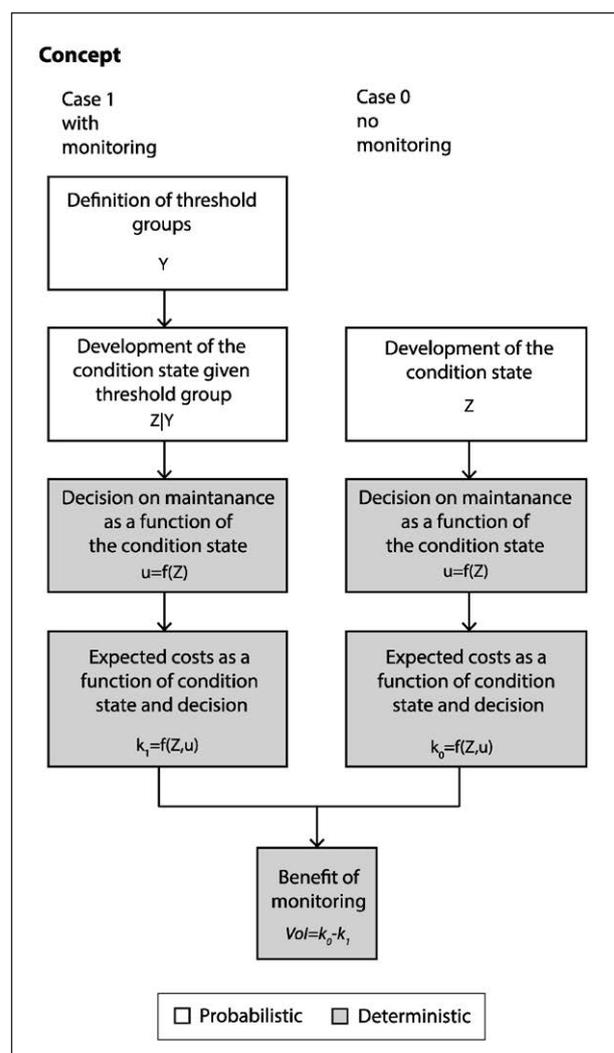


Fig. 3: Illustration of the proposed concept

This simplification is justified for the following reasons:

- The present concept assumes a threshold monitoring. Thresholds make sense if they are directly linked to actions: if a new component condition is reached, a maintenance and repair strategy is automatically triggered.
- The procedure corresponds to current practice, in which decisions on maintenance and repair strategies are made on the basis of the observed condition. The existing expert knowledge can thus be directly transferred and applied.

When the goal is to identify an optimal maintenance and repair strategy that minimizes life cycle costs, the issue is more complex and a very large number of decision alternatives must be formulated and compared.

The second simplification is that the costs are determined deterministically as a mean value. This is necessary because comprehensive impact analysis is generally too complex and computationally complex to be considered probabilistically. This assumption has no impact on the results, as the costs are included in the model on a linear basis. It is therefore sufficient to do the calculations with the expected value of the costs.

A third simplification concerns the modelling of structural reliability. In the proposed concept it is assumed that the monitored component is decisive for the safety of the overall structure and thus for the maintenance and repair strategy. Nevertheless, the consideration of the bridge structure is still relevant, but the reliability of the structure is only estimated in the event that the monitored component fails. This implies that probability of failure of other components is negligible and therefore would not influence the decision made.

These three simplifications greatly reduce complexity and modeling and enable direct use in practice.

In addition to the costs for the installation and operation of the monitoring system, as well as costs resulting from the failure of a supporting structure, the overall economic costs must also be determined. The following seven categories are used for this purpose: Operating costs, travel times, road safety, noise, air pollution, climate protection and accessibility.

The first six measures or indicators can be monetized and thus be fed into a cost-benefit analysis. Accessibility illustrates the effects of reduced infrastructure capacities in a complementary but direct way. It is added to the cost-benefit ratio as a variable.

### 3 Implementation of the concept in an Excel-Tool

The concept was implemented in a Microsoft Excel-Tool with VBA macros in order to make it easy and quick to use in practice.

The tool simulates the case „with monitoring“ and the case „without monitoring“ and calculates the expected costs of both decision options (see figure 3). By comparing these expected costs, a decision can be made for or against the use of a specific monitoring system.

Based on the described probabilistic models „with“ and „without monitoring“ the expected values of the costs are calculated. A Monte Carlo Simulation (MCS) is used for this purpose. The MCS is a numerical simulation method in which a relatively large number of different realizations of the damage development are simulated [5]. A realization is a possible future development of the state. With the MCS, the expected values sought are estimated correctly on average, but the estimated values are subject to statistical uncertainty. The greater the number of realizations generated, the smaller the statistical uncertainty of the estimated expected values.

## 4 Examples

### 4.1 Schwelmetal bridge

The Schwelmetal bridge is located on the A1 motorway near the Wuppertal-Langerfeld junction (AS) at exit 93. The bridge was built in 1960 as a prestressed concrete bridge with a beam/slab mixing system. The bridge crosses the federal road B7, a municipal road (Dieselstraße), five electrified tracks of the Deutsche Bahn and a river, the Schwelme. Originally the Schwelmetal bridge consisted of 2 parallel separate superstructures. Each partial structure has a width of 15.45 m and

the bridge a total length of 207.5 m. The bridge is designed as three field girders [7]. In 2006, the bridge was extended with two external steel composite bridges.

In the years prior to 2013, pronounced crack formation was observed in the webs and base plate of the hollow boxes. Among other things, cracks were observed in the webs in the support and abutment area and semicircular cracks in the base plate in the middle fields.

The reasons for this are that the overlap of the tendons is very small and no back-suspension reinforcement or increased shear reinforcement in the webs is installed [7].

A decision had to be made as to how the bridge could be safely operated until the new construction of the bridge without alternative was realized. The possibility of a permanent repair is not possible efficiently.

The general decision-making situation can be described as follows:

- a) Complete closure of the partial structures without reinforcement before the construction of the replacement bridge.
- b) Reinforcement of a partial structure and monitoring and subsequent use until the new bridge is constructed.

It could be shown that monitoring is economical if the probability of exceeding the threshold value is small and the decision-makers are certain that interference-free operation after amplification is possible. In this case it is economical to install the monitoring system.

## 4.2 Highway bridge in Duisburg-Beeck

The second application example is a motorway bridge in Duisburg-Beeck. The bridge was built in 1980 as a two-part concrete hollow box over 5 fields. The motorway bridge has a total area of 2,411 m<sup>2</sup> [8].

The bridge was built in 3 stages. In the sections, all tendons were fully pushed and corresponding tendon couplings were inserted. In the coupling joint, the prestressing forces are entered as a concentrated load via the tendon couplings.

In 2014, a subsequent calculation was carried out. It was not possible to provide proof of the load-bearing capacity without reinforcements. Due to the special geometry of the bridge, it was only possible to apply an additional external preload of max. 18 MN. In spite of this additional external prestressing, it was not possible to provide the normative proof for the required bridge class. This means that a permit is required in each individual case for large capacity and heavy transport vehicles travelling on the bridge.

If the proof cannot be furnished, there is no alternative to the new construction of the bridge. The verification shall be made using the information from the monitoring, i.e. if no fatigue relevant stress fluctuations in the structure are measured, the bridge can be approved for the required bridge class.

The following decision situation arises from this situation:

- a) No monitoring – new construction of the bridge in compliance with the guidelines.
- b) Monitoring – reinforcement of the bridge and repair with the use of a monitoring system.

In this example the profitability of a monitoring system is clearly given. Even if the monitoring system had observed a critical condition with a probability of 60% per month, it would still be economical to install the monitoring system.

## 5 Conclusions

To date, there have been no methods and tools that are generally used in practice to assess the cost-effectiveness of monitoring measures. In this research project a step in this direction was made and a method, a concept and a tool were developed, which make this possible for the threshold value monitoring.

The method was applied to two examples and the determination of the cost-effectiveness of monitoring using the Excel-Tool was successfully demonstrated.

Both examples differ with regard to the question and the results. In the case of the Schwelmetal bridge, the decision-makers must be very sure that the monitoring system does not show any critical condition, while the installation of the Duisburg-

Beeck bridge would have been worthwhile if there had been a high probability that the monitoring would not be successful. This result is not intuitive and shows the relevance of careful analysis of economic viability. The analyses have also shown that the macroeconomic cost savings through the assessment of economic efficiency are significant.

## References

- [1] Deutscher Bundestag Drucksache (2011): 17/5325. „Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Uwe Beckmeyer, Sören Bartol, Martin Burkert, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD“, Drucksache 17/4908, Zustand von Brücken im Zuge von Bundesfernstraßen in Deutschland
- [2] BMVBS (2013): „Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten“, Dokumentation 2013, Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Referat StB 17
- [3] SCHNELLENBACH-HELD M., PEETERS M., MIEDZINSKI G. (2015): „Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton“, Intelligente Brücke, BAST, Bergisch Gladbach
- [4] STRAUB D. (2013): „Value of Information Analysis with Structural Reliability Methods“, Structural Safety
- [5] KROESE D. P., TAIMRE T., BOTEV Z. I. (2011): „Handbook of Monte Carlo Methods“, Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley and Sons, New York
- [6] FABER M. H. (2012): „Statistics and Probability Theory, In Pursuit of Engineering Decision Support“, Springer Netherlands
- [7] BUSCHLINGER M., JAROSCH A. (2016): „Verstärkung von Brücken mit externer Vorspannung – Einsatzbereiche und Randbedingungen“, 26. Dresdener Brückensymposium, Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken
- [8] Straßen.NRW (2018): „Bauwerksbuch nach DIN 1076 für das Bauwerk 4506990, A42/L287, AS Duisburg-Beeck Teilbauwerk 2“, Druck vom 09.07.2018
- [9] FREUNDT U., VOGT R., BÖNING S., MICHAEL D. (2014): „Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken“, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 106, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST

## Inhalt

<b>Abkürzungen</b> .....	15	2.10.1	Verbundprojekt SKRIBT – Schutz kritischer Brücken und Tunnel, verkehrsbezogene Objektanalyse [144] .....	31
<b>1 Einleitung</b> .....	17	2.10.2	Verbundprojekt SRIBT <sup>Plus</sup> – Schutz kritischer Brücken und Tunnel – AP 6 Modellsystem Wirksamkeiten – Kritikalitätsverfahren [145] .....	32
1.1 Erreichte Ziele .....	17	2.10.3	Verbundprojekt SKRIBT <sup>Plus</sup> – Schutz kritischer Brücken und Tunnel – Erweitertes Identifizierungsverfahren [146] .....	34
1.2 Identifizierte weitere Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten .....	17	2.10.4	Methodik für eine optimierte Planung von Ertüchtigungen und/ oder Ersatz wichtiger Brücken [147] .....	37
<b>2 Literaturrecherche</b> .....	18	2.10.5	Informationen über Alternativrouten als Grundlage für objektbezogene Bewertungsverfahren im BMS [148] .....	39
2.1 Überblick .....	18	2.10.6	Optimierungsstrategie zur Priorisierung voneinander abhängiger Bauprojekte von Straßen- und Ingenieurbauwerken [149] .....	40
2.2 Brückenbestand .....	18	2.10.7	RI-WI-BRÜ – Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken [124] .....	42
2.2.1 Altersstruktur .....	18	2.10.8	Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030 für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [126] .....	42
2.2.2 Bauwerkslänge .....	19	2.10.9	Reliability-based assessment procedures for existing concrete structures structural engineering [136] .....	44
2.2.3 Schädigungen .....	19	2.10.10	Prioritization of bridges and tunnels in earthquake risk mitigation using multicriteria decision analysis [122] .....	45
2.2.4 Zustandsnoten .....	19			
2.3 Grundsatz Nutzenbestimmung von Monitoring .....	20			
2.4 Systemmodellierung .....	20			
2.5 Risiko im Ingenieurwesen .....	21			
2.6 Grundlagen der Wahrscheinlichkeitslehre .....	22			
2.6.1 Bayes'sches Theorem und Bayes'sches Aktualisieren .....	24			
2.7 Grundlage Konsequenzen .....	24			
2.8 Risikobasierte Entscheidungsfindung im Ingenieurwesen .....	25			
2.8.1 Entscheidungsalternativen und Nutzenfunktion .....	25			
2.8.2 Entscheidungsprobleme .....	26			
2.9 Probabilistische Modelle .....	26			
2.9.1 Zuverlässigkeitsanalyse .....	26			
2.9.2 Methoden zur Berechnung der Zuverlässigkeit .....	27			
2.9.3 Schädigungsprozesse .....	29			
2.9.4 Markov-Kette-Modell für die Zustandsentwicklung .....	29			
2.10 Wirkungs- und Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	30			

2.10.11	Life-cycle cost-benefit (LCCB) analysis of bridges from a user and social point of view [142]. . . . .	46	3.2.5	Entscheidungsanalyse mit zusätzlicher Information – a-posteriori Analyse. . . . .	63
2.10.12	Status of the nation's highways, bridges, and transit – conditions & performance [155] . . . . .	47	3.2.6	Entscheidungsanalyse mit „unbekannter“ Information – Prä-posteriori Analyse . . . . .	65
2.11	Messung sozio-ökonomischer Wirkungen in der Bewertung von Verkehrsprojekten und -maßnahmen . . . . .	48	3.2.7	Value of Information . . . . .	66
2.11.1	Behandlung sozialer Wirkungen in Verkehrsprojekten im internationalen Vergleich – Literatur- und Bestandsanalyse . . . . .	48	3.3	Modellierung von Monitoring . . . . .	66
2.11.2	Definition von Social Impacts im Verkehrswesen. . . . .	48	<b>4</b>	<b>Konzept zur Bestimmung des Nutzens von Monitoring . . . . .</b>	<b>70</b>
2.11.3	Sozio-ökonomische Wirkungen in unterschiedlichen Bewertungsleitfäden für Verkehrsprojekte . . . . .	50	4.1	Einleitung . . . . .	70
2.11.4	Zusammenfassung der sozio-ökonomischen Wirkungen aus den betrachteten Bewertungsleitfäden. . . . .	53	4.1.1	Ausgangslage. . . . .	71
2.12	Monitoring . . . . .	53	4.2	Übersicht über das Konzept. . . . .	71
2.12.1	Rissüberwachung. . . . .	56	4.2.1	Formulierung des Entscheidungsproblems. . . . .	71
2.12.2	Korrosionsüberwachung . . . . .	58	4.2.2	Modellierungsansatz . . . . .	72
2.12.3	Überwachung von Brückenlagern . . . . .	60	4.2.3	Systemebenen . . . . .	74
2.12.4	Mathematische Modellierung von Monitoring . . . . .	60	4.2.4	Erwartete Kosten . . . . .	74
<b>3</b>	<b>Bayes'sche Entscheidungstheorie in Bezug auf den Nutzen von Monitoringmaßnahmen . . . . .</b>	<b>60</b>	4.2.5	Abgrenzung . . . . .	<b>77</b>
3.1	Einleitung . . . . .	60	4.3	Zustandserfassung. . . . .	77
3.2	Bayes'sche Entscheidungsanalysen. . . . .	61	4.4	Zustandsentwicklung und Schwellwertmodellierung . . . . .	78
3.2.1	Der Entscheidungs-/Ereignis-Baum . . . . .	61	4.4.1	Schadenindikator . . . . .	80
3.2.2	Entscheidungen aufgrund von Erwartungswerten . . . . .	62	4.4.2	Likelihood Funktion . . . . .	80
3.2.3	Entscheidungsfindung unter Unsicherheit . . . . .	63	4.5	Monitoringmaßnahmen . . . . .	82
3.2.4	Entscheidungsanalyse bei bekannter Information – a-priori Analyse . . . . .	63	4.6	Versagenswahrscheinlichkeit des Brückenbauwerks. . . . .	83
			4.7	Unterhalts- und Instandsetzungsstrategien . . . . .	84
			4.8	Verkehrsbetriebsszenarien. . . . .	86
			4.8.1	Verknüpfung Verkehrsbetriebsszenario mit Bauteilzustand und Maßnahmen . . . . .	86
			4.9	Konsequenzen für sämtliche Wirkungsspektren/sozio-ökonomische Wirkungen zur Messung gesamtwirtschaftlicher Kosten . . . . .	87
			4.9.1	Betriebskosten . . . . .	87
			4.9.2	Reisezeit. . . . .	88
			4.9.3	Verkehrssicherheit . . . . .	89
			4.9.4	Lärm . . . . .	91

4.9.5	Luftverschmutzung und Klimaschutz . . .	92	6.2.3	Registerkarte „Parameter“ . . . . .	107
4.9.6	Erreichbarkeit . . . . .	93	6.2.4	Registerkarte „Indikatormodell“ . . . . .	108
4.9.7	Kosten für ein gegebenes Verkehrs- betriebsszenario . . . . .	94	6.2.5	Registerkarte „Verkehrsbetriebs- szenario“ . . . . .	108
4.10	Erwartete Kosten . . . . .	95	6.2.6	Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ . . .	109
<b>5</b>	<b>Konzept zur Ermittlung gesamt- wirtschaftlicher Effekte ohne automatisierte Berechnung im Verkehrsmodell. . . . .</b>	<b>95</b>	6.2.7	Registerkarte „Schwellwertgruppe“ . . .	111
5.1	Ermittlung der Pkw- und Schwerver- kehrfahrleistungen sowie der Fahr- zeuganteile . . . . .	96	6.2.8	Registerkarte „Allgemeines“ . . . . .	112
5.2	BVWP- und HBEFA-Streckentypen . . .	96	6.2.9	Registerkarte „Ergebnisse“ . . . . .	114
5.3	Ermittlung des Verkehrszustands und Auslastungsgrad . . . . .	99	6.3	Berechnung der Erwartungswerte der Kosten im Excel-Tool . . . . .	115
5.4	Bestimmung der DTV-Anteile nach Tagesstunden . . . . .	99	6.4	Systemvoraussetzungen . . . . .	115
5.4.1	Beispielhafte Erstellung von Tages- ganglinien und Berechnung des Auslastungsgrads <i>ag</i> . . . . .	100	<b>7</b>	<b>Anwendungsbeispiel Schwel- metalbrücke . . . . .</b>	<b>116</b>
5.4.2	Umrechnungsfaktoren von DTVw auf DTV . . . . .	102	7.1	Schädigungen und Abweichungen von der Norm . . . . .	117
5.5	Zuordnung der Emissions- und Kraftstoffverbrauchsfaktoren je Straßentyp, Verkehrszustand und Fahrzeugart . . . . .	102	7.2	Entscheidungssituation . . . . .	117
5.6	Berechnung verschiedener gesamt- wirtschaftlicher Indikatoren . . . . .	102	7.2.1	Entscheidungssituation – Kein Monitoring, Sperrung der Teilbau- werke 2 und 3 für den Verkehr . . . . .	117
5.6.1	Betriebskosten . . . . .	102	7.2.2	Entscheidungssituation – Verstärkung und Monitoring . . . . .	119
5.6.2	Reisezeit . . . . .	103	7.3	Bautechnische Kosten und Monitoringkosten . . . . .	120
5.6.3	Unfallkosten . . . . .	103	7.4	Volkswirtschaftliche Kosten aus Verkehrseinschränkungen . . . . .	121
5.6.4	Luftverschmutzungs- und Klima- kosten . . . . .	103	7.4.1	Datengrundlage: Verkehrsmodell PTV Visum . . . . .	121
5.6.5	Lärm . . . . .	103	7.4.2	Operationalisierung der identifizier- ten Maßnahmen als Szenarien im Verkehrsmodell . . . . .	122
<b>6</b>	<b>Umsetzung des Konzepts zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen in einem Excel-Tool . . . . .</b>	<b>104</b>	7.4.3	Berechnung der gesamtwirtschaft- lichen Kosten unterschiedlicher Szenarien . . . . .	123
6.2	Beschreibung der Eingaben und Registerkarten im Exceltool . . . . .	106	7.4.4	Ergebnisse des Verkehrsmodells für die Schwelmetalbrücke . . . . .	128
6.2.1	Registerkarten im Excel-Tool . . . . .	106	7.4.5	Veränderungen der Erreichbarkeiten . . .	130
6.2.2	Registerkarte „Einstellungen“ . . . . .	106	7.4.6	Interpretation der Ergebnisse der indirekten Kosten für die Schwel- metalbrücke . . . . .	132
			7.5	Beschreibung des eingesetzten Monitoringsystems an der Schwel- metalbrücke . . . . .	132

7.6	Berechnungen unter Verwendung des Excel-Tools . . . . .	133	8.6.3	Registerkarte „Verkehrsbetriebs- szenario“ . . . . .	151
7.6.1	Registerkarte „Einstellungen“ . . . . .	133	8.6.4	Registerkarte „Schwellenwert- gruppe“ . . . . .	151
7.6.2	Registerkarte „Parameter“ . . . . .	133	8.6.5	Registerkarte „Indikatormodell“ . . . . .	152
7.6.3	Registerkarte „Verkehrsbetriebs- szenario“ . . . . .	133	8.6.6	Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ . . . . .	153
7.6.4	Registerkarte „Schwellenwert- gruppe“ . . . . .	134	8.6.7	Registerkarte „Allgemeines“ . . . . .	154
7.6.5	Registerkarte „Indikatormodell“ . . . . .	135	8.7	Ergebnis und Diskussion . . . . .	155
7.6.6	Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ . . . . .	136	<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen</b> . . . . .	156
7.6.7	Registerkarte „Allgemeines“ . . . . .	137		<b>Literatur</b> . . . . .	157
7.7	Ergebnis und Diskussion . . . . .	138		<b>Bilder</b> . . . . .	168
<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiel Autobahn- brücke Duisburg-Beeck</b> . . . . .	140		<b>Tabellen</b> . . . . .	171
8.1	Verkehr und Verkehrsführung . . . . .	142		<b>Anhang</b> . . . . .	174
8.2	Schädigungen und Abweichungen von der Norm . . . . .	142			
8.3	Entscheidungssituation . . . . .	142			
8.3.1	Entscheidungssituation – kein Monitoring, Neubau der Brücke . . . . .	143			
8.3.2	Entscheidungssituation – Monitoring . . . . .	144			
8.3.3	Bautechnische Kosten und Monitoringkosten . . . . .	146			
8.4	Volkswirtschaftliche Kosten aus Verkehrseinschränkungen . . . . .	146			
8.4.1	Datengrundlage: Verkehrsmodell PTV Visum . . . . .	146			
8.4.2	Operationalisierung der identifizierten Maßnahmen als Szenarien im Verkehrsmodell. . . . .	146			
8.4.3	Berechnung der gesamtwirtschaft- lichen Kosten unterschiedlicher Szenarien . . . . .	146			
8.4.4	Ergebnisse des Verkehrsmodells für die Brücke in Duisburg-Beeck. . . . .	147			
8.4.5	Veränderungen der Erreichbarkeiten . . . . .	149			
8.5	Monitoring . . . . .	150			
8.6	Berechnungen unter Verwendung des Excel-Tools . . . . .	150			
8.6.1	Registerkarte „Einstellungen“ . . . . .	151			
8.6.2	Registerkarte „Parameter“ . . . . .	151			

## Abkürzungen

ag	Auslastungsgrad	HVA B-StB	Handbuch für die Vergabe und Ausführung von Bauleistungen im Straßen- und Brückenbau
AE	Akustische Emissionsmethoden		
AS	Autobahnanschluss	IGVP	Integrierten Gesamtverkehrsplanung
BHO	Bundeshaushaltsordnung	K	Kosten
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz	L <sub>Day</sub>	Tagespegel
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung	L <sub>DEN</sub>	Mittelungspegel
BK 45	Brückenklasse 45	L <sub>Evening</sub>	Abendpegel
BK 60	Brückenklasse 60	LN	Leichte Nutzfahrzeuge
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	L <sub>Night</sub>	Nachtpegel
BMS	Bauwerk-Management-System	LS	Lastkraftwagen ohne Anhänger
BVWP	Bundesverkehrswegeplanung	LVDT	Linear Variable Displacement Transducers
CEQA	California Environmental Quality Act	ME	Monetäre Einheiten
CIA	Community Impact Assessment	MEMS	Mikroelektromechanische Systeme
DTV	Durchschnittlicher Täglicher Verkehr	mM	mit Monitoring
DTVw	Durchschnittlicher Täglicher Verkehr, Werktag	NBIAS	National Bridge Investment Analysis System
EIA	Environmental Impact Assessment	oM	ohne Monitoring
EU	Europäische Union	P	Personen
FDOT	Florida Department of Transportation	PD	Pkw mit Dieselmotor
FORM	First Order Reliability Method	PE und PG	Pkw mit sonstigen Motoren
FOS	Faseroptische Sensoren	PFA	Probability of False Alarm
FTA	Federal Transport Administration	PO	Pkw mit Ottomotor
Fz	Fahrzeug	PoD	Probability of Detection
GGK	Gemittelte Gesamt-Kritikalität	POI	Point of Interest
GPR	Bodenradar	R	Widerstand
GPS	Global Positioning System	RC	Stahlbeton
GW	GuidedWave	RI-WI-BRÜ	Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/ Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren		
HERS	Highway Economic Requirements System		

ROC	Receiver Operator Characteristics
S	Einwirkung
SHM	Structural Health Monitoring
SORM	Second Order Reliability Method
TERM	Transit Economic Requirements Model
TPL	Office of Planning
UAV	Unbemanntes Luftfahrzeug
UBA	Umweltbundesamt
US	Ultraschalltechnische Verfahren
VBA	Visual Basic
VBS	Verkehrsbetriebsszenario
Vol	Value of Information
VP	Verkehrsprognose
WIM	Weigh in Motion
zGG	zulässiges Gesamtgewicht
ZL	Lastkraftwagen mit Anhänger
ZS	Sattelzug mit Auflieger

## 1 Einleitung

Die öffentliche Diskussion über eine Verschlechterung des Zustands des deutschen Straßennetzes hat sich in den letzten Jahren zunehmend intensiviert, siehe z. B. [1]. Als Hauptgründe für die Verschlechterungen des wahrgenommenen Straßenzustands wird ein Investitionsstau auf den Verwaltungsebenen identifiziert zusammen mit einer hohen Auslastung und fehlenden Ressourcen im Bausektor.

Die knappen Ressourcen reichen nicht, um alle wünschenswerten Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen umzusetzen. Es ist deshalb eine Priorisierung der Maßnahmen notwendig. Aus diesem Grund kommt der Inspektion und dem Monitoring von Ingenieurbauwerken eine immer größere Bedeutung zu: Sie erlauben es, den Zustand des Bauwerks zu erfassen und zu überwachen. Darauf aufbauend können wirtschaftliche Entscheidungen im Brückenmanagement getroffen werden. Jede Inspektion und jedes Monitoring kann helfen, das Brückenmanagement zu verbessern, Unterhaltskosten zu reduzieren, Maßnahmen zu priorisieren und die Lebenszeit eines Bauwerks zu verlängern.

Trotz potenziell großem Nutzen, scheint eine gewisse Reluktanz bei der Investition in Monitoringmaßnahmen vorhanden zu sein. Ein Grund für diese Reluktanz ist, dass vorab nur die Kosten bekannt sind, deren Nutzen jedoch nicht. Denn bei jeder Entscheidung, ob und wann eine Überwachung installiert werden soll, stellt sich die Frage, rechtfertigt der Nutzen, der durch das Monitoring entsteht, die anfallenden Kosten?

In diesem Forschungsprojekt wird ein Konzept entwickelt, das diese Fragestellung beantwortet.

### 1.1 Erreichte Ziele

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen gibt es bisher noch keine Methoden und Tools, die allgemein in der Praxis angewendet werden. In diesem Forschungsprojekt wurde ein Schritt in diese Richtung gemacht und eine Methode, ein Konzept und ein Werkzeug entwickelt, die dies für das Schwellwertmonitoring ermöglichen.

Um dies zu erreichen, wurden aus der komplexen Modellierung heraus Vereinfachungen entwickelt und hergeleitet, die die in der Praxis vorliegenden Randbedingungen und die vorhandenen Informationen und Modelle in der Praxis berücksichtigen.

An zwei Beispielen wurde die Methode angewendet und die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Monitoring unter Verwendung des Excel-Tools erfolgreich gezeigt.

Zudem wurde weiterer Forschungsbedarf identifiziert, der im folgenden Kapitel kurz zusammengestellt wird.

### 1.2 Identifizierte weitere Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten

Das im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Excel-Tool zur Anwendung des Projektes ist ein Prototyp. Es wird als wesentlich erachtet, dass es an weiteren Praxisbeispielen angewendet wird und Erfahrungen gesammelt werden und ggfs. Weiterentwicklungen erfolgen. Im Rahmen der erweiterten Praxisanwendung sollte auch die vereinfachte Kostenschätzung in Bezug auf die indirekten Kosten angewendet und mit dem Verkehrsmodell validiert werden.

Es wäre theoretisch möglich, die hier entwickelte Methodik in das allgemeine Bauwerksmanagementsystem (BMS) einzubinden. Hierfür sind Schnittstellen und Einbindungsmöglichkeiten zu identifizieren.

Das entwickelte Konzept kann auf andere Bereiche, wie z. B. das Lastmonitoring (z. B. Weigh in Motion) übertragen werden. Hierfür sind weitere Entwicklungen notwendig.

Im vorliegenden Konzept wurde die Wirtschaftlichkeit einer vorgegebenen Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie untersucht. Grundsätzlich kann mithilfe der Bayes'schen Entscheidungsfindung auch eine optimale Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie, welche die Life-Cycle-Kosten minimiert, identifiziert werden. Die damit einhergehende Analyse ist deutlich komplexer, als das hier entwickelte Konzept, jedoch durch eine klare Eingrenzung der Problemstellung umsetzbar. Dies würde beispielsweise ermöglichen, für ein Rissmonitoring diejenige Rissgröße zu bestimmen, ab welcher der Beginn von Instandsetzungsarbeiten wirtschaftlich ist. Hierzu ist ein Schädigungsmodell für die Rissaufweitung zu formulieren und die Konsequenzen sind in Abhängigkeit von der Rissgröße zu formulieren.

Im Konzept mussten Vereinfachungen in Bezug auf die Schadensmodelle gemacht werden, da in der Praxis kaum Schadensmodelle vorhanden sind. Aus den Daten von Bauwerksprüfungen könnten

solche Modelle abgeleitet werden. Dabei stellt sich die Frage, wie und welche Daten gesammelt werden müssten, um zukünftige Schadensmodelle zu entwickeln. Auch könnte untersucht werden, wie aus bereits vorhandenen Daten Schädigungsmodelle abgeleitet werden könnten.

Des Weiteren ist es möglich das Konzept für präventives Monitoring weiterzuentwickeln. Der Nutzen liegt darin, Informationen über das Verhalten eines Bauwerkstyps (oder eines spezifischen Elementes – z. B. in einem Tunnel, Brückenpfeiler, -lager) zu sammeln und analysieren, sodass diese für andere Bauwerkstypen hilfreich sein können.

Es hat sich gezeigt, dass es insgesamt für die Anwendbarkeit des Verfahrens in der Praxis hilfreich wäre, wenn für die Bestimmung der indirekten Kosten ein vereinfachtes Verfahren entwickelt werden würde. Eine Vereinfachung geht immer mit einer Zunahme der Ungenauigkeit im Ergebnis einher. Diese ist akzeptabel solange die Ungenauigkeit nicht die generelle Entscheidung beeinflusst. Hierzu besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

## 2 Literaturrecherche

### 2.1 Überblick

Die Literaturrecherche deckt die Breite der Themen ab, die zur Bestimmung des Nutzens von Monitoring notwendig sind. Kapitel 2.2 befasst sich mit dem Brückenbestand der Deutschen Bundesfernstraßen. In Kapitel 2.3 werden die Grundlagen für die Nutzenbestimmung von Monitoringsystemen beschrieben. In Kapitel 2.4 werden die Grundlagen der Systemmodellierung bei Ingenieur-Fragestellungen abgedeckt. In Kapitel 2.5 wird auf das Verständnis und die Modellierung von Risiko im Ingenieurwesen eingegangen. Darauf aufbauend wird in den Kapiteln 2.6 und 2.7 die Grundlagen für die Wahrscheinlichkeitsmodellierung und Konsequenzmodellierung beschrieben, die zur Risikoberechnung notwendig sind. Wie das ermittelte Risiko zur Entscheidungsfindung verwendet werden kann, ist in Kapitel 2.8 dargelegt. Die probabilistischen Modelle, um den Zustand und die Versagenswahrscheinlichkeit von Bauwerken zu beschreiben, sind in Kapitel 2.9 gegeben. In den Kapiteln 2.10 und 2.11 wird auf die Wirkungsanalyse eingegangen, das heißt die Bestimmung der Konsequenzen von

Verkehrsbehinderungen in Bezug auf unterschiedliche Wirkungsspektren wird erläutert. Die Literaturrecherche wird mit Kapitel 2.12 abgeschlossen, in dem ein Überblick über Monitoringmethoden und -technologien gegeben wird.

Auf das Thema der Bayes'schen Entscheidungsfindung und die damit verbundene mathematische Modellierung von Monitoring wird in Kapitel 3.2 respektive 3.3 eingegangen.

### 2.2 Brückenbestand

Ein Großteil der Deutschen Straßeninfrastruktur kommt in die Jahre und so auch der Brückenbestand: 60 % der Deutschen Brückenbauwerke auf Bundesfernstraßen sind über 35 Jahre alt, 20 % sogar über 50 Jahren. Dies sind Standzeiten bei denen die Bauwerke i. d. R. ihre Funktion noch problemlos erfüllen können. Jedoch treten vermehrt Schädigungen auf und der Unterhalt- und Instandsetzungsaufwand, um Stand-, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, nimmt zu [2]. Neben der Brückenalterung stellt die Veränderung des Verkehrsaufkommens eine Herausforderung dar. Wobei nicht unbedingt die Menge des Gesamtverkehrs problematisch ist, sondern der Anteil des Schwerverkehrs der in den letzten Jahren überproportional zugenommen hat und das Gewicht der zugelassenen Lkw, welches in den letzten 50 Jahren von 24 t auf heute 44 t gestiegen ist.

Der Brückenbestand auf deutschen Bundesfernstraßen wird in [3] beschrieben; die nachfolgende Zusammenfassung basiert auf diesem Dokument. Der Bestand wird darin nach den Merkmalen Brückenklasse, Alter, Bauwerkslänge, Schädigungen und Zustandsnote untersucht.

#### 2.2.1 Altersstruktur

Die Altersstruktur der Brücken auf deutschen Bundesfernstraßen zeigt, dass der Brückenbestand seit den 60er Jahren stetig zugenommen hat (Bild 1). Der Höhepunkt der Bautätigkeit wurde zwischen 1970 und 1975 erreicht und nahm bis zur Wiedervereinigung im Jahr 1990 stetig ab. Nach einem kurzzeitigen Anstieg, nimmt die Anzahl neugebauten Brücken wieder ab, da der Ausbau des Verkehrsnetzes in ganz Deutschland mittlerweile nahezu abgeschlossen ist.

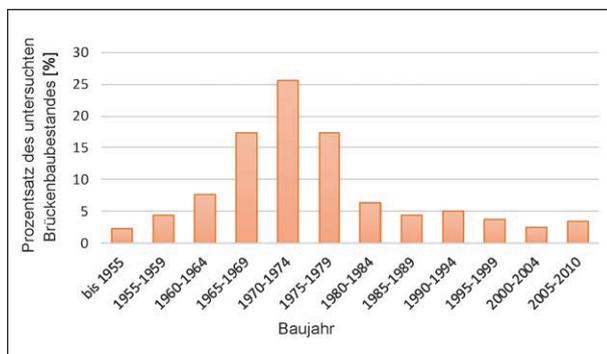


Bild 1: Altersstruktur der Brückenbauwerke im deutschen Bundesfernstraßennetz [3]

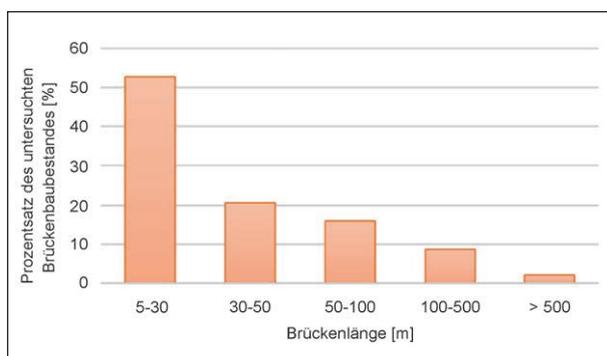


Bild 2: Brückenlängen der Brückenbauwerke im Deutschen Bundesfernstraßennetz [3]

### 2.2.2 Bauwerkslänge

Die Verteilung der Brückenlängen im Gesamtbestand zeigt, dass die meisten Brücken eine Gesamtlänge zwischen 5 m und 30 m haben (Bild 2). Der Anteil dieser Brücken beträgt etwa 53 % am untersuchten Bestand. Im Gegensatz dazu ist der Anteil von Großbrücken mit einer Gesamtlänge über 100 m mit gut 10 % relativ gering. Wichtig ist hier jedoch ebenfalls eine Einordnung bezüglich Brückenflächen: Hier beträgt der Anteil von Brücken mit einer Gesamtlänge zwischen 5 m und 30 m nur etwa 11 % und die relativ seltenen Brücken mit Längen über 100 m haben mit 64 % den größten Anteil an der Brückenfläche.

### 2.2.3 Schädigungen

In [3] werden die Schädigungen an 1.312 Brücken untersucht, diese nach Schadenstyp kategorisiert und die Häufigkeit nach Bauteil und Brückentypen erfasst. Die untersuchten Brücken entsprechen 4 % des deutschen Bundesschnellstraßen Brückenbestandes und wurden unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Gesamtbestands gewählt. Rund 40 % der Schäden treten demnach am Brücken-

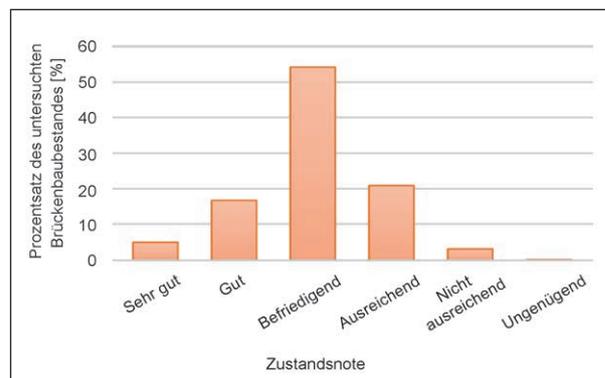


Bild 3: Zustandsnoten der Brückenbauwerke im Deutschen Bundesfernstraßennetz [3]

überbau auf, 38 % am Unterbau, 20 % an Ausrüstungen und etwa 2 % an Lagerungen.

Am Überbau treten freiliegende Bewehrung, Risse im Beton sowie Abplatzungen und Betonausbrüche am häufigsten auf. Die jeweilige Bauwerksart scheint bei diesen Schäden keinen signifikanteren Einfluss zu haben. Bei Risschäden ist kein Zusammenhang zu den Baustoffen festzustellen: Etwa 68 % der Risschäden treten an Spannbetonbrücken auf. Da die Spannbetonbrücken 67 % am Gesamtbestand ausmachen, zeigt sich somit kein Einfluss des Baustoffs bezüglich des Auftretens von Rissen. Hohlräume, Kiesnester, Durchfeuchtungen und Ausblühungen sind hingegen an Plattenbalkenbrücken deutlich häufiger festzustellen als an Hohlkasten- oder Plattenbrücken.

Schäden an Pfeilern und Widerlagern wurden getrennt ausgewertet. Widerlager haben häufig Risse und zeigen freiliegende Bewehrung. An Pfeilern kommt es am häufigsten zu Abplatzungen und Betonausbrüchen sowie freiliegender Bewehrung. Zudem kommen Hohlräume und Kiesnester bei Pfeilern deutlich häufiger vor als bei Widerlagern.

Bei Brückenlagern sind Korrosionsschäden mit etwa 42 % die häufigste Schadensart, gefolgt von Beschädigungen des Elastomers und fehlerhaften Lager (z. B. verschobene oder verdrehte Lager, verbogene Führungsschienen usw.).

### 2.2.4 Zustandsnoten

Die Erhebung des Bundes im 2011 [1] zeigt, dass die meisten Brücken (bezogen auf die Brückenfläche) eine Zustandsnote zwischen 2,0 und 3,0 aufweisen, was einem befriedigenden bis ausreichenden Zustand entspricht (Bild 3). Etwa 14 % der Brückenbauwerke weisen jedoch eine Zustandsnote

schlechter als 3,0 auf und es besteht somit akuter Handlungsbedarf. Der Vergleich mit früheren Studien aus dem Jahr 2003 [4] zeigt eine tendenzielle Verschlechterung des deutschen Brückenportfolios: der Anteil von Bauwerken in einem schlechten Zustand (3,0 bis 4,0) hat eher zugenommen und der Anteil von Brücken in einem guten Zustand (1,0 bis 2,0) im gleichen Maß abgenommen.

## 2.3 Grundsatz Nutzenbestimmung von Monitoring

Monitoringmaßnahmen liefern Informationen über den Zustand des überwachten Brückenbauwerks. Durch die gewonnenen Informationen können der jetzige Zustand und die zukünftige Zustandsentwicklung besser verstanden werden, sowie Infrastrukturmanagement-Entscheidungen (z. B. zu Instandsetzungen) optimal geplant und durchgeführt werden, siehe [5].

In den letzten Jahren wurden große Fortschritte bei der Sensortechnik sowie bei der Datenübermittlung und -analyse gemacht, sodass mehr Brückenbauwerke überwacht werden können. Mit zunehmender technologischer Reife verschiebt sich der Fokus von Forschung und Entwicklung auf die Verwendung der gesammelten Daten. Mit der technischen Entwicklung muss vermehrt die Frage nach dem Nutzen-Kosten-Verhältnis von Monitoringmaßnahmen gestellt werden. Grundlegend ist zu beantworten, wie hoch der Wert der gewonnenen Informationen und somit der Nutzen von Monitoringmaßnahmen ist.

Um mit dem verfügbaren Budget die optimale Wirkung zu erzielen, müssen die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie kann der Nutzen von Monitoringmaßnahmen maximiert werden?
- In welchen Fällen ist der Nutzen der Maßnahmen größer als die entstehenden Kosten?
- Wann und wo sind Monitoringmaßnahmen (gesamtwirtschaftlich) rentabel?

Zu diesen Fragen gibt es keine einfachen Antworten, weil der Wert der Information kontextabhängig ist. Die Einflussgrößen, welche den Nutzen von Monitoringmaßnahmen beeinflussen, sind in Bild 4 dargestellt.

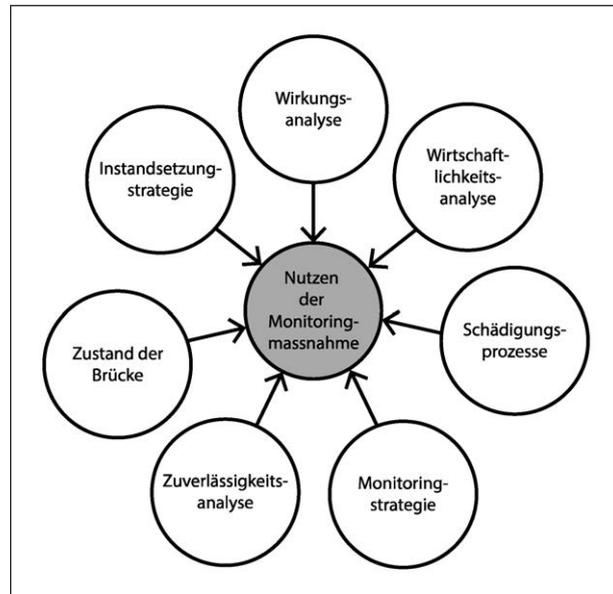


Bild 4: Einflussgrößen, die bekannt sein müssen, um den Nutzen von Monitoringmaßnahmen zu bestimmen [eigene Darstellung]

Um den Nutzen einer Monitoringmaßnahme in Betracht der vielen Einflussgrößen in Bild 4 zu bestimmen ist ein strukturiertes und allgemeines Verfahren notwendig das auf die Entscheidungstheorie und der Bayes'sche Entscheidungstheorie aufbaut: das „Value of Information“ Konzept, siehe z. B. [5]. Das Konzept wird im Bauingenieurwesen seit den 1970er Jahren angewendet und wurde für Infrastrukturmanagement formalisiert noch bevor es in der Luftfahrt und Offshore-Branchen Anwendung fand [6], [8]. In den letzten Jahren haben die Anwendung zur Optimierung von Monitoringsystemen im Infrastruktur-Bereich stark zugenommen und das „Value of Information“ Konzept genießt zunehmendes Interesse. Beispiele von Optimierungen von Inspektionen- und Monitoringsystemen sind in [9], [10], [11], [12], [13] gegeben. Die Optimierung von Sensorwahl und Platzierung in [14]; Anwendungen im Geotechnikbereich in [15]. Das Konzept wird auch in anderen Ingenieur und Wissenschaften angewendet, z. B. Erdölexploration [16] und bei Umwelt- und Gesundheitsrisiken [17].

## 2.4 Systemmodellierung

Der erste Schritt jeglicher Entscheidungsfindung ist die Systemdefinition und -modellierung. Dazu gehört die Kenntnis des Systems, der umgebenden Welt, der Randbedingungen, der Entscheidungsmöglichkeiten, der Präferenzen und der Bestimmung des Nutzens. Hauptbestandteile der Ent-

scheidungsfindung sind daher die Identifizierung der Elemente des Systems, sowie die Ermittlung der Eintretenswahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Ereignisse und deren Konsequenzen. Nachfolgende Ausführungen zur Systemmodellierung im Ingenieurwesen beruhen auf [18] bzw. sind dort entnommen.

Das System kann als räumliche, zeitliche und physikalische Modellierung der Wirklichkeit bezüglich der Prozesse, der Ereignisse und der Konsequenzen sowie deren Wechselwirkungen definiert werden, die für eine Entscheidung von Bedeutung sind. Für die Wahl eines Systems sollte ein Detaillierungsgrad gewählt werden, welcher die Bewertung von Entscheidungsmöglichkeiten ermöglicht. Der Detaillierungsgrad wird daher auch maßgeblich durch die jeweilige Fragestellung bestimmt. Beispiele sind:

- Im Kontext der Bemessung und der Beurteilung bestehender Strukturen, kann ein System aus einem Tragwerk, allen Einwirkungen, den Kosten aus Schäden am Tragwerk und Verlust von Menschenleben bestehen.
- Bei der Planung von Arbeiten an Straßen kann die Systemdefinition temporäre und räumliche Ausdehnung der Arbeiten, Anprall von Fahrzeugen, Konsequenzen infolge der Ausführung der Arbeit, Konsequenzen infolge Staus, Verletzte und den Verlust von Menschenleben beinhalten.

Bei komplexen Systemen ist es vorteilhaft sich auf eine allgemeine Systemrepräsentation zu stützen, die es erlaubt sämtliche relevanten Systemkomponenten, Einwirkungen, Ereignisse und Konsequenzen kompakt und mit einem angemessenen Detaillierungsgrad zu erfassen. Insbesondere empfiehlt es sich, auf eine hierarchische Systemmodellierung zurückzugreifen, welche es erlaubt Hauptsystem, sowie übergeordnete Systeme und Teilsysteme zu differenzieren. In dieser Studie bietet sich die folgende hierarchische Systemrepräsentation an:

- Übergeordnete Systeme: Verkehrssystem, Gesellschaft, Wirtschaft, Umwelt
- System: Brückenbauwerk
- Teilsystem: beschädigtes Teilsystem

Relevante Teilsysteme können in einem größeren Detaillierungsgrad dargestellt werden, die übergeordneten Systeme hingegen mit weniger Detail, um

so den Erfassungs- und Berechnungsaufwand in Grenzen zu halten. Bei der Modellierung jeder Systemebene kann gleich vorgegangen werden:

- Das System hat Komponenten.
- Die Komponenten werden von Einwirkungen beansprucht, woraus Schadensereignisse resultieren können.
- Die Schadenereignisse haben Konsequenzen.

Die Verbindung auf einer Modellierungsebene bzw. zwischen Modellierungsebenen muss sichergestellt werden:

- Auf einer Systemebene hängt die Verbindung (z. B. zwischen Teilsystemen) stark von der Natur des modellierten technischen Systems ab; im vorliegenden Fall handelt es sich um die Modellierung der gegenseitigen Beeinflussung zwischen Bauwerksteilen (als z. B. wenn ein beschädigtes Teil andere Teile beeinflusst).
- Die Modellierung der Verbindung zwischen Systemebenen kann allgemein gestaltet werden.

Daraus lässt sich eine kompakte Repräsentation der Konsequenzen ableiten:

- Wenn ein Ereignis die Funktion eines (Teil-)systems beeinträchtigt, ergeben sich auf jener Systemebene auf der das Ereignis modelliert wurde, direkte Konsequenzen.
- Durch die beeinträchtigte Funktion eines Teilsystems ergeben sich Konsequenzen auf den übergeordneten Systemebenen. Diese werden als indirekte Konsequenzen bezeichnet.

Ingenieurentscheidungen zu treffen bedeutet unterschiedliche Systemkonfigurationen zu vergleichen und die Beste zu identifizieren. Eine Möglichkeit Systemkonfiguration objektiv zu vergleichen ist es, dass jeweilige Risiko zu bestimmen.

## 2.5 Risiko im Ingenieurwesen

Entscheidungsalternativen zu vergleichen bedeutet Systemkonfigurationen zu vergleichen. Systemkonfigurationen unterscheiden sich nicht nur in der Wahrscheinlichkeit, dass gewisse – positive oder negative – Ereignisse eintreten, sondern auch im Ausmaß deren Konsequenzen. Eine Größe, die sowohl die Eintretenswahrscheinlichkeit wie auch die Konsequenzen von Ereignissen berücksichti-

gen kann, ist das Risiko. Ein guter Überblick zu der Bedeutung und Modellierung von Risiken im Ingenieurwesen ist in [19] gegeben, auf dem die nachfolgende Ausführung beruht.

Im Ingenieurwesen wird unter Risiko die erwarteten Konsequenzen – die sowohl Nutzen wie auch Kosten beinhalten – im Zusammenhang mit einer bestimmten Aktivität, wie z. B. dem Bau, dem Betrieb oder der Stilllegung eines Kraftwerks, der Bau und Betrieb einer Straßeninfrastruktur oder der Unterhalt und die Instandsetzung eines Brückenbauwerks verstanden.

Gehen wir von einer Aktivität mit nur einem Ereignis mit potenziellen Konsequenzen  $C$  aus, dann ist das Risiko  $R$  gleich der Wahrscheinlichkeit  $P$ , dass dieses Ereignis eintreten wird, multipliziert mit den Konsequenzen  $C$  bei Eintreten des Ereignisses:

$$R = P \cdot C \quad \text{Gl. 1}$$

Wenn  $n$  Ereignisse mit Konsequenzen  $C_i$  und Eintrittswahrscheinlichkeiten  $P_i$  aus der Aktivität resultieren können, wird das Gesamtrisiko im Zusammenhang mit der Aktivität einfach durch die Summe der Risiken aus den individuellen Ereignissen berechnet, d. h.:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i \cdot C_i \quad \text{Gl. 2}$$

Das Risiko kann grundsätzlich in unterschiedlichen Einheiten ausgedrückt werden, z. B. in Euro oder der Zahl von Todesopfern, jedoch ist es meist sinnvoll die Risiken zu Monetarisieren.

Die meisten Risikoberechnungen fokussieren auf die möglichen negativen Konsequenzen – Kosten – von Ereignissen, jedoch gelten die Definitionen ebenfalls für positive Konsequenzen – Nutzen. Werden sowohl Ereignisse mit positiven und negativen Konsequenzen berücksichtigt, gehen diese mit positiven respektive negativen Vorzeichen in der obigen Summe ein.

Eine korrekte Erfassung von Eintretenswahrscheinlichkeiten erfordert eine probabilistische Modellierung des Systems, oder zumindest der relevanten Teilsysteme, und die Berücksichtigung sämtlicher relevanter Informationen die zur Verfügung stehen. Grundlage für eine probabilistische Systemcharakterisierung ist die Wahrscheinlichkeitsrechnung; werden Informationen aus unterschiedlichen Quellen berücksichtigt (z. B. Ingenieurwissen in Kombination mit Daten aus Monitoring) empfiehlt es sich

die Wahrscheinlichkeiten gemäß der Bayes'schen Definition zu berücksichtigen (siehe nächstes Kapitel).

## 2.6 Grundlagen der Wahrscheinlichkeitslehre

Die nachfolgende Ausführung beruht auf [20]. Die Wahrscheinlichkeitstheorie ist die Grundlage, auf welcher die Wahrscheinlichkeiten von Zufallsereignissen geschätzt werden. Sie bildet deshalb einen Grundstein der Risikoanalyse und Entscheidungsfindung. Erst wenn eine konsistente Basis für die Behandlung der Unsicherheit zum Eintreten von Ereignissen mit potenziellen Konsequenzen besteht, kann man die Risiken einer Handlung bestimmen und eine rationale Grundlage für Entscheidungen aufstellen.

Der Grad der Unsicherheit, die mit einer bestimmten Aktivität oder einem Phänomen verbunden ist, kann rein qualitativ ausgedrückt werden, etwa „die Chancen sind gut“ oder „die Erfolgsaussichten sind gering“, aber man kann ihn auch quantitativ, z. B. durch Prozentzahlen erfassen. Stets ist jedoch die Bedeutung von Wahrscheinlichkeiten gemeint, weshalb wir diesen Begriff im nächsten Abschnitt genauer untersuchen. Dabei wird insbesondere der theoretische Rahmen für eine Quantifizierung im Detail beschrieben.

Die Wahrscheinlichkeitstheorie dient zur quantitativen Schätzung von Wahrscheinlichkeiten, setzt jedoch keine bestimmte Interpretation des Wahrscheinlichkeitskonzeptes voraus. Menschen mit ganz verschiedenen Auffassungen des Wahrscheinlichkeitsbegriffs können deshalb trotzdem dieselben Berechnungen anstellen. Hier werden drei verschiedene Interpretationen des Begriffs vorgestellt und aufgrund einfacher Beispiele besprochen.

### Frequentistische Definition

Die frequentistische Definition der Wahrscheinlichkeit ist die typische Interpretation des Experimentalen. Hier ist die Wahrscheinlichkeit  $P(A)$  einfach die relative Häufigkeit, mit welcher das Ereignis  $A$  in einer Reihe von  $n_{\text{exp}}$  Versuchen beobachtet wird, d. h.  $P(A)$  ist definiert durch die Anzahl Beobachtungen von  $N_A$ , die zum Ereignis  $A$  geführt haben, geteilt durch die totale Anzahl der Versuche  $n_{\text{exp}}$ :

$$P(A) = \lim_{n_{\text{exp}} \rightarrow \infty} \frac{N_A}{n_{\text{exp}}} \quad \text{für } n_{\text{exp}} \rightarrow \infty \quad \text{Gl. 3}$$

Ein Frequentist, der die Wahrscheinlichkeit von Kopf beim Münzwurf nennen soll, würde grundsätzlich nicht antworten, bevor er nicht eine lange Versuchsreihe durchgeführt hätte. Wenn z. B. in 1.000 Versuchen (Münzwürfen) das Ergebnis Kopf 563 Mal erzielt würde, dann wäre seine Antwort, die Wahrscheinlichkeit von Kopf betrage 0,563. Wenn die Anzahl der Versuche wächst, sollte diese Wahrscheinlichkeit gegen 0,5 konvergieren. Für einen Frequentisten ist die Wahrscheinlichkeit ein Naturgesetz.

### Klassische Definition

Die klassische Definition der Wahrscheinlichkeit geht auf einen Briefwechsel im Jahr 1654 zwischen Pascal und Fermat zurück. Die Inspiration für diese Theorie lieferten Glücksspiele (Würfel, Karten). Hier wird die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses A gegeben durch:

$$P(A) = \frac{n_A}{n_{\text{tot}}} \quad \text{Gl. 4}$$

$n_A$  Anzahl der gleich wahrscheinlichen Ausgänge eines Versuches, die zum Ereignis A führen

$n_{\text{tot}}$  Anzahl aller möglichen (gleich wahrscheinlichen) Ausgänge des Versuches

Beim Münzwurf gibt es zwei gleich wahrscheinliche Ausgänge, wovon einer Kopf ist. Weshalb die Wahrscheinlichkeit, Kopf zu werfen, nach der klassischen Definition 0,5 ist. Es ergibt sich tatsächlich kein Widerspruch zur frequentistische Definition, doch stellt man folgende Unterschiede fest: Das Experiment muss nicht ausgeführt werden, da die Antwort im Voraus bekannt ist. Die klassische Theorie liefert keine Lösung, wenn nicht alle möglichen gleich wahrscheinlichen Ausgänge des Experiments analytisch bestimmt werden können.

### Die Bayes'sche Definition

In der Bayes'schen Interpretation wird die Wahrscheinlichkeit  $P(A)$  des Ereignisses A als Grad der persönlichen Überzeugung, dass A eintritt, definiert:

$$P(A) = \text{Grad der persönlichen Überzeugung, dass Ereignis A eintritt} \quad \text{Gl. 5}$$

Beim Münzwurf würde der Bayesianer argumentieren, es gebe zwei Möglichkeiten und, da er keine Präferenz für Kopf oder Zahl habe, würde er die Wahrscheinlichkeit von Kopf auf 0,5 schätzen.

Dieser Grad der persönlichen Überzeugung spiegelt die Meinung eines Individuums aufgrund seiner Erfahrung, seiner Überlegungen und seiner Präferenzen wider. In dieser Hinsicht ist die Bayes'sche Interpretation der Wahrscheinlichkeit subjektiv, d. h. von der Person abhängig. Es ist also durchaus möglich, dass zwei verschiedene Personen demselben Ereignis verschiedene Wahrscheinlichkeiten zuordnen, was der frequentistischen Auffassung widerspricht, wonach Wahrscheinlichkeiten Eigenschaften der Natur und somit objektiv bestimmbar sind.

Die Bayes'sche Interpretation der Wahrscheinlichkeit umfasst sowohl die frequentistische als auch die klassische Interpretation, da die subjektiv festgelegten Wahrscheinlichkeiten entweder auf früheren Versuchen (frequentistisch) oder auf analytischen Symmetrieüberlegungen (klassisch) basieren können.

Der Grad der persönlichen Überzeugung wird auch als a-priori Wahrscheinlichkeit bezeichnet, d. h. als die persönliche Überzeugung vor dem Erhalt jeder späteren Information. Interessanterweise entwickelte Kant<sup>1</sup> die rein philosophische Grundlage für die Behandlung der Subjektivität zur gleichen Zeit wie Bayes<sup>2</sup> den mathematischen Rahmen für die später nach ihm benannte Statistik.

Die moderne Zuverlässigkeitstheorie und die Risikoanalyse basieren auf der Bayes'schen Interpretation von Wahrscheinlichkeit. Allerdings ist der Freiheitsgrad bei der Interpretation von Wahrscheinlichkeiten nicht so hoch, wie es auf den ersten Blick aussieht. Im formellen Bayes'schen Rahmen sollte das subjektive Element vor der Beobachtung der Daten festgehalten werden. Aber man muss natürlich objektive Symmetriebetrachtungen sowie physikalische Gesetze auch bei diesem ersten Schritt berücksichtigen.

<sup>1</sup> Immanuel Kant, Philosoph, 1724-1804

<sup>2</sup> Thomas Bayes, Pfarrer und Mathematiker, 1702-1761

**2.6.1 Bayes'sches Theorem und Bayes'sches Aktualisieren**

Bedingte Wahrscheinlichkeiten sind bei der Analyse von Risiko und Zuverlässigkeit von besonderem Interesse, da sie die Aktualisierung von geschätzten Wahrscheinlichkeiten aufgrund neuer Informationen, Kenntnisse und Evidenzen erlauben.

Die bedingte Wahrscheinlichkeit von  $E_1$  unter der Voraussetzung, dass das Ereignis  $E_2$  eingetreten ist (gegeben  $E_2$ ), wird definiert durch:

$$P(E_1|E_2) = \frac{P(E_1 \cap E_2)}{P(E_2)} \tag{Gl. 6}$$

Man sieht, dass der Begriff im Falle  $E_2 = \emptyset$ , d. h.  $P(E_2) = 0$ , nicht definiert ist.

Das Ereignis  $E_1$  heißt unabhängig von  $E_2$ , wenn

$$P(E_1|E_2) = P(E_1) \tag{Gl. 7}$$

also wenn das Eintreten von  $E_1$  durch das Eintreten von  $E_2$  nicht beeinflusst wird.

Aus Gleichung 6 folgt für die Wahrscheinlichkeit von  $E_1 \cap E_2$ :

$$P(E_1 \cap E_2) = P(E_1|E_2)P(E_2) \tag{Gl. 8}$$

Falls  $E_1$  und  $E_2$  unabhängig sind, ergibt sich:

$$P(E_1 \cap E_2) = P(E_1)P(E_2) \tag{Gl. 9}$$

Die Bayes'sche Formel kann nun aus diesen Ergebnissen hergeleitet werden.

Sei der Ereignisraum  $\Omega$  in  $n$  paarweise unvereinbaren Ereignisse  $E_1, E_2, \dots, E_n$  unterteilt (siehe Bild 5 für den Fall  $n = 8$ ) und sei  $A$  ein Ereignis in  $\Omega$ .

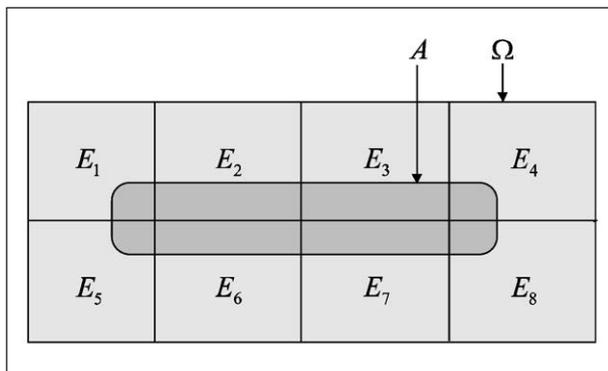


Bild 5: Illustration der Bayes'schen Regel [eigene Darstellung]

Dann ist die Wahrscheinlichkeit  $P(A)$  des Ereignisses  $A$  gegeben durch:

$$\begin{aligned} P(A) &= P(A \cap E_1) + P(A \cap E_2) + \dots + P(A \cap E_n) \\ &= P(A|E_1)P(E_1) + P(A|E_2)P(E_2) + \dots + P(A|E_n)P(E_n) \\ &= \sum_{i=1}^n P(A|E_i)P(E_i) \end{aligned} \tag{Gl. 10}$$

Dies ist der so genannte Satz der totalen Wahrscheinlichkeit.

Aus Gleichung 6 folgt  $P(A|E_i)P(E_i) = P(E_i|A)P(A)$ , woraus:

$$P(E_i|A) = \frac{P(A|E_i)P(E_i)}{P(A)} \tag{Gl. 11}$$

Ersetzt man in Gleichung 11  $P(A)$  durch die in Gleichung 10 erscheinende Summe, dann erhält man die Bayes'sche Formel:

$$P(E_i|A) = \frac{P(A|E_i)P(E_i)}{\sum_{j=1}^n P(A|E_j)P(E_j)} \tag{Gl. 12}$$

In Gleichung 12 wird  $P(E_i|A)$  als a-posteriori Wahrscheinlichkeit von  $E_i$  bezeichnet, während die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(A|E_i)$  Likelihood heißt (die Likelihood ist die bedingte Wahrscheinlichkeit der Beobachtung eines bestimmten Zustandes, hier  $A$ , gegeben den wahren Zustand, hier  $E_i$ ). Der Ausdruck  $P(E_i)$  ist die a-priori Wahrscheinlichkeit von  $E_i$ , d. h. vor der Beobachtung des Ereignisses  $A$ .

**2.7 Grundlage Konsequenzen**

Nachfolgende Ausführungen beruhen weitgehend auf [21], auf das für eine Vertiefung des Themas verwiesen wird. Will man Risiko als Grundlage für Entscheidungen verwenden, ist es wichtig, dass alle auftretenden Konsequenzen von Ereignissen berücksichtigt werden. Neben den Konsequenzen, die durch ein Ereignis direkt entstehen, sollten auch Konsequenzen berücksichtigt werden, die indirekt aus dem Ereignis folgen. Solche Folgekonsequenzen können auch ökonomische Nutzen oder Schäden für die Volkswirtschaft sein, aber auch für die Umwelt oder Gesellschaft im weiteren Sinn. Diese manchmal auch mit „Follow up Consequences“ bezeichneten Konsequenzen können wesentlich größer sein als die direkten Konsequenzen. Gemäß [19] können direkte Konsequenzen mit Verletzbarkeitsmodellen und indirekte Konsequenzen mit Robustheitsmodellen bestimmt werden.

Eine weitere Unterscheidung kann zwischen materiellen und immateriellen Konsequenzen gemacht werden. Erstere können einfach durch einen monetären Wert beziffert werden, bei den zweiten ist das meist sehr schwierig und zum Teil kontrovers. Nachfolgend werden Beispiele für die unterschiedlichen Konsequenzen gegeben:

- Direkte materielle Konsequenzen: Beschädigung der Brücke.
- Direkte immaterielle Konsequenzen: Todesfälle und Verletzte bei Brückenversagen.
- Indirekte materielle Konsequenzen: Verkehrsbehinderungen durch Brückenschließung.
- Indirekte immaterielle Konsequenzen: Vertrauensverlust in Behörden bei Brückenversagen.

Um Risiken von unterschiedlichen Ereignissen aggregieren zu können, und die Vergleichbarkeit von Entscheidungsalternativen sicherzustellen, werden in diesem Bericht alle Konsequenzen monetarisiert. Die Literaturrecherche zu den Konsequenzen, die in dieser Studie modelliert werden, ist in den Kapiteln 2.10 und 2.11 gegeben.

Wie die Entscheidungsalternativen aufgrund von Risiken verglichen werden können, wird im nächsten Kapitel beschrieben.

## 2.8 Risikobasierte Entscheidungsfindung im Ingenieurwesen

Nachfolgende Ausführungen beruhen auf [18], [19].

Das Ziel der Entscheidungsträger ist es, den Nutzen ihrer Entscheidungen zu maximieren. Die Straßenverwaltungen oder ein Tiefbauamt als Vertreter der Gesellschaft ist bestrebt, den Nutzen für die Gesellschaft zu maximieren.

Eine gebaute Anlage ist für die Gesellschaft von Nutzen, wenn sie folgende Anforderungen erfüllt:

- Sie ist wirtschaftlich rentabel durch die Erfüllung eines bestimmten Zwecks;
- Sie erfüllt vorgegebene Anforderungen in Bezug auf die Sicherheit der Menschen, die direkt mit der Anlage zu tun haben oder ihr indirekt ausgesetzt sind;
- Sie erfüllt vorgegebene Anforderungen zur Beschränkung ihrer schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt.

Aufgrund dieser Anforderungen kann festgehalten werden, dass die oberste Pflicht des Ingenieurs darin besteht, Entscheidungen so zu fällen oder die Grundlage für die Entscheidung anderer so zu liefern, dass die Verwirklichung von Einrichtungen des Ingenieurwesens in einer möglichst nutzbringenden Art gewährleistet ist; wenn sie sich nicht als nutzbringend erweisen, werden sie nicht verwirklicht. Das Ziel der Entscheidungsfindung im Ingenieurwesen ist somit die Bewertung und der Vergleich von Entscheidungsalternativen, um jene zu ermitteln die den größten Nutzen verspricht [21]. Um einen objektiven Vergleich zwischen Entscheidungsalternativen zu ermöglichen muss eine Nutzenfunktion (oder Präferenzfunktion) formuliert werden, die es erlaubt sämtliche Kosten und Nutzen gemäß den Präferenzen des Entscheidungsträgers zu berücksichtigen. Allgemein wird die Entscheidungsalternative mit den kleinsten Kosten (oder äquivalent mit dem größten Nutzen), die die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen erfüllt, als die optimale betrachtet. Als solches ist die Entscheidungsfindung im Ingenieurwesen ein Teil der normativen Entscheidungstheorie, die sich zum Ziel setzt optimale Handlungs- und Entscheidungsalternativen gemäß rationalen Kriterien zu identifizieren.

### 2.8.1 Entscheidungsalternativen und Nutzenfunktion

Der erste Schritt einer Entscheidungsfindung im Ingenieurwesen ist die Definition der Entscheidungsalternativen  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ , wobei  $a_i, i = 1, 2, \dots, N$  Entscheidungsalternativen sind, die dem Entscheidungsträger zur Verfügung stehen. Die Bedeutung der Entscheidungsalternativen ist naturgemäß abhängig von den Entscheidungsfragen. In dieser Studie werden insbesondere zwei Fragen betrachtet:

- Die Erste betrifft Betrieb, Instandsetzung der Brücke, der sowohl zeitlich wie auch im Umfang geplant werden muss. Entscheidungsalternativen sind hier z. B.: Normalbetrieb der Brücke, Schließung der Brücke, umgehende Instandsetzung der Brücke oder Verschiebung der Instandsetzung auf einen späteren Zeitpunkt.
- Die Zweite betrifft die Installation eines Monitoringsystems.

In Wirklichkeit sind die beiden Entscheidungsprobleme naturgemäß eng miteinander verknüpft und

voneinander abhängig, dies wird in Kapitel 4 in der Beschreibung des Konzepts deutlich.

Sind die Entscheidungsalternativen bestimmt, werden sie mit der Nutzenfunktion bewertet, um jene zu identifizieren die den größten Nutzen – oder die kleinsten Kosten – über den betrachteten Zeitraum generieren. Die dazu notwendige Theorie wurde von [23] formuliert. Die Nutzenfunktion  $U(a, \Psi(a, \Theta))$  für Entscheidungsalternative  $a$  berücksichtigt allen Nutzen und Kosten in der Form von Konsequenzen  $\Psi(a, \Theta)$ . Die Konsequenzen sind Funktion des zukünftigen Zustands des betrachteten Systems, das naturgemäß mit Unsicherheiten behaftet ist und deshalb im Allgemeinfall durch Zufallsvariablen modelliert wird  $\Theta$  [6]. Da die Kosten und der Nutzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehen, können sie nicht einfach summiert werden und müssen diskontiert zu einem Zeitwert bestimmt werden (mehr dazu in Kapitel 4.10).

### 2.8.2 Entscheidungsprobleme

Es können drei Arten von Entscheidungsproblemen unterscheiden werden, die sich hinsichtlich des verfügbaren Informationsgehaltes unterscheiden [22]:

- Entscheidungsfindung ohne Unsicherheiten: In solchen Entscheidungsproblem ist der Zustand des Systems vor und nach der Entscheidung jeweils bekannt. Deshalb sind die Konsequenzen  $\Psi(a_i)$  nur eine Funktion der Entscheidungsalternative. Die optimale Entscheidungsalternative ist einfach durch Berechnung von Kosten und Nutzen zu identifizieren.
- Entscheidung mit Risiko: In dieser Situation ist der zukünftige Zustand eines Systems  $\Theta$  unbekannt, seine probabilistische Charakterisierung  $f_\Theta(\theta)$  jedoch bekannt. Wenn man davon ausgeht, dass der Entscheidungsträger risikoneutral ist, ist die optimale Entscheidung  $a^*$  jene mit dem größten Erfahrungswert der Konsequenzen über alle Realisationen von  $\Theta$ , das heißt:

$$a^* = \max_a E_\Theta [U(a, C(a, \Theta))] \quad \text{Gl. 13}$$

- Entscheidung mit Unsicherheit: In solchen Fällen sind weder die zukünftigen Zustände des Systems  $\Theta$  noch deren probabilistische Charakterisierung  $f_\Theta(\theta)$  bekannt. Es ist dann nicht mehr möglich die optimale Entscheidungsalternative eindeutig zu identifizieren und es muss auf ein Entscheidungskriterium zurückgegriffen werden, z. B. Maximin-Prinzip, Niehans-Savage criterion,

Hurwicz  $\alpha$ , und Laplace's-Prinzip des kleinsten Bedauerns, die es erlaubt die Entscheidungsalternative zu identifizieren die mit der Präferenz des Entscheidungsträgers übereinstimmt (siehe z. B. [21]).

Entscheidungsprobleme im Ingenieurwesen sind normalerweise als „mit Risiko“ oder „mit Unsicherheit“ eingestuft. Jedoch werden aus praktischen Überlegungen „Entscheidungsprobleme mit Unsicherheit“ zu „Entscheidungsproblemen mit Risiko“ gemacht in dem die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $f_\Theta(\theta)$  aufgrund von Erfahrung, Daten oder Präferenz postuliert wird [21].

Wenn  $f_\Theta(\theta)$  postuliert wird, ist oft die Frage relevant, ob mehr Daten und Informationen zu  $\Theta$  gesammelt werden sollten, bevor eine Entscheidung getroffen wird. Um diese Frage formell anzugehen und zu beantworten, ist die Bayes'sche Entscheidungsfindung notwendig die im Ingenieurwesen breite Anwendung findet [24], [6]. Bayes'sche Entscheidungsfindung ist z. B. in [6], [8], [20] und [26] beschrieben sowie im Kapitel 2.12.

## 2.9 Probabilistische Modelle

Aus den Ausführungen geht hervor, dass für eine risikobasierte Entscheidungsfindung eine Quantifizierung der Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Ereignisse und deren Konsequenzen erforderlich ist. Im Bauingenieurwesen ist ein kritisches Ereignis ein Bauwerkversagen, dessen Wahrscheinlichkeit mit der Zuverlässigkeitsanalyse ermittelt werden kann (Kapitel 2.9.1 und 2.9.2). Die Ermittlung von zeitabhängigen Versagenswahrscheinlichkeiten in Funktion des Schädigungsprozesses ist in Kapitel 2.9.3 thematisiert. In Kapitel 2.9.4 ist das Markov-Ketten-Model beschrieben, mit dem die Zustandsentwicklung von Bauwerken probabilistisch modelliert werden kann.

### 2.9.1 Zuverlässigkeitsanalyse

Brückenschädigungen können zu einem Tragwerksversagen<sup>3</sup> führen. Der Nutzen der Monitoring-

<sup>3</sup> Als Tragwerksversagen werden in diesem Kontext auch bestimmt Schädigungszustände oder Verlust einer bestimmten Funktionalität verstanden.

maßnahme hängt direkt von der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versagensereignisses in Brückentragwerken oder Tragwerksteilen ab. Diese kann mit der strukturellen Zuverlässigkeitstheorie bestimmt werden [26], [6], [31]. In der Zuverlässigkeitsanalyse wird für jeden relevanten Versagensmechanismus die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Tragwiderstands und der Einwirkung modelliert und gegenübergestellt. So einfach das Konzept ist, so komplex kann die Modellierung je nach Problemstellung sein.

Zuverlässigkeitsberechnungen kommen vermehrt in der Praxis zur Anwendung, insbesondere bei der Beurteilung von bestehenden Tragwerken und im Kontext der Verhältnismäßigkeitsprüfung von Sicherheit- und Instandsetzungsmaßnahmen bei staatlicher Infrastruktur<sup>4</sup>. Dort bietet die Zuverlässigkeitstheorie die Möglichkeit, besseres Wissen über das Tragwerk (z. B. genauere Kenntnisse über die Last und den Widerstand) in der Analyse zu berücksichtigen und die Zuverlässigkeit objektspezifisch zu bestimmen, sowie Verstärkungs- und Erüchtigungsmaßnahmen zu beurteilen.

In Bereichen, in denen eine Normung von Einwirkungen schwerer möglich ist und die Personensicherheit gewährleistet werden muss (wie z. B. bei Tragwerken von Offshore Plattformen), ist die Zuverlässigkeitsanalyse vermehrter Bestandteil einer „Fit for Purpose“-Analyse. Eigentümer von solchen Tragwerken wollen das Risiko kennen und sicherstellen, dass die Zuverlässigkeit der Anlagen ausreichend groß ist.

Die Zuverlässigkeitstheorie wird auch angewendet, um die Teilsicherheitsbeiwerte in den Eurocodes zu kalibrieren und somit ein einheitliches und ausreichendes quantifiziertes Sicherheitsniveau zu erreichen.

Die Zuverlässigkeitstheorie kann je nach Gegebenheiten mit unterschiedlichen Methoden analytisch oder numerische umgesetzt werden, z. B. FORM (First Order Reliability Method, [31]), SORM (Second Order Reliability Method, [31]) oder Mon

te Carlo Simulation [6], [7] inkl. varianzreduzierender Verfahren. Kommerzielle Software und Open Source Toolboxes für die verschiedenen Methoden sind vorhanden (z. B. Open Turns [28], Strurel [27], Ferum [29]). Beispiele für Zuverlässigkeitsrechnungen von Brücken sind unter anderem in [30] gegeben.

## 2.9.2 Methoden zur Berechnung der Zuverlässigkeit

Nachfolgende Ausführungen sind weitgehend [25] entnommen. Typische Problemstellungen im Ingenieurwesen sind verschiedenen Kombinationen von inhärenten Unsicherheiten, statistischen Unsicherheiten und Modellunsicherheiten unterworfen. Die strukturelle Zuverlässigkeitstheorie beschäftigt sich mit der konsistenten Berücksichtigung dieser Unsicherheiten. In den letzten Jahrzehnten ist eine Vielzahl von Methoden zur Bestimmung der strukturellen Zuverlässigkeit entwickelt worden. Die wichtigsten Methoden werden in diesem Kapitel kurz vorgestellt. Die Stochastische-Finite-Elemente-Methode ist ein Sonderfall. Dieser soll hier vorgestellt werden, da zur Bemessung von Kunstbauten und auch Schutzbauwerken immer häufiger Finite-Elemente-Modelle erstellt werden. Die bestehenden Modelle können direkt verwendet werden, um Zuverlässigkeitsanalysen durchzuführen. Eine Einführung in Methoden der strukturellen Zuverlässigkeit findet sich z. B. in [31], [32] oder [33]. Eine gute Einführung in die Stochastische-Finite-Elemente-Methode gibt [34].

Das einfachste Zuverlässigkeitsproblem kann durch eine Einwirkung  $S$  und einem Widerstand  $R$  beschrieben werden. Jede dieser Zufallsvariablen wird durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_S(s)$  und  $f_R(r)$  repräsentiert. Beide Verteilungsfunktionen müssen dabei die gleiche Einheit haben. Als Versagen wird der Zustand definiert, in dem die Einwirkung  $S$  grösser ist als der Widerstand  $R$ . Die Grenzzustandsfunktion ist dann:

$$g(x) = r - s \quad \text{Gl. 14}$$

Der Vektor  $x$ , von dem die Grenzzustandsfunktion abhängt, beinhaltet die Realisationen aller Zufallsvariablen  $X$ , die zur Beschreibung der Einwirkungen und der Widerstände notwendig sind. Als Versagen  $F$  wird der Zustand definiert, in dem die Grenzzustandsfunktion  $g(x)$  kleiner oder gleich Null ist:

$$F = \{x | g(x) \leq 0\} \quad \text{Gl. 15}$$

<sup>4</sup> Konkret wird beispielsweise bei bestehenden Tragwerken in den Schweizerischen Normen erlaubt, eine größere Versagenswahrscheinlichkeit zu akzeptieren, wenn die Kosten für eine Verstärkungsmassnahme unverhältnismässig sind. Auch das Joint Committee on Structural Safety (JCSS) gibt ähnliche Empfehlungen.

Die Versagenswahrscheinlichkeit ist ein Maß für die Möglichkeit, mit der ein Versagensereignis eintreten kann. Diese kann einerseits quantifiziert werden, indem Langzeitbeobachtungen der Versagenshäufigkeit gemacht werden oder durch numerische Modellierungen. I. d. R. gibt es im Bauwesen nicht genügen Bauwerke, die gleiche Eigenschaften und eine ausreichend hohe Versagenswahrscheinlichkeit haben, um genügend Beobachtungen von Versagenszuständen machen zu können.

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  wird durch Integration über den gesamten Bereich  $\Omega$  der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_{R,S}(r,s)$ , in dem die Grenzzustandsfunktion kleiner oder gleich Null ist:

$$p_f = P[g(X) \leq 0] = \iint_{\Omega} f_{R,S}(r,s) drds \quad \text{Gl. 16}$$

Bild 6 illustriert den Integrationsbereich für eine lineare Grenzzustandsgleichung. Die Versagensfläche wird durch  $g(x) = 0$  definiert.

Wird zur Vereinfachung angenommen, dass die Einwirkung und der Widerstand unabhängige Zufallsvariablen sind, kann die Versagenswahrscheinlichkeit über das Faltungsintegral direkt berechnet werden zu:

$$p_f = P[g(X) \leq 0] = \int_{-\infty}^{+\infty} f_r(r) f_s(s) drds \quad \text{Gl. 17}$$

Meist sind mehr als zwei Zufallsvariablen notwendig, um Versagen zu beschreiben. Allgemein lässt

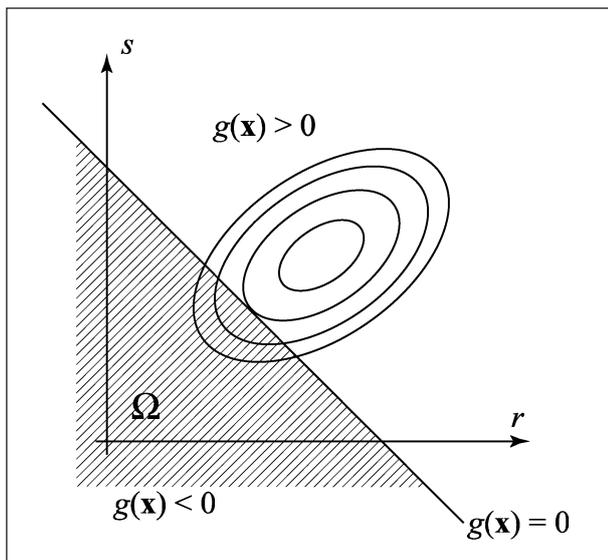


Bild 6: Illustration einer bivariaten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer linearen Grenzzustandsgleichung und des zugehörigen Versagensbereiches [25]

sich die Versagenswahrscheinlichkeit durch das folgende Integral beschreiben:

$$p_f = P[g(X) \leq 0] = \int_{g(X) \leq 0} f_x(x) dx \quad \text{Gl. 18}$$

Hierin bezeichnet  $g(x)$  die Grenzzustandsfunktion,  $X$  den Vektor der Zufallsvariablen und  $f_x(\bullet)$  ist die gemeinsame Dichteverteilung der Zufallsvariablen  $X$ .

Die hier gezeigten Formulierungen sind nicht auf die strukturelle Zuverlässigkeit und nicht auf Versagenszustände beschränkt. Prinzipiell kann für jedes Ereignis, dass durch eine Grenzzustandsfunktion in Form von Gleichung 17 beschrieben werden kann, die Eintretenswahrscheinlichkeit so ermittelt werden.

Für komplexere Probleme kann die Versagenswahrscheinlichkeit nach Gleichung nicht analytisch bestimmt werden. Zur Lösung dieses Problems sind verschiedene numerische Verfahren entwickelt worden. Drei dieser Verfahren werden im Folgenden vorgestellt.

### First Order Reliability Method (FORM)

Die Basis für die Entwicklung dieser Methode bilden die Arbeiten von [35] und [36]. Sie entwickelten eine analytische Lösung zur Ermittlung des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$ , ein Maß für die Zuverlässigkeit. Multipliziert man  $\beta$  mit der Standardabweichung  $\sigma_M$ , der Sicherheitsmarge  $M = R - S$ , entspricht dies dem Mittelwert der Sicherheitsmarge  $\mu_M$ .

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad \text{Gl. 19}$$

Bild 7 veranschaulicht die Definition des Zuverlässigkeitsindex nach [35]. In Abhängigkeit der Formulierung der Grenzzustandsfunktion können jedoch der Mittelwert der Sicherheitsmarge  $\mu_M$  und die zugehörige Standardabweichung  $\sigma_M$  bei gleicher Definition des Versagens unterschiedlich sein. Somit ergeben sich auch unterschiedliche Werte von  $\beta$  und unterschiedlich große Versagenswahrscheinlichkeiten.

Dieses Invarianzproblem wurde von [37] gelöst, indem der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  als kürzester Abstand zwischen dem Ursprung im Standardnormalraum  $U$  und der Grenzzustandsfunktion definiert wurde. Der Punkt auf der Grenzzustandsfunktion, der den kürzesten Abstand zum Ursprung im Standardnormalraum hat, wird auch als Bemessungspunkt bezeichnet. Das Konzept der FORM basiert

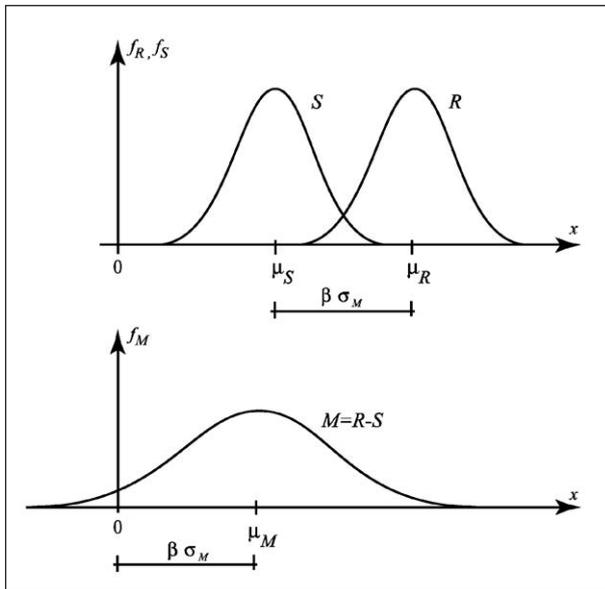


Bild 7: Zuverlässigkeitsindex in der Formulierung von [35]

auf einer Linearisierung der Grenzzustandsfunktion im Bemessungspunkt. Dadurch wird die Versagenshyperfläche, die durch die Grenzzustandsfunktion beschrieben wird, am Bemessungspunkt durch eine Ebene approximiert. Da der Bemessungspunkt den wahrscheinlichsten Versagenszustand darstellt, ist der Fehler, der durch diese Approximation gemacht wird, ausreichend klein.

Seit dieser Entwicklung wurde FORM weiterentwickelt und fand Anwendung in zahlreichen zuverlässigkeitsbasierten Optimierungen. Eine der bekanntesten Anwendungen ist die Normenkalibrierung.

### 2.9.3 Schädigungsprozesse

Meist sind sowohl die Einwirkungen als auch die Widerstände zeitvariable Funktionen. Die Einwirkung  $S(t)$  variiert mit der Zeit und sowohl die Größenordnung der Einwirkung als auch der Zeitpunkt, wann sie auf das Tragwerk einwirken, sind unsicher. Auch der Widerstand  $R(t)$  des Bauwerkes ist mit der Zeit veränderlich. Alterungsprozesse oder belastungsabhängige Verformungen von Teilen des Tragwerkes können zu einer Abnahme der Festigkeit über die Zeit führen. Dieser Zusammenhang ist in Bild 8 dargestellt. Sowohl die Festigkeit als auch der Widerstand können durch einen Zufallsprozess beschrieben werden. Die Unsicherheiten beider Variablen haben die Eigenschaft, mit der Zeit größer zu werden. Die Dichteverteilungen  $f_R(\bullet)$  und  $f_S(\bullet)$  werden breiter und flacher mit der Zeit [31]. Zu unterschiedlichen Zeitpunkten  $t = t_a, t_b$  können beide

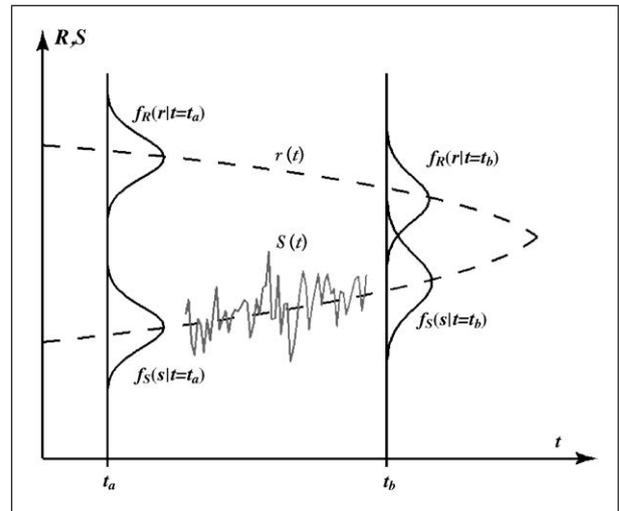


Bild 8: Schematisches zeitabhängiges Zuverlässigkeitsproblem [25]

Zufallsvariablen durch unterschiedliche Dichteverteilungen beschrieben werden (siehe Bild 8).

Wird ein zeitvariantes Zuverlässigkeitsproblem betrachtet, so bedeutet Versagen, dass der Prozess  $g(x(t))$  zu einem Zeitpunkt  $t$  in einem betrachteten Zeitintervall  $[0; T]$  kleiner oder gleich Null ist.  $x(t)$  ist eine Realisation des Zufallsprozesses  $X(t)$ . Die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  innerhalb des Intervalls  $[0; T]$  kann nach Gleichung 20 berechnet werden:

$$p_f(t) = 1 - P(g(x(t)) > 0, \forall t \in [0; T]) \quad \text{Gl. 20}$$

Da die direkte Berechnung nach Gleichung 20 meist schwierig ist, werden in praktischen Anwendungen häufig Approximationen verwendet. Solche Approximationen finden sich z. B. in [32] oder in [31]. In vielen Anwendungen ist es möglich anzunehmen, dass die Zufallsvariablen  $X$  nicht zeitabhängig sind. Dann ist es möglich, das Zuverlässigkeitsproblem unter Verwendung von Gleichung 20 zu lösen.

### 2.9.4 Markov-Kette-Modell für die Zustandsentwicklung

Für die Zustandsentwicklung kommt ein Markov-Chain-Modell zur Anwendung ([38] für die Theorie und [39] für eine Anwendung auf die Zustandsentwicklung von Brückenbauwerken). Es erlaubt von einem gegebenen gegenwärtigen Zustand, die zukünftigen Zustände unter Berücksichtigung von Unsicherheiten zu bestimmen.

Aus Kapitel 2.9.3 ist ersichtlich, dass durch die Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Schaden-

wicklung der Zeitpunkt, an dem ein Bauwerk von einem Zustand in den nächsten wechselt, ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet ist. Auch wenn der genaue Zeitpunkt eines Zustandsübergang nicht bestimmt werden kann, können Wahrscheinlichkeit eines Zustandsübergang bestimmt werden. Mit der Annahme, dass der Zustandswechsel in einem diskreten Zeitschritt stattfindet: also zum Beispiel, die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauwerk mit Zustand  $Z = 1$  innerhalb von einem bestimmten Jahr in den Basiszustand  $Z = 2$  wechselt. Eine solche Wahrscheinlichkeit wird als Übergangswahrscheinlichkeit bezeichnet und ist die Grundlage für das Markov-Ketten-Model. Aus dem Schädigungsmodell lassen sich für jeden Zeitschritt  $t$  die Übergangswahrscheinlichkeit  $\pi_{ij}$  eines Übergangs von Zustand  $Z_i$  in Zustand  $Z_j$  ermitteln und in die Übergangsmatrix  $\pi_{t-1}$  festhalten:

$$\pi_t = \begin{bmatrix} \pi_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pi_{23} & \pi_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pi_{34} & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{45} & \pi_{55} \end{bmatrix}_t \quad \text{Gl. 21}$$

Definiert man einen Vektor  $p_t$  der die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Zustände des Bauteils zum Zeitpunkt  $t$  enthält:  $p_t = [P(Z_1), P(Z_2), P(Z_3), P(Z_4), P(Z_5)]$ , dann sind die Wahrscheinlichkeiten  $p_{t-1}$  der Zustände im nächsten Zeitschritt:

$$p_{t+1} = \pi_t \cdot p_t \quad \text{Gl. 22}$$

Im allgemeinen Fall unterscheiden sich die Übergangsmatrizen in den Zeitschritten, es kann jedoch vereinfachend die Annahme getroffen werden, dass die Übergangsmatrix zeitkonstant ist. In diesem Fall wird die Markov-Kette als stationär bezeichnet und die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zustands zu einem beliebigen Zeitschritt  $t$  lässt sich direkt von dem ursprünglichen Zustand ableiten (also zu  $t = 0$ ):

$$p_t = \pi^t \cdot p_0 \quad \text{Gl. 23}$$

Das Markov-Ketten-Model trifft die Grundannahme<sup>5</sup>, dass der jeweilige Zustand eines Bauteils nur von dessen Zustand im vorherigen Zeitschritt abhängig ist, alle davor liegenden Erkenntnisse gehen

in die Bewertung nicht ein. Durch sie ist es möglich, den zukünftigen Zustand eines Bauteils auf vereinfachende Weise zu prognostizieren und dessen Wahrscheinlichkeit mithilfe von Beobachtungen zu aktualisieren.

## 2.10 Wirkungs- und Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im Bereich der Verkehrsplanung sind Bewertungsverfahren traditionell für den Neu- und Ausbau von Infrastrukturen entwickelt worden. I. d. R. wurde für die Wirkungsanalyse zunehmend mit Verkehrsmodellen gearbeitet, die eine Prognose über die Veränderungen der Verkehrsflüsse im Fall mit der Maßnahme (Mitfall) gegenüber dem Netzzustand ohne Maßnahme (Ohnefall) ermöglichen. Es werden zu meist die Veränderungen in den Bereichen Reisezeiten, Kraftstoffverbrauch, Betriebskosten, Unfälle, und Schadstoffemissionen vergleichend für Mit- und Ohnefall betrachtet und durch Differenzbildung die Nutzenkomponenten der Maßnahme bestimmt. Diese Nutzenkomponenten können monetär (Nutzen-Kosten-Analyse) oder über Nutzwertpunkte (Nutzwertanalyse) aggregiert und den Investitionskosten gegenübergestellt werden.

Im nationalen und internationalen Kontext ist sich die Wissenschaft und Praxis zunehmend einig, dass vor einer Durchführung von Straßenverkehrsmaßnahmen mit hohen Investitionskosten es notwendig ist, auch die Auswirkungen auf die Nutzer bzw. gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen bei der Entscheidung für oder gegen eine Maßnahme zu betrachten.

Diese Ansätze der Erhaltungsplanung von Bauwerken sind später auch auf Fragen der Kritikalität und zivilen Sicherheit von Infrastrukturen erweitert worden. Es wird ermittelt, welche Auswirkungen sich im Verkehrsnetz und indirekt gesamtwirtschaftlich ergeben, wenn Bauwerke z. B. durch extreme Wetterverhältnisse oder terroristische Anschläge ausfallen, wobei hier zusätzlich die komplexen Fragen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten zu diskutieren sind.

Die folgende Literaturanalyse gibt einen Einblick über bereits entwickelte Verfahren im Bereich der Erhaltungsplanung von Brücken und Tunneln zur Bewertung ihrer Kritikalität, Priorisierung oder zur Anwendung von Nutzen-Kosten-Analysen bei der Entscheidung über den Einsatz bestimmter Maßnahmen. Sie soll ein kurzes Panorama über beste-

<sup>5</sup> Es ist aber bei jeder Anwendung zu klären, inwiefern die Vereinfachungen der Markov-Kette auf den untersuchten Prozess zutreffen.

hende Projekte und Studien bezogen auf die Erhaltung, Erneuerung und Erweiterung von Bauwerken schaffen. Des Weiteren werden insbesondere im internationalen Kontext Literaturquellen angeführt, die sich mit den gängigen Methoden der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung der Verkehrsplanung auseinandersetzen und sie diskutieren. Das Aufzeigen der unterschiedlichen Literaturangaben macht deutlich, dass sowohl im nationalen als auch im internationalen Kontext die gesamtwirtschaftlichen Kosten von Maßnahmen im Verkehr Berücksichtigung finden und in die Nutzen-Kosten-Analyse von Transportprojekten integriert und z. T. vorgeschrieben werden, indem verschiedene Indikatoren mit u. a. national vorgegebenen Kostensätzen versehen und monetarisiert werden. Häufig werden Indikatoren wie Reisezeit, Betriebskosten, Klima- und Schadstoffemissionen oder Unfallkosten betrachtet. Die Wirkungen werden i. d. R. mithilfe von Verkehrsmodellen oder anderen innovativen Berechnungsmodellen ermittelt. Aus diesem Grund werden auch im vorliegenden Projekt diese und weitere Indikatoren bei der Berechnung gesamtwirtschaftlicher Wirkungen von verkehrseinschränkenden Maßnahmen mitberücksichtigt.

### **2.10.1 Verbundprojekt SKRIBT – Schutz kritischer Brücken und Tunnel, verkehrsbezogene Objektanalyse [144]**

Im Verbund-Forschungsprojekt SKRIBT ist u. a. ein automatisiertes Verfahren zur Bestimmung der Kritikalität von Bauwerken an Straßen (Tunnel und Brücken) erarbeitet worden.

Zur Beschreibung der Kritikalität von Brücken und Tunneln aus verkehrlicher Hinsicht wurde die Größe Mehrreisezeit, die sich infolge eines Teil- oder Komplettausfalls des Bauwerks pro durchschnittlichen Werktag und in Abhängigkeit verfügbarer Alternativrouten mit ihren Kapazitäten (Verkehrsangebot) und der gegebenen Verkehrsnachfrage (motorisierten Individualverkehr und Schwerverkehr) ergibt, herangezogen. Durch das Setzen einer Zulässigkeitschranke, die das 10%-Perzentil der Bauwerke mit den höchsten Mehrreisezeiten gegenüber den weiteren Bauwerken abgrenzt, ist es möglich, in einem ersten Ansatz kritische von weniger kritischen Bauwerken zu trennen.

Im Rahmen der beispielhaften Anwendung des Verfahrens wurden zunächst die Bauwerke in einem Teilnetz des PTV-eigenen deutschlandweiten Stra-

ßennetz- und Verkehrsmodell PTV Validate verortet. Im nächsten Schritt wurden die zu untersuchenden Bauwerke als Points of Interest (POI) in das Netzmodell eingelesen. Dies geschah unter Zuhilfenahme des Programms PTV Visum. PTV Validate enthält neben dem Verkehrsangebot auch die Verkehrsnachfrage in Form einer Verkehrsnachfragematrix. Durch die Umlegung der Verkehrsnachfragematrix auf das Straßennetz konnten Verkehrsbelastungen sowohl für das unbeeinflusste Netz (Bezugsfall) als auch für die Fälle mit Teil- oder Vollsperrung jeweils eines Bauwerks (Planfälle) ermittelt werden, aber auch weitere Auswertungen, wie z. B. die Betrachtung von Verkehrsleistung und Verkehrsbeteiligungsdauer, oder die Auslastung von Netzelementen etc., waren möglich. Der verwendete Ausschnitt des Teilnetzes wurde so gewählt, dass ein weiträumiges Ausweichen des Verkehrs auf Alternativrouten richtig abgebildet werden konnte.

Es wurden nur Bauwerke entlang von Bundesautobahnen und Bundesstraßen betrachtet. Bei den Anwendungsfällen mit Voll- und Teilsperre wurde von einer Restkapazität des Bauwerks von 0 % und 50 % ausgegangen. Hinsichtlich der Auswirkungen im Straßennetz sind unterschiedliche Zeiträume betrachtet worden.

Bei der Entwicklung des Kritikalitätsmaßstabes liegt als Kenngröße für die Bewertung der Kritikalität die absolute Veränderung der Reisezeit bezogen auf einen durchschnittlichen Werktag im Netz im Vergleich Bezugsfall/Planfall zugrunde. Die Auswertung der Reisezeiten erfolgt bezogen auf die unmittelbar von der Maßnahme betroffenen Verkehrsteilnehmer. Da grundsätzlich davon ausgegangen wird, dass die verkehrlichen Auswirkungen einer Teil- oder Vollzeitsperre von der Tageszeit abhängig sind, d. h. insbesondere die Hauptverkehrszeit entscheidend ist, und in der Nebenverkehrszeit eher mit geringeren Effekten zu rechnen ist, sind dynamische Aspekte bei der Berechnung mit einzubeziehen, um Verzerrungen der Ergebnisse vorzubeugen. Aus diesem Grund ist ein Korrekturfaktor ermittelt worden, der ausdrückt, inwieweit die Reisezeitverluste der Sperrungen von extremen Spitzenbelastungen geprägt sind und daher von mittleren Reisezeitverlusten bei gleichmäßiger Auslastung abweichen.

Auf Basis dieses Verfahrens und seiner Ausgestaltung konnten demnach 150 Bauwerke hinsichtlich ihrer Kritikalität mit dem Ziel betrachtet werden, den

Wertebereich für die Veränderung der Reisezeiten und den Korrekturfaktor für dynamische Effekte bei Sperrungen und Teilspernung zu ermitteln. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Bauwerke sich bezogen auf Mehrreisezeiten und der daraus abgeleiteten Kritikalität deutlich voneinander unterscheiden. Es gibt Bauwerke, bei denen sich die Kritikalität sowohl bei Voll- als auch bei Teilspernung gleichermaßen gibt; Bauwerke, die unter Vollsperrung als kritisch einzustufen sind, jedoch bei Teilspernung nicht zu dem 10%-Perzentil gehören; sowie Bauwerke, die bei Teilspernung kritisch zu bewerten sind, bei einer Vollsperrung jedoch nicht zu dem kritischen 10%-Perzentil gehören.

### **2.10.2 Verbundprojekt SRIBT<sup>Plus</sup> – Schutz kritischer Brücken und Tunnel – AP 6 Modellsystem Wirksamkeiten – Kritikalitätsverfahren [145]**

Im Rahmen des Teilvorhabens „Wirksamkeiten für Nutzer und Verkehr“ des Forschungsprojektes SKRIBT<sup>Plus</sup> (Schutz kritischer Brücken und Tunnel) wurde im Bereich Verkehr das im Verbund-Forschungsprojekt SKRIBT erstellte Verfahren zur Identifizierung der verkehrlichen Kritikalität von Brücken und Tunneln weiterentwickelt. Ziel des Projekts war die Erstellung eines automatisierten Verfahrens zur Bestimmung der Kritikalität von Bauwerken an Straßen (Tunnel und Brücken) bei einer Voll- bzw. Teilspernung hinsichtlich der resultierenden Mehrreisezeiten.

Die Weiterentwicklung besteht im Wesentlichen darin, dass die Anzahl erfasster Wirkungen ausgeweitet wurde. Dies bedeutet, dass neben den Mehrreisezeiten ebenfalls Änderungen der Klimagas- und Luftschadstoffemissionen sowie des Unfallgeschehens betrachtet werden. Zudem findet eine Transformation der Teilergebnisse in Geldwerte statt, um eine einheitliche, monetäre sowie vergleichbare Kennzahl zu erhalten.

Für die Kritikalitätsbestimmung wurden zwei Ansätze entwickelt. Zum einen kann die Summe der für alle drei Teilergebnisse entstandenen Kosten herangezogen werden, zum anderen steht über diese zusammengefasste, monetäre Kennzahl hinaus ein alternativer Ansatz zur Verfügung, der eine differenzierte Betrachtung der zu berücksichtigenden Wirkungen ermöglicht. Als Kritikalitätsmaß wurde das 5%-Perzentil normativ festgelegt.

Wie bereits beim SKRIBT-Verfahren wurden bei den Anwendungsfällen die Voll- und Teilspernung, die sogenannten Planfälle, mit jeweiligen Kapazitäten von 0 und 50 % versehen. Die Berechnungen für die Vollsperrung wurden für alle Bauwerke ausgeführt, während die Teilspernung bei der weiterentwickelten Methodik nur für Brücken und Tunnel angewendet wurde, die aus zwei richtungsgetrennten Teilbauwerken bestehen. Außerdem wurden die Wirkungen der (Teil-)Sperrung auch für die vom Ereignis indirekt betroffenen Verkehrsteilnehmer auf den Ausweichrouten befindend, erfasst.

Neben den zwei betrachteten Planfällen wurden die Berechnungen für den sogenannten Basisfall bei voller Nutzbarkeit durch den motorisierten Individualverkehr sowie Schwerverkehr des Bauwerks durchgeführt, um ein Referenzsystem für den netzweiten Vergleich zu gewährleisten.

Die Indikatorenbildung zu den drei verschiedenen Wirkungsbereichen wurde mithilfe von verschiedenen Quellen unterstützt. Die Bereitstellung der Emissionsfaktoren erfolgte in PTV Visum nach HBEFA 3.1 (Handbuch für Emissionsfaktoren) [211]. Die weiteren zur Ermittlung des Unfallgeschehens erforderlichen Kennwerte, wie die streckenspezifischen Unfallraten und die Anteile der spezifischen Unfallfolgen an den gesamten Unfällen (z. B. der Anteil Unfälle mit Getöteten an allen Unfällen mit Personenschaden), wurden aus der Fortschreibung der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) aus dem Jahr 2010 [163] bzw. Datenreihen des Bundesamtes für Statistik [164] entnommen.

In Bezug auf Klimagas und Luftschadstoffe wurden Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Stickoxid (NO<sub>x</sub>) und Partikel (PM) betrachtet und separat für die Fahrzeugarten des motorisierten Individualverkehrs sowie für den Schwerverkehr ausgewertet. Als Ergebnis wurden die absoluten Emissionskennwerte in Tonnen über alle Straßen summiert und die Differenz zwischen dem jeweiligen Plan- und Basisfall gebildet. Hinsichtlich der Veränderung des Unfallgeschehens, das sich aus der geänderten Routenwahl infolge einer (Teil-)Sperrung ergibt, wurde bei den Unfällen zwischen Personen- und Sachschäden differenziert.

Um den Indikatoren einen monetären Wert zuzuordnen und damit die volkswirtschaftlichen Kosten zu bestimmen, wurden indikatorspezifische Kostensätze benötigt. Für die Monetarisierung der einzelnen Wirkungsbereiche wurde ein einheitliches

Wertgerüst mit mehreren anerkannten Quellen verwendet, um die Konsistenz mit der Wirksamkeits-Kosten-Analyse zu gewährleisten. Zur Bewertung der ermittelten Teilindikatoren zum Unfallgeschehen mit Personenschaden wurden die Wertansätze aus der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP 2030) [126] herangezogen. Diese Wertansätze basieren auf den Kostensätzen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [209], ergänzt um einen sogenannten „Risk-Value“, der die Zahlungsbereitschaft der Verkehrsteilnehmer zur Reduzierung des eigenen Unfallrisikos angibt. Die BASt hat weiterhin Kostensätze zur Bewertung von Sachschäden publiziert, die im Rahmen der Kenngrößenmonetarisierung zur Anwendung gebracht wurden. Alle Kostensätze repräsentieren den Preisstand des Jahres 2012. Für die Monetarisierung der Emissionswerte wurden die monetären der Methodenkonvention des UBA [165] entnommen. Für die Erstellung der Mehrreisezeitkosten wurden Werte für den nicht-gewerblichen Verkehr verwendet, die in der Bundesverkehrswegeplanung von 2015 angegeben sind. Der entsprechende Kostensatz für den Personenverkehr wurde aggregiert über die Fahrtzwecke Arbeit, Freizeit und Einkauf sowie alle Verkehrsmittel und alle Entfernungsklassen wurden angegeben [166]. Für den gewerblichen Personenverkehr wurde ein Kostensatz verwendet, der laut Statistischen Bundesamt den durchschnittlichen Arbeitskosten des Jahres 2012 je Arbeitsstunde entspricht [167]. Da die Zeitkostensätze personenstundenbezogen vorliegen, die zugrundeliegenden Kenngrößen aus Visum dagegen in Fahrzeugstunden ausgewiesen sind, erfolgte eine Umrechnung durch den von MID 2008 angegebenen durchschnittlichen Besetzungsgrad von 1,5 Personen/Fahrzeug [168]. Für den Güterverkehr werden Personalkosten entsprechend der Methodik des BVWP im Rahmen der Betriebskosten berücksichtigt, daher entfällt ein entsprechender Zeitkostensatz für den Güterverkehr.

Je nach betrachtetem Indikator stellen sich unterschiedliche Ergebnisse ein. Durch die Betrachtung der einzelnen Teilergebnisse lassen sich die unterschiedlichen Größenordnungen der Kosten sowie die aus den Sperrungen resultierenden Verlagerungen mit negativen, aber zum Teil auch positiven Auswirkungen in den jeweiligen Wertebereichen erkennen.

So wie im SKRIBT-Projekt wurde diese Anwendungsmethodik auch in der Weiterentwicklung insgesamt für 150 im Verkehrsmodell für Nord-

rhein-Westfalen verortete Tunnel und Brücken durchgeführt. Die Berechnungen wurden mittels der makroskopischen Verkehrsmodellierungssoftware PTV Visum und einem Teilnetz des deutschlandweiten Verkehrsmodells PTV Validate automatisch durchgeführt. Die auf Tagesbasis erzeugten Kenngrößen wurden auf den bauwerkspezifischen Wiederherstellungszeitraum hochgerechnet, um die ereignisbezogenen volkswirtschaftlichen Kosten aufzuzeigen. Die Berücksichtigung der bauwerkspezifischen Sperrzeit kann ggf. zu anderen Verteilungen und entsprechend anderen Einschätzungen hinsichtlich der Kritikalität einzelner Brücken und Tunnel führen, als die tagesbezogene Betrachtungsweise des vorherigen SKRIBT-Ansatzes. Ein Teil vom Straßennetz der Nachbarbundesländern sowie der Nachbarstaaten (Niederlande und Belgien) wurden ebenfalls abgebildet. Darüber hinaus wurde eine zusätzliche Differenzierung der Tunnel und Brücken nach ihrer Lage innerorts und außerorts vollzogen. Bild 9 visualisiert den Ablauf des Verfahrens.

Bei der Auswertung der Ergebnisse dieser beispielhaften Anwendung des Verfahrens konnte festgestellt werden, dass sich bei Anwendung des ersten Ansatzes, bei der die Summe der volkswirtschaftlichen Kosten des Teil- oder Vollaussfalls unter Berücksichtigung aller drei Indikatoren gebildet wird, meist zusätzliche Kosten ergeben, also die negativen Wirkungen des Teil- bzw. Vollaussfalls überwiegen. Dieser Umstand beruht auf der Tatsache, dass der Indikator Mehrreisezeit das Gesamtergebnis dominiert, dessen Wert in den meisten Fällen die aus den zwei anderen Wirkungsbereichen gelegentlich resultierenden Kostenersparnisse überschreitet. Bei einer Teilsperrung ergeben sich partiell etwas andere Ergebnisse, da die Bauwerke bei einem Teilaussfall noch befahrbar sind und weniger Umwege in Kauf genommen werden müssen.

Beim zweiten Ansatz, bei dem die drei Wirkungsbereiche getrennt angeschaut werden, stellen sich je nach Indikator unterschiedliche Ergebnisse ein. Es lässt sich erkennen, dass hinsichtlich der Mehrreisezeit, die Kapazitätsreduktion im Planfall gegenüber dem Basisfall immer zu erhöhten Reisezeit(-kosten) im Netz führt. In Bezug auf die zwei anderen Indikatoren kann die Sperrung sogar positive Effekte bei bestimmten Netzverhältnissen aufweisen. Positive Effekte bei der Emissionsberechnung lassen sich dadurch erklären, dass die Menge der emittierten Schadstoffe für die definierten Verkehrszusammensetzungen von mehreren Parametern abhängig ist.

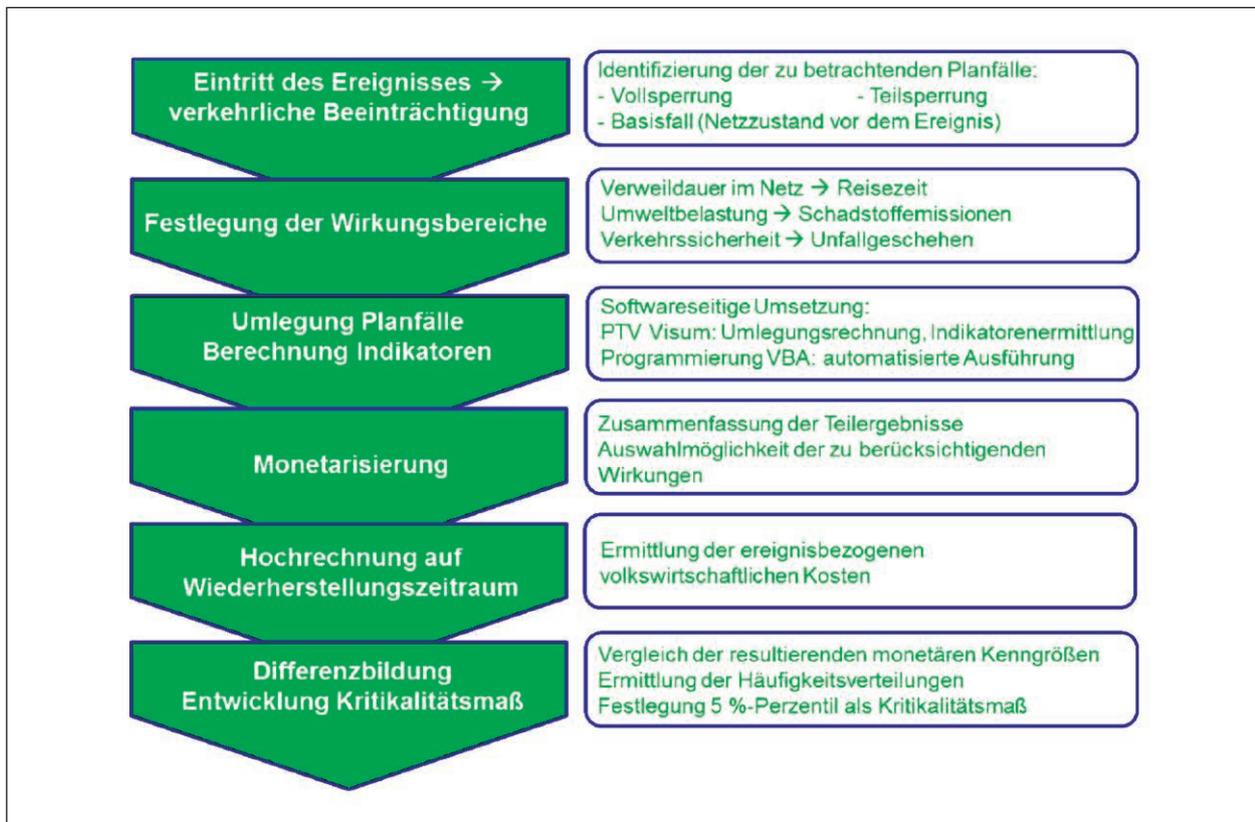


Bild 9: Ablauf des SKRIPT Verfahrens [eigene Darstellung nach [145]]

In Summe allerdings weisen die aus der Bauwerkssperrung resultierenden Verkehrsverlagerungen bei der Mehrheit der Bauwerke auf eine Zunahme der Umweltbelastung hin. Auch beim Indikator „Unfallgeschehen“ resultieren Änderungen der Unfallkosten aus Verlagerungen zu anderen Streckenabschnitten und geänderten Fahrleistungen. Bei der Mehrheit der Bauwerke bei Vollsperrung ist allerdings mit einer Unfallkostenerhöhung zu rechnen. Im Gegensatz dazu zeigt die Kostenverteilung bei Teilspernung, dass der Anteil der Bauwerke mit Mehrkosten nur etwa bei knapp 50 % liegt.

Zusammenfassend ist herauszustellen, dass durch die Betrachtung der einzelnen Indikatoren bei der Kritikalitätsermittlung, sich andere Häufigkeitsverteilungen ergeben – hinsichtlich der Mehrreisezeit lassen sich andere Bauwerke als kritisch bezeichnen als auf der Basis der zusätzlichen Emissionskosten oder der veränderten Unfallkosten. Darüber hinaus können bei diesem Ansatz die ggf. positiven Wirkungen einer Bauwerkssperrung durch die Kostenersparnisse besser identifiziert werden.

Mit der gezielten Erweiterung des Kritikalitätsbestimmungs-Verfahrens wird die aktualisierte Beurteilung der verkehrlichen Kritikalität sowie in techni-

scher Hinsicht eine verbesserte Bedienbarkeit des Verfahrens gewährleistet. Das entwickelte Bewertungstool dient als fundierte Beurteilungsgrundlage, mit dessen Hilfe Straßenbauverwaltungen und -betreiber in die Lage versetzt werden, aus verkehrlicher Sicht kritische Bauwerke innerhalb des in ihrem Verantwortungsbereich liegenden Straßennetzes besser zu erkennen.

### 2.10.3 Verbundprojekt SKRIBT<sup>Plus</sup> – Schutz kritischer Brücken und Tunnel – Erweitertes Identifizierungsverfahren [146]

Angesichts der großen Zahl der Brücken und Tunnel sind Kenntnisse über ihre Kritikalität in Bezug auf die zivile Sicherheit eine grundlegende Voraussetzung für notwendige Entscheidungen in einer effizienten, ressourcenschonenden Umsetzungsplanung.

Bei der Erweiterung des Verfahrens zur Identifizierung kritischer Bauwerke, kurz „Identifizierungsverfahren“ im Rahmen des Verbundprojekts SKRIBT<sup>Plus</sup>, wurde daher die Bestimmung der Kritikalität eines Verkehrsbauwerks in Bezug auf des-

sen zivile Sicherheit unter der Berücksichtigung aller objekt- sowie netzrelevanten Einflussfaktoren vorgenommen, d. h. es wurden neben verkehrlichen, auch bauliche und nutzerseitige Aspekte beachtet. Zur Bestimmung der Kritikalität eines Tunnels oder einer Brücke im vorliegenden Verfahren ist es notwendig, die Risiken von möglichen Groß- bzw. Initialereignissen, die Einfluss auf das Bauwerk, den Nutzer und Verkehr haben, zu bestimmen und anschließend die Werte für den besseren Vergleich zu homogenisieren. Dieses Verfahren ist für Personen geeignet, die sicherheitstechnische Überprüfungen von Bauwerken vornehmen wollen, und wirkt unterstützend, wenn es um die Vorbereitung weiterer Entscheidungsschritte im Rahmen einer möglichen Schutzmaßnahmenauswahl und -umsetzung geht.

Im Rahmen einer Bedrohungsanalyse wurden zunächst diejenigen Ereignisse, die als mögliche Gefahren für Brücken- und Tunnelbauwerke gelten, identifiziert, beschrieben und im Hinblick auf ihre Relevanz analysiert. Wie bereits erwähnt, wurden Ereignisse betrachtet, die das Bauwerk zerstören oder beschädigen, die direkten Nutzer gefährden und/oder den Verkehr beeinträchtigen. Diese drei Komponenten (Bauwerk, Nutzer, Verkehr) bildeten die Zielgrößen in dem entwickelten Identifizierungsverfahren. In der Bedrohungsanalyse wurden die Ereigniskategorien Brand, Explosion, Kontamination sowie Naturereignisse als relevant identifiziert. Für diese Kategorien sind anschließend Initialereignisse definiert worden, die die Ausgangspunkte für die Entwicklung maßgebender Szenarien in Abhängigkeit der vorhandenen baulichen, betrieblichen und organisatorischen Randbedingungen bilden.

Wie weiter oben aufgeführt geht es bei der Bewertung der Kritikalität eines Tunnels oder einer Brücke nicht nur allein um das mögliche Schadensausmaß, sondern insbesondere um das Risiko eines Ereignisses. Um dieses Risiko eines Initialereignisses zu definieren, wurde die Methode der ‚Quantitativen Risikoanalyse‘ verwendet. Für das Initialereignis wurden einzelne Szenarien in Form eines Ablaufbaums angenommen, die aufgrund der Beeinflussung verschiedener Randbedingungen<sup>6</sup> variieren. Die unterschiedlichen Verzweigungsmöglichkeiten im zugehörigen Ereignisablaufbaum wurden mittels

Expertenabschätzung oder statistischer Auswertungen quantifiziert und ergaben in Kombination die Verlaufswahrscheinlichkeiten. Die verschiedenen Szenarien haben unterschiedliche Schadensausmaße zur Folge. Für jedes Szenario wurden die Eintrittswahrscheinlichkeit des Endzustandes und das korrespondierende Schadensausmaß ermittelt. Die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Initialereignissen ist problematisch und kann derzeit nicht pauschal geleistet werden. Während Ereignisse infolge von menschlichem/technischem Versagen wie z. B. Großunfälle statistisch untersucht werden können und durch Analyse der bisherigen Ereignisse Aussagen zu einer Eintrittswahrscheinlichkeit eines Unfallereignisses erarbeitet werden kann, ist diese Vorgehensweise für eine Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit infolge von natürlichen Extremereignissen oder kriminellen bzw. terroristischen Ereignissen nicht zielführend. Die praktische Umsetzung erfolgte daher durch eine Gewichtung der Initialereignisse untereinander, indem zunächst alle Eintrittswahrscheinlichkeiten mit einem Wert 1,0 angesetzt wurden. Die Verlaufswahrscheinlichkeiten bestimmten dementsprechend die Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen Szenarios und erlaubten einen relativen Vergleich.

Die Indikatoren zur Berechnung der Schadensausmaße für Brücken und Tunnel sind die Wiederherstellungskosten, für die Nutzer die Anzahl der Getöteten und für den Verkehr die Mehrreisezeit. Die verkehrlichen Auswirkungen von Ausfällen oder Teilausfällen der Brücken oder Tunnel auf das Straßennetz ließen sich quantitativ mittels Verkehrsmodellen ermitteln. In SKRIBT<sup>+</sup> wurden die Berechnung des Schadensausmaßes weiterentwickelt und zusätzlich zur Wirkung Mehrreisezeit auch Änderungen der Emissionen der Luftschadstoffe und Klimagase sowie des Unfallgeschehens betrachtet. Im Rahmen des erweiterten Identifizierungsverfahrens wurden allerdings nur die Mehrreisezeiten als alleiniger Indikator angeschaut.

Aus dem vorher beschriebenen Verfahren bildet sich dann das Risiko eines Szenarios. Das Gesamtrisiko des Initialereignisses ergibt sich aus der Summe der mit ihrem Schadensausmaßes verknüpften Eintrittswahrscheinlichkeiten:

$$\text{Risiko} = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \times \text{Schadensausmaß}$$

Zusätzlich wird das Risiko mit einer Aversionsfunktion  $I_{AV}$  gewichtet, da seltenere Szenarien mit größeren Ausmaßen erstens von der Öffentlichkeit als

<sup>6</sup> Betriebliche, organisatorische oder verkehrliche Randbedingungen, wie z. B. die Aktivierung des Lüftungssystems, das Eintreffen der Einsatzdienste, Stau oder Einsatzort.

schlimmer empfunden werden und zweitens zu stärkeren oder rascheren Reaktionen wie z. B. Gesetzesänderungen führen. Daher nimmt die Bedeutung von Risiken überproportional mit dem Schadensausmaß zu.

Die durch die Aversion bewerteten Risiken stellen die gewichteten Risikoerwartungswerte dar und sind die Eingangsgrößen für das Identifizierungsverfahren. Sie lassen sich anschließend für die gesetzten Initialereignisse und die relevanten Zielgrößen in einer Matrix zusammenfassen.

Die Matrix umfasst die Risikoerwartungswerte bzw. Schadensausmaße in verschiedenen Einheiten und Größenordnungen. Damit die Ergebnisse für Bauwerk, Nutzer und Verkehr miteinander verglichen werden konnten, musste eine Homogenisierung stattfinden. Die vorgenommene Homogenisierung ist die Überführung in dimensionslose Beurteilungsgrößen, wie sie z. B. im Schulnotensystem zu finden sind. Eine Übertragungsfunktion überträgt das ermittelte Schadensausmaß der Zielgröße in eine Beurteilungsklasse. In der praktischen Umsetzung des Identifizierungsverfahrens wurden die Eingangsgrößen wie erläutert in Einzel-Beurteilungsgrößen umgeformt, d. h. in dimensionslose Größen eines 5-stufigen Bewertungssystems umgerechnet, wobei Klasse 1 als bestes Ergebnis und Klasse 5 als schlechtestes gewertet wird (Bild 10).

Der horizontale Ansatz lässt eine Aussage über die zielgrößenübergreifende Wirkung treffen und die Beurteilungsgrößen werden zu einer Kritikalitätsbewertung der einzelnen Initialereignisse zusammen-

gefasst. Beim vertikalen Ansatz ist eine initialereignisübergreifende Zusammenfassung der Beurteilungsgrößen für die einzelnen Zielgrößen möglich.

Das Gesamtrisiko lässt sich nun anhand der Zusammenfassung der Kritikalitätsbewertungsgrößen – je nach zuvor gewähltem Ansatz – zielgrößenübergreifend bzw. initialereignisübergreifend, zu einer Gemittelten Gesamt-Kritikalität GGK ermitteln. Hierbei besteht die Möglichkeit des Anwenders, Prioritäten durch Gewichtung der Bewertungsgrößen vorzunehmen. Das bedeutet, es kann ein Initialereignis und seine Schäden als wichtiger bewertet werden, als andere, je nachdem, welcher Fokus gesetzt werden soll.

Die Matrix zur prinzipiellen Vorgehensweise der Zusammenfassung der gewichteten Kritikalitätsbewertungsgrößen zu einem Wert für die Gemittelte Gesamt-Kritikalität GGK in idealer Form wird in Bild 11 wiedergegeben.

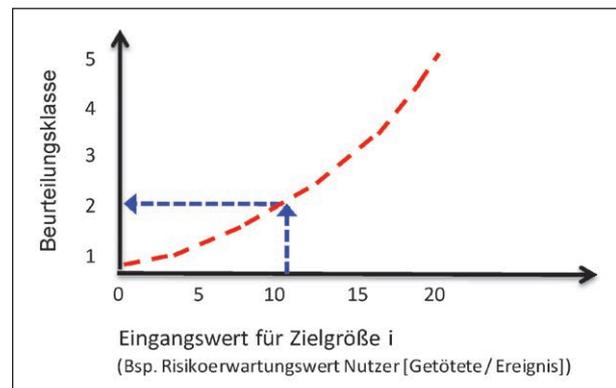


Bild 10: Beispiel einer Übertragungsfunktion [eigene Darstellung nach [146]]

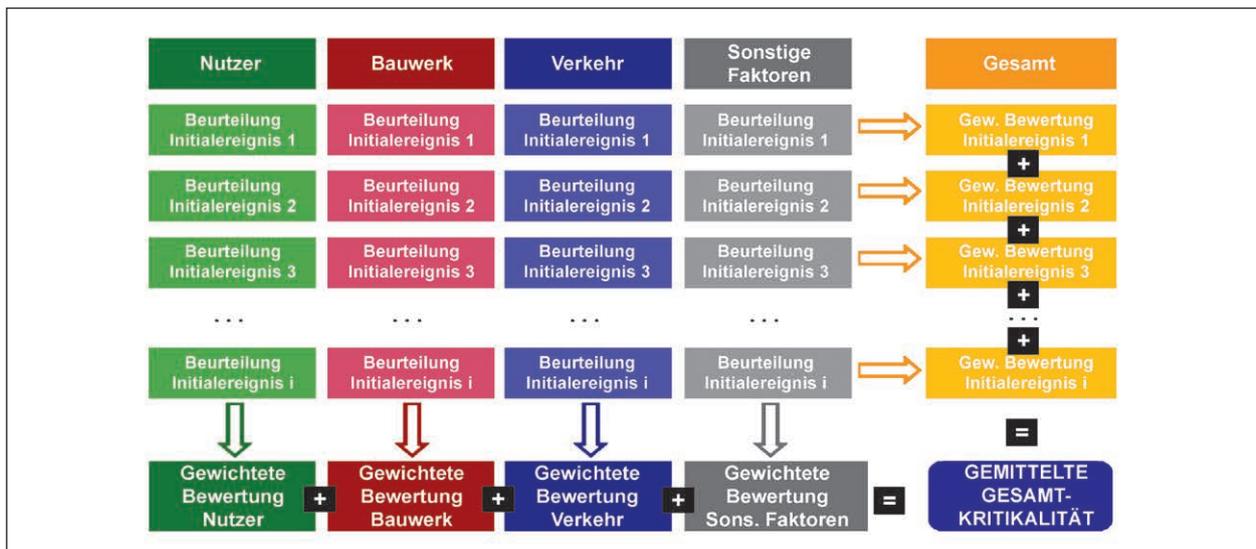


Bild 11: Matrix zur prinzipiellen Vorgehensweise der Zusammenfassung der gewichteten Kritikalitätsbewertungsgrößen zu einem Wert für die Gemittelte Gesamt-Kritikalität GGK [eigene Darstellung nach [146]]

Die Beurteilung der Kritikalität erfolgt anschließend anhand eines Vergleichs des vorliegenden Gesamtrisikos in Form des Wertes für die Gemittelte Gesamtkritikalität mit einem Grenzwert, der das Grenzkrisiko wiedergibt. Das Grenzkrisiko stellt dabei das gerade noch von der Gesellschaft akzeptierte Risiko dar. Liegt der Kritikalitätswert (Gesamtrisiko) über dem Grenzwert (Grenzkrisiko), so besteht Handlungsbedarf zur Gewährleistung der zivilen Sicherheit.

#### 2.10.4 Methodik für eine optimierte Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken [147]

Im F+E-Vorhaben „Entwicklung einer Methodik für eine optimierte Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen“ wurde ein prototypisches Verfahren entwickelt, das für ein Teilnetz der Bundesfernstraßen Ertüchtigungs- und/oder Erneuerungsmaßnahmen an Brücken in ein optimiertes Ertüchtigungsprogramm überführt, um die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen durch Nichtverfügbarkeit oder beschränkte Nutzbarkeit der Brücken zu minimieren. Zur Laufzeit des Projekts gab es keine Beschränkung bzgl. des für die Umsetzung des Ertüchtigungsprogramms zur Verfügung stehenden Personals oder Budgets, daher stand bei der Erarbeitung der Ertüchtigungsprogramme insbesondere die Abschätzung der Auswirkungen der parallelen Durchführung von Maßnahmen an mehreren Brücken im Fokus. Aus diesem Grund mussten zum einen alle verkehrlichen Wechselwirkungen bei gleichzeitigen

Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Brücken im Verkehrsmodell angemessen berücksichtigt werden. Zum anderen war ein Optimierungsverfahren zu entwickeln, das erstens für einen sehr großen Lösungsraum geeignet ist, da die Möglichkeit, frühzeitig (Teil-)Lösungen mit zu hohen Kosten auszuschließen, entfällt, und zweitens die aufgrund der verkehrlichen Abhängigkeiten auftretenden nicht-additiven Nutzenkomponenten mit einbezieht.

Im Verlauf des Projektes wurden prototypische Methoden für verschiedene Stufen einer optimierten Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken konstruiert. Darunter fallen Ansätze zur Vorselektion von Bauwerken, eine Methodik zur Analyse von Ertüchtigungsoptionen und eine Methodik zur Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme. Bei allen Ansätzen wurden bauliche und verkehrliche Aspekte berücksichtigt (vgl. Bild 12).

Mit dem Vorselektionsverfahren kann eine Einschätzung darüber getroffen werden, ob unter baulichen Aspekten ein unmittelbarer Maßnahmenbedarf besteht und ob ein Bauwerk der Kategorie „Ersatzneubau erforderlich“, „Ertüchtigung erforderlich“ oder „Keine Maßnahme des Umbaus erforderlich“ zugeordnet wird. Bereits über Angaben zum Baujahr und zum Hauptbaustoff sind für viele Bauwerke erste Einstufungen möglich. Vertiefende Betrachtungen beziehen die gängigen Verfahren der BASt (Priorisierungssystem und Tragfähigkeitsindex) ein.

Des Weiteren ist es möglich, vor dem Hintergrund der Bedeutung des Bauwerks im Straßennetz (ver-

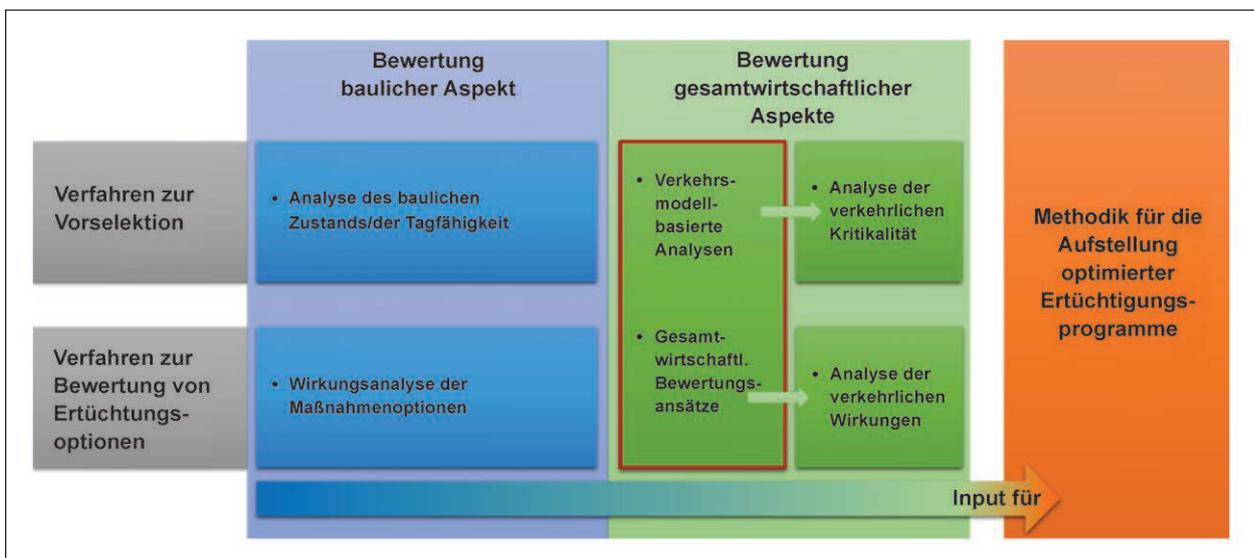


Bild 12: Verkehrsmodellierung und gesamtwirtschaftliche Bewertungsansätze [eigene Darstellung nach [147]]

kehrliche Vorselektion), den Stellenwert einer Maßnahme unter verkehrlichen Aspekten zu beurteilen. Es kann eingeschätzt werden, ob während der Maßnahmendurchführung mit großen negativen verkehrlichen Wirkungen zu rechnen ist. Hierfür konnte das im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens SKRIBT [144] entwickelte und im Rahmen des EU-Projekts SeRoN [172] sowie insbesondere des BMBF-Fördervorhabens SKRIBT<sup>Plus</sup> [145] weiterentwickelte Verfahren zur Bewertung der Kritikalität von Bauwerken als Basis verwendet werden. Zur Berechnung der verkehrlichen Kritikalität der Brücken in NRW wurde die makroskopische Verkehrsplanungssoftware PTV Visum eingesetzt und ein Teilnetz des deutschlandweiten Straßennetz- und Verkehrsdatenmodell PTV Validate als Datenbasis verwendet. Die untersuchten Brücken wurden exemplarisch im Teilnetz verortet und dabei als Points of Interest (PoI) im Netz abgelegt. Mit dem Verkehrsmodell ließen sich die Auswirkungen für die direkt und indirekt betroffenen Verkehrsteilnehmer berechnen. Hierfür wurde der hypothetische Planfall dem Bezugsfall gegenübergestellt. Der Bezugsfall stellt dabei das ungestörte Netz dar, in dem die untersuchten Brücken uneingeschränkt genutzt werden können. Der Planfall hingegen repräsentiert die Situation bei Nichtnutzung der Brücke oder einer Brücke mit Nutzungseinschränkung durch verkehrseinschränkende Maßnahmen<sup>7</sup>. Relevant sind die gesamtwirtschaftlichen Kosten bei Vollsperrung, bei verkehrseinschränkenden Maßnahmen sowie die Anzahl der baulich kritischen Bauwerke auf den Alternativrouten. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten setzen sich aus den Komponenten Veränderung der Reisezeiten, der Schadstoff- und Klimagasemissionen sowie des Unfallgeschehens zusammen. Bei den Luftschadstoff- und Klimagasemissionen wurden NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC, Partikel (PM) und SO<sub>2</sub> untersucht. Beim Indikator Unfallgeschehen wurde nach Personen- und Sachschäden unterteilt. Zur Wertsynthese wurden die jeweiligen Indikatorwerte über aktuelle Kostensätze aus dem Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung 2030 [126] monetarisiert.

Zusätzlich spielt die Anzahl baulich kritischer Brücken auf den Alternativrouten eine Rolle. Die Anzahl der auf den Alternativrouten gelegenen Brücken mit

Erneuerungs- oder Ertüchtigungsbedarf sind relevant für die Bewertung ihrer verkehrlichen Kritikalität. Sie sind besonders dann von Interesse, wenn durch eine Brückensperrung größere Verkehrsmengen auf andere Brücken verlagert werden, deren Tragfähigkeitsgrenzen bereits erreicht sind. Bei der Aggregation der drei Kriterien wurden die monetarisierten Größen mit der nicht-monetarisierbaren Größe (Anzahl Bauwerke) verknüpft und analysiert.

Zur Überprüfung der Methodik wurde diese auf ein Beispiel mit sechs wichtigen Brücken angewendet. Als Untersuchungsraum wurden die Rheinquerungen in Nordrhein-Westfalen zwischen Bonn und Duisburg gewählt. Die Anwendung beinhaltete das Verfahren zur Vorselektion von Bauwerken, die Bewertung und Reihung der Handlungsoptionen auf Objektebene und die Berechnung eines optimierten Ertüchtigungsprogramms.

Nachdem eine Vorselektion der baulich und verkehrlich kritischen Brücken in einem Teilnetz stattgefunden hat, wurde das Verfahren zur Bewertung von Ertüchtigungsoptionen entwickelt und angewendet. Es wurde hinsichtlich der baulichen Aspekte eine Wirkungsanalyse der Maßnahmenoptionen durchgeführt. In Bezug auf die gesamtwirtschaftlichen Aspekte und die Bewertung von Ertüchtigungsoptionen wurden dieselben verkehrsmodellbasierten Analysen sowie gesamtwirtschaftlichen Bewertungsansätze wie beim Verfahren der Vorselektion angewendet. Die Bewertung der Maßnahmenoptionen erfolgte über zwei Bewertungskriterien. Es wurde nach Kosten- und Nutzenseite unterschieden und die folgenden Merkmale betrachtet:

Auf der Kostenseite:

- die Investitionskosten der Ertüchtigungs- oder Erneuerungsmaßnahmen.

Auf der Nutzenseite:

- die negativen verkehrlichen Nutzen, die aufgrund von Verkehrseinschränkungen während der Durchführung der Maßnahme entstehen.
- Die ggf. negativen verkehrlichen Nutzen, die aufgrund von tragfähigkeitsbedingten Verkehrseinschränkungen vor der Durchführung der Maßnahme entstehen.
- Die ggf. vermiedenen negativen verkehrlichen Nutzen im Bewertungszeitraum aufgrund der durch die Realisierung von Maßnahmen nicht mehr erforderlichen zustandsbedingten Verkehrseinschränkungen.

<sup>7</sup> Verkehrseinschränkende Maßnahmen sind z.B. die Sperrung für Lkw, Überholverbot (für Lkw), Abstandsgebot für Lkw, Einschränkungen/Verbot für genehmigungspflichtigen Schwerverkehr sowie Maßnahmen zur Spurführung.

- Die Veränderung des Restwerts des Bauwerks aufgrund von durchgeführten Erneuerungsmaßnahmen.

Die Verfahren der Vorselektion sowie zur Bewertung von Ertüchtigungsoptionen und ihre Ausgestaltung hinsichtlich baulicher und gesamtwirtschaftlicher Aspekte bilden den Input für die Methodik zur Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme. Das Optimierungsziel des Forschungsvorhabens war es, eine Methodik zur Aufstellung von Ertüchtigungsprogrammen für Teilnetze (mit maximal 50 Bauwerken mit jeweils maximal 4 Ertüchtigungsoptionen) zu erarbeiten. Es sollte für das gewählte Teilnetz ein möglichst hoher gesamtwirtschaftlicher Nutzen generiert bzw. die zustands- oder maßnahmenbedingten Nutzerkosten möglichst geringgehalten werden. Es ist davon ausgegangen worden, dass die gleichzeitige Durchführung von Maßnahmen an mehreren Bauwerken im Teilnetz möglich sein wird, aufgrund des Fehlens einer Budgetrestriktion.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auf der Ebene der Optimierung von Ertüchtigungsprogrammen das Fehlen von Budget- und anderen Kapazitätsrestriktionen dazu führte, dass ein sehr großer Lösungsraum durchsucht werden muss. In der Folge konnten mit den innerhalb des Projektes entwickelten Verfahren zwar optimale und vor allem auch fachlich plausible Ertüchtigungsprogramme für kleinere Teilnetze abgeleitet werden, jedoch sind für die Anwendung auf Teilnetze mit einer größeren Anzahl von Brücken zusätzliche Kriterien zur Einschränkung des Lösungs- bzw. Suchraums zu entwickeln.

#### **2.10.5 Informationen über Alternativrouten als Grundlage für objektbezogene Bewertungsverfahren im BMS [148]**

Im Projekt „Informationen über Alternativrouten als Grundlage für objektbezogene Bewertungsverfahren im Bauwerk-Management-System (BMS)“, wurde für die objektbezogene Erhaltungsplanung in dem vom Bund und Land entwickelten BMS eine Nutzen-Kosten-Analyse in Bezug auf Maßnahmenvarianten in volkswirtschaftlicher Hinsicht für einzelne Brücken in Begleitung der Länder erarbeitet und durchgeführt. Die Ergebnisse dienen als Input für die netzweite Optimierung des BMS.

Volkswirtschaftliche Kosten treten überwiegend in der Phase der Durchführung von Maßnahmen auf, wenn es durch diese zu Einschränkungen des Ver-

kehrsraums kommt. Solche Beeinträchtigungen können in Abhängigkeit vom Aufkommen zu Staus auf der Hauptroute oder zu Ausweichfahrten über Alternativrouten führen.

Im Rahmen der Bestandsaufnahme zu existierenden Alternativrouten im Netz der Bundesfernstraßen konnte festgestellt werden, dass Umleitungsstrecken nur selten bauwerksbezogen festgelegt oder gar in einer Datenbank abgelegt sind, und dass standardisierte Vorgehensweisen für die Festlegung von Umleitungsstrecken nicht existierten. Damit lag keinerlei Information vor, ob überhaupt eine oder mehrere Alternativrouten mit relevanter Restkapazität für die Aufnahme des ausweichenden Verkehrs vorliegen, wo im Netz diese Alternativrouten verlaufen und welchen Umfang die volkswirtschaftlichen Mehrkosten bei anteiliger Benutzung einer Alternativroute annehmen.

Vor diesem Hintergrund wurde das Forschungsprojekt initiiert, um Kennzahlen für Streckenabschnitte in Abhängigkeit von deren Charakteristik zu ermitteln, die eine Bestimmung der gesamtwirtschaftlichen Kosten bei Benutzung identifizierter Alternativrouten ohne explizite Berechnung im Netz ermöglichen.

Für die Verortung der Bauwerke standen Bauwerksdaten aus Nordrhein-Westfalen zur Verfügung. Zudem ist die Knoten- und Streckenfolge der Bundesfernstraßen genutzt worden. Nach der Lokalisierung jedes Sachverhalts am Bauwerk im Verkehrsmodell Validate lagen für den jeweiligen dazugehörigen Streckenabschnitt (Hauptroute) folgende Informationen zur Verfügung:

- Streckentyp, Anzahl Fahrstreifen und Kapazität sowie
- Lage der Brücke im Raum (Regionstyp).

Bei der Identifizierung der Alternativrouten wurde in vier Szenarien unterschieden:

1. Basissituation ohne Beeinträchtigung der Kapazität der Hauptroute
2. Sperrung eines Fahrstreifens einer Richtung
3. Verschwenkung und Verengung der Fahrstreifen einer Richtung
4. Sperrung für Lkw

Es ist für jede betrachtete Verkehrseinschränkung auf der Hauptroute eine Alternativroute bestimmt worden. Um die durch die Beeinträchtigungen des

Verkehrs entstehenden volkswirtschaftlichen Kosten berechnen zu können, wurden für jedes Szenario für den Fall mit und ohne Maßnahme die Auswirkungen auf der Hauptroute und der Alternativroute berechnet. Es sind mit Ausnahme der Lkw-Spernung alle Situationen für die Hauptverkehrszeit und Normalverkehrszeit durchgerechnet worden.

Die Auswirkungen wurden nach den folgenden Indikatoren betrachtet:

1. Reisekosten
2. Betriebskosten
3. Kraftstoffkosten
4. Unfallkosten
5. Kosten der Klimabeeinträchtigung

In einem nächsten Schritt sind nun für jedes Szenario die jeweiligen Kosten gemäß der Methodik des BVWP-Verfahrens [173] ohne und mit Maßnahme auf der Haupt- und Alternativroute über alle fünf Indikatoren addiert. Insgesamt lagen damit für jedes betrachtete Paar „Hauptroute und Alternativroute“ neben den Eigenschaften der Hauptroute selbst für jedes der betrachteten Szenarien die volkswirtschaftlichen Kosten mit und ohne Maßnahme und die entsprechenden Kenngrößen als Quotient hieraus vor.

Anschließend wurden die Kenngrößen durch eine Clusterung noch weiter zusammengefasst. Insgesamt wurden 30 Cluster gebildet und der Mittelwert der Kenngrößen der zum jeweiligen Cluster gehörenden Fälle berechnet. Diese Mittelwerte sind die gesuchten Kenngrößen, die zur Schätzung der volkswirtschaftlichen Mehrkosten verwendet werden.

#### **2.10.6 Optimierungsstrategie zur Priorisierung voneinander abhängiger Bauprojekte von Straßen- und Ingenieurbauwerken [149]**

Bei der mittelfristigen Erhaltungsplanung für einen Streckenzug oder ein Teilnetz müssen bzgl. der Festlegung der Priorität von Baumaßnahmen am Straßenkörper und Bauwerken unterschiedliche Aspekte berücksichtigt werden. Dazu zählen im Wesentlichen die aktuellen Bauwerks- und Streckenzustände, die Verfügbarkeit der Investitionsmittel, die Auswirkungen von Baumaßnahmen auf den Verkehrsablauf sowie mögliche zukünftige Um- und Ausbauabsichten.

Die Problematik ist, dass die Planungen im Straßensektor grundsätzlich getrennt für den Neu- und Ausbau auf der einen Seite und für Erhaltungsmaßnahmen auf der anderen Seite stattfinden, die für die objektbezogene Sichtweise in vielen Fällen wieder zusammengeführt werden müssen. Außerdem sind für beide Bereiche die Etats getrennt und die von der Bundeshaushaltsordnung (BHO) geforderten Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei Investitionen werden in den einzelnen Bereichen sehr unterschiedlich gehandhabt.

Insbesondere bei komplexen Szenarien einer Planung von Baumaßnahmen mit Streckenbezügen, die absehbar eines Ausbaus bedürfen und gleichzeitig Straßenbefestigungen und Ingenieurbauwerke umfassen, an denen ebenfalls nicht unerhebliche Erhaltungsmaßnahmen durchzuführen sind, tritt diese Problematik zu Tage.

Aus diesen Gründen war das Ziel des Forschungsprojektes „Optimierungsstrategie zur Priorisierung voneinander abhängiger Bauprojekte von Straßen- und Ingenieurbauwerken“ eine Vorgehensweise zu entwickeln, die eine hinsichtlich der verkehrlichen Auswirkungen optimierte Abwicklung von Baumaßnahmen auf einem einzelnen Streckenzug ermöglicht. Das zu entwickelnde Verfahren sollte also die Maßnahmen der baulichen Erhaltung in Kontext zu den streckenzugsbezogenen Um- und Ausbauabsichten setzen und eine übergeordnete Priorisierung der Maßnahmen vorschlagen. Es wurden als Bauwerke nur Brücken betrachtet.

Unter Berücksichtigung der dafür relevanten Randbedingungen sind entsprechende Parameter ermittelt worden, mit denen letztendlich die Priorisierung auf einem zu betrachtenden Streckenzug durchgeführt werden konnte. Auf Basis dieser Prioritäten wurde ein übertragbarer Ansatz erarbeitet, der die derzeit voneinander unabhängig angewendeten Priorisierungssysteme (Um-/Ausbau- und Erweiterungsmaßnahmen aus der aktuellen Bedarfsplanung, Erhaltungsmaßnahmen der Fahrbahnen, Erhaltungsmaßnahmen der Ingenieurbauwerke und Ertüchtigungsmaßnahmen in den objektbezogenen Untersuchungen an Brücken der BAST) miteinander verknüpft.

Das Verfahren ist in fünf Phasen mit jeweils mehreren Verfahrensschritten gegliedert. Im ersten Schritt geht es um das Einpflegen der Eingangsdaten und Randbedingungen, während darauffolgend die Datenaufbereitung stattfindet, indem alle Maßnahmen in eine einheitliche Struktur überführt werden. Beim

Aufbau des Lösungszeitraums sind die zusammengestellten Maßnahmen in die richtige zeitliche Reihenfolge zu bringen. Es werden Maßnahmenbündel erzeugt, Teilprojekte mit eindeutigen Realisierungszeitpunkten erstellt, sowie Projekte generiert. Ein Projekt enthält pro Teilabschnitt maximal zwei Teilprojekte (ein Teilprojekt je Richtung), welche die Realisierungszeitpunkte, der in dem Teilabschnitt durchzuführenden Maßnahme eindeutig festlegen.

Im darauffolgenden Bewertungsschritt werden die Projekte grundsätzlich hinsichtlich der Erfüllung der folgenden Ziele bewertet:

- Minimierung der zusätzlichen Nutzerkosten in der Durchführungsphase von übergreifenden Erhaltungs- und Ausbaustrategien,
- frühestmögliche Verfügbarkeit der Streckenkapazitäten für die Nutzer,
- Maximierung der Nutzen für die Verkehrsteilnehmer nach einer Ausbaumaßnahme,
- Maximierung des Substanzwertes und Minimierung der Investitionskosten.

Es werden die während der Durchführung und nach Abschluss von Baumaßnahmen auftretenden Veränderungen der Nutzerkosten im jeweils betrachteten Netzabschnitt quantifiziert, indem ausgesuchte Bewertungsgrößen herangezogen werden. Darunter fällt z. B. die Nutzungseinschränkung aus Geschwindigkeitsreduktion. Hierbei ist die Differenz zwischen Reisezeit ohne Baustelle/mit Baustelle ausschlaggebend und wird getrennt in privaten und gewerblichen Pkw sowie Schwerverkehr und an-

schließend über die entsprechenden Kostensätze des BVWP 2030 [126] monetarisiert.

Eine weitere Bewertungsgröße stellt die Nutzeneinschränkung aus Stauereignissen dar. Durch die Kapazitätsreduktion kann es zu einem Stauereignis kommen. Dies wird über Nutzungsausfallkosten nach dem Handbuch für die Vergabe und Ausführung von Bauleistungen im Straßen- und Brückenbau (HVA B-StB) [208] berechnet.

Außerdem wird als Bewertungsgröße die Aktivierung des positiven Nutzens nach der Bauaktivität betrachtet, die durch die Fertigstellung einer Baumaßnahme einsetzt. Diese Wirkung wird ebenfalls mittels der Methoden des BVWP 2030 [126] erfasst und quantifiziert.

Des Weiteren müssen Verkehrsverlagerungseffekte mit einbezogen werden, da sich ein Teil der Verkehrsteilnehmer aufgrund bestehender Baustellen Ausweichrouten suchen wird. Auch der verlagerte Verkehr kann zu berücksichtigenden Zeitverlusten unterliegen.

Bei der anschließenden Ableitung optimaler Gesamtlösungen besteht das Ziel in der Identifizierung der besten Kombination von Abschnittslösungen, d. h. für jeden Abschnitt ist ein Projekt so auszuwählen, dass einerseits der Gesamtnutzen maximiert wird, also insbesondere die Nutzerkosten minimiert werden, und andererseits die vorgegebenen jährlichen Budgetgrenzen nicht überschritten werden.

Bild 13 veranschaulicht den Ablauf des Priorisierungsverfahrens.

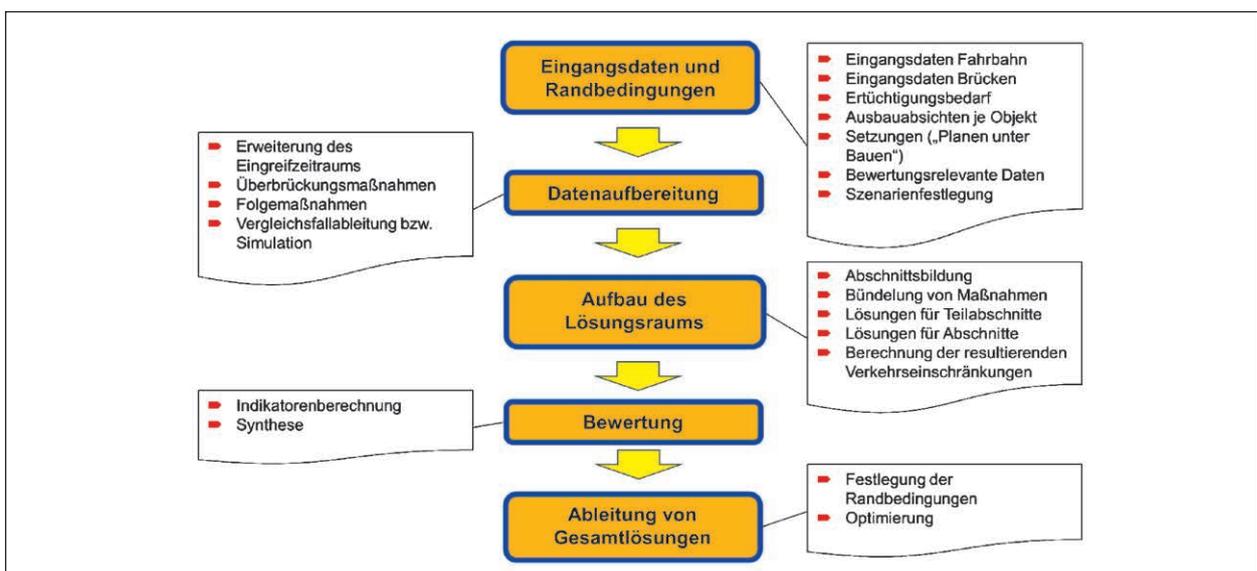


Bild 13: Gesamtablauf des Priorisierungsverfahrens [eigene Darstellung nach [149]]

Das Verfahren wurde prototypisch in Form eines Excel-Tools am Beispiel des Streckenzugs der A 45 zwischen dem Autobahnkreuz Hagen in Nordrhein-Westfalen und dem Autobahnkreuz Gambach in Hessen implementiert. Ziel der Implementierung war nicht die Programmierung einer Endanwender-Software zu Priorisierung von Maßnahmen auf Knopfdruck, sondern die Bereitstellung eines möglichst einfachen Tools, das beispielhaft für jeden Verfahrensschritt eine Möglichkeit der Umsetzung zeigt.

Es wurde ein Betrachtungszeitraum von 10 Jahren für den Planungszeitraum gewählt, an den sich ein Folgekostenzeitraum mit einer Länge von 15 Jahren anschließt, in dem die längerfristigen Folgen von Maßnahmen abgeschätzt und bewertet wurden.

### **2.10.7 RI-WI-BRÜ – Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken [124]**

Die Richtlinie Ri-Wi-Brü aus dem Jahre 2002 befasst sich mit der wirtschaftlichen Beurteilung von Erhaltungsmaßnahmen und dem direkten Vergleich zu Erneuerungsmaßnahmen bei Brücken.

Im Rahmen von Maßnahmen im Straßenbau sind nach § 7 Bundeshaushaltsordnung (BHO) für Maßnahmen mit erheblicher gesamtwirtschaftlicher Relevanz Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchzuführen. Auch für Erhaltungsmaßnahmen sollen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zunehmend Berücksichtigung finden.

Die Richtlinie befasst sich mit der wirtschaftlichen Beurteilung von Erhaltungsmaßnahmen ausschließlich bei Straßenbrücken. Wirtschaftlich ist eine Maßnahme nicht schon dann, wenn die Baukosten möglichst gering sind. Vielmehr sind für einen definierten Betrachtungszeitraum alle relevanten Folgekosten der Entscheidung Instandsetzung oder Erneuerung aufzuzeigen, d. h. mit welchen Folgemaßnahmen, die wiederum Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen darstellen, innerhalb des Bewertungszeitraums zu rechnen ist. Ziel der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ist es also, Maßnahmen zu identifizieren, die mit vertretbarem Mitteleinsatz zu einer möglichst langen Nutzungsdauer der instandgesetzten oder erneuerten Straßenbrücken führen und mit möglichst geringen Erhaltungskosten in der Folge verbunden sind.

Zur Betrachtung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses werden finanzmathematische Verfahren angewendet, die einen gemeinsamen Bewertungszeitraum aller miteinander zu vergleichenden Maßnahmen voraussetzen. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung basiert auf angenommenen Nutzungsdauern für die verschiedenen Maßnahmen, um nicht nur die Baukosten, sondern auch alle Folgekosten (Zweitmaßnahmen) der möglichen Maßnahmen berücksichtigen zu können. In einer Matrixstruktur werden vorausgehend weitere Beurteilungsgrößen wie Fragen des Umweltschutzes und der bauzeitlichen Verkehrsführung berücksichtigt, um eine realitätsnahe Planungs- und Entscheidungsgrundlage zur Verfügung zu stellen.

Eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung dient als Bewertungsinstrument zur Identifizierung der Variante mit den geringsten diskontierten Gesamtkosten und stellt damit eine Entscheidungshilfe bei der Steuerung und Planung im konkreten Einzelfall dar. Wesentliche Größen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen sind Schätzwerte oder plausible Annahmen, deren Einfluss auf das Berechnungsergebnis durch Sensitivitätsuntersuchungen abgeschätzt werden kann. Insbesondere erhält man die endgültigen Baukosten erst nach Abrechnung der Baumaßnahme.

Das in der Richtlinie enthaltene Rechenverfahren bietet die Möglichkeit, verschiedene Erweiterungsmaßnahmen ökonomisch gegeneinander abzuwägen. In der Praxis sind Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen entweder bei haushaltswirksamen Erhaltungsmaßnahmen mit Auftragsvolumen von mehr als 3 Mio. Euro durchzuführen, wie z. B. größere Instandsetzungsmaßnahmen bestehender Straßenbrücken, oder bei Erneuerungsmaßnahmen, deren Auftragsvolumen 50 % der reinen Baukosten des Bauwerks zum heutigen Preisstand übersteigt.

### **2.10.8 Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030 für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [126]**

Die Bundesregierung ist nach dem Grundgesetz verantwortlich für Bau und Erhaltung der Bundesverkehrswege. Grundlage für die Erhaltung, Entwicklung und den Ausbau der Verkehrsinfrastruktur sind die Bundesverkehrswegepläne (BVWP). Ein Bundesverkehrswegeplan wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur aufge-

stellt und vom Bundeskabinett beschlossen. Beim BVWP handelt es sich um ein Rahmenprogramm und Planungsinstrument, er hat jedoch keinen Gesetzescharakter sowie keine feste Gültigkeitsdauer. Es besteht allerdings die Verpflichtung, die auf dem Bundesverkehrswegeplan beruhenden Ausbaugesetze alle fünf Jahre zu überprüfen. Bei deutlichen Abweichungen von den ursprünglichen Planungen und Annahmen, ist eine Änderung der Ausbaugesetze vorzusehen. Der BVWP bildet die Grundlage für den Gesetzentwurf der Bundesregierung zur Änderung der Ausbaugesetze für die Bundesverkehrsinfrastruktur mit den zugehörigen Bedarfsplänen für die drei Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße. Der BVWP 2030 soll vordringlich Mobilität und Versorgung ermöglichen. Gleichzeitig sollen die mit der Verwirklichung dieses zentralen Ziels einhergehenden positiven Effekte verstärkt und die nicht vermeidbaren negativen Effekte reduziert werden.

Die Dringlichkeitseinstufung der Projekte des BVWP 2030 baut auf den Ergebnissen eines umfassenden Bewertungsverfahrens zur Priorisierung von Verkehrsprojekten auf, welches im zum BVWP 2030 zugehörigen Methodenhandbuch umfassend nachvollziehbar dargelegt ist. Dieses Verfahren berücksichtigt die unterschiedlichen relevanten Wirkungen anstehender Verkehrsprojekte mithilfe des Vergleichs Planfall/Bezugfall und führt sie derart zusammen, dass qualifizierte Aussagen zu ihrem Umsetzungsbedarf getroffen werden können. Das Bewertungsverfahren besteht aus vier Bewertungsmodulen, wobei ein Modul die Nutzen-Kosten-Analyse darstellt, bei dem diejenigen Wirkungen eines Projektes betrachtet werden, die quantifiziert und in monetäre(n) Größen umgewandelt werden können.

Das Methodenhandbuch zum BVWP 2030 [126] liefert alle Informationen über das Bewertungsverfahren zur Priorisierung von Neu- und Ausbauprojekten innerhalb der jeweiligen Verkehrsträger. Es enthält eine Beschreibung des Verfahrens mit einer Detaillierungstiefe, die ein umfangreiches Verständnis der Quantifizierungs- und Berechnungsansätze des Verfahrens ermöglicht.

Die Bewertungsverfahren, die zur Dringlichkeitsreihung der Projekte genutzt werden, bedürfen eines Zielsystems. Dieses, zumeist aus einer Reihe von Ober- und Unterzielen bestehende System, beschreibt einen gewünschten Zustand, der mittels der geplanten Projekte erreicht werden soll. Das Bewertungsverfahren ermittelt dann, inwiefern die

Projekte zur Erreichung dieser Ziele beitragen und mit welchem Aufwand bzw. mit welchen Kosten diese Zielerreichung verbunden ist.

Dabei werden die Wirkungen der Projekte mit Bezug zum oben erwähnten Zielsystem ermittelt und zusammengefasst, sodass sie anhand definierter Kenngrößen miteinander verglichen werden können. Diese ermittelten Kenngrößen werden im Zuge der vier Bewertungsmodule des BVWP 2030 ermittelt. Die Kenngrößen, die im Rahmen der Nutzen-Kosten-Analyse ermittelt werden, beschreiben diejenigen Wirkungen des Projektes, die quantifiziert und in monetäre(n) Größen angegeben oder umgewandelt werden können. Diese Wirkungen werden entweder der Nutzen- oder der Kostenseite des Verkehrsprojektes zugeordnet. Die Nutzenkomponenten sind u. a. die Veränderungen der Betriebskosten, der Abgasbelastungen, der Verkehrssicherheit, Reisezeit im Personenverkehr, Transportzeit, der Zuverlässigkeit, Instandhaltungs- und Betriebskosten der Verkehrswege, Lebenszyklusemissionen von Treibhausgasen der Infrastruktur<sup>8</sup>, der Geräuschbelastungen, Veränderung innerörtlicher Trennwirkungen, sowie Nutzen bei konkurrierenden Verkehrsträgern und Nutzen aus verlagerten und indirektem Verkehr. Zu den Kostenkomponenten zählen neben den Aus- und Neubaukosten des betrachteten Projektes auch deren Planungskosten, soweit sie nicht bereits vor Beginn des Betrachtungszeitraums angefallen sind. Zukünftige Instandhaltungskosten werden auch aufgrund ihrer Verrechenbarkeit mit der bestehenden Infrastruktur bei Ausbaumaßnahmen auf der Nutzenseite geführt.

Für eine Bewertung beim Verkehrsträger Straße muss das routenbezogene Verkehrsaufkommen und die Streckenbelastung für Pkw und Lkw differenziert vorliegen. Es wird unterschieden in Fahrzeuggruppen (Pkw und Lkw zur Ermittlung von Betriebskosten und Abgasbelastungen), Antriebsart der Pkw-Fahrzeuge, sowie Fahrtzweck im Personenverkehr zur Differenzierung der Reisezeitgewinne (geschäftliche und nicht geschäftliche Fahrtzwe-

<sup>8</sup> Es werden die Treibhausgasemissionen während des Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur erfasst. Darunter werden alle Treibhausgasemissionen verstanden, die mit den Erstinvestitionen, den Ersatzinvestitionen, der Streckenunterhaltung und dem Betrieb der zu bewertenden Infrastrukturmaßnahme verbunden sind.

cke). Außerdem wird die tages- und jahreszeitliche Verteilung berücksichtigt. Die Wirkungen der Verkehrsprojekte werden für einen definierten Betrachtungszeitraum berechnet, der sich aus der Dauer des Planungs-, Bau- und Betriebszeitraums projektspezifisch ergibt. Die Wirkungsermittlung beruht auf dem Vergleich des Planfalls mit dem Bezugsfall. Der Planfall stellt den Zustand der Verkehrsinfrastruktur und zusätzlich das Bedienungsangebot der fahrplanbasierten Verkehrsmittel mit Umsetzung des zu bewertenden Projektes dar. Der Bezugsfall hingegen beschreibt den Zustand der Verkehrsinfrastruktur und zusätzlich das Bedienungsangebot der fahrplanbasierten Verkehrsmittel ohne Umsetzung des zu bewertenden Projektes.

Die Bewertungsrechnungen basieren auf der Abbildung der verkehrlichen Mengengerüste in Verkehrsmodellen. Somit entsteht die Anforderung einer Datenübertragung zwischen den eingesetzten Verkehrsmodellen und dem Bewertungsverfahren und der Definition von Schnittstellen. Die Schnittstellen zwischen den Verkehrsmodellen und dem Bewertungsverfahren werden gegliedert nach drei Nutzenbereichen. Dem Bereich Infrastruktur, dem Bereich Verkehrsteilnehmer und zuletzt dem Bereich Fahrzeugbetrieb, mit den jeweiligen zugehörigen Indikatorenwerten<sup>9</sup>.

Anschließend werden diese, in der Nutzen-Kosten-Analyse erfassten, auf Basis eines Wertesystems monetarisierten Wirkungseffekte in ein Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) gebracht, was die Gegenüberstellung der Summe aller Projektnutzen mit den Gesamtkosten des Projektes bedeutet. Ist das NKV größer als 1, überwiegen die Nutzen des Projektes dessen Kosten und das Projekt kann als prinzipiell gesamtwirtschaftlich vorteilhaft eingestuft werden.

### **2.10.9 Reliability-based assessment procedures for existing concrete structures structural engineering [136]**

Ziel dieser Studie war es, ein transparentes Bewertungsverfahren für die Restlebensdauerbewertung von Betonbauwerken unter Verwendung der Zuverlässigkeitstheorie und statistischer Werkzeuge aufzuzeigen.

Die Verwendung von Zuverlässigkeitsmethoden für Bewertungszwecke ist in Schweden ein unkonventioneller Ansatz. Daher wurde versucht, Informationen aus internationalen Quellen zu sammeln und sie auf schwedische Bedingungen anzuwenden.

Nachdem die Grundlage für die Methodik gelegt worden war, wurden zwei Testfälle, einen Staudamm aus Beton und eine Eisenbahnbrücke, durchgeführt. Ziel war die Anwendbarkeit und Nützlichkeit der Zuverlässigkeitstheorie als ein Werkzeug zur Bewertung der Restlebensdauer von Betonbauwerken zu untersuchen. Es wurden Vergleiche zwischen deterministischen und probabilistischen Untersuchungen durchgeführt.

Die bisher bestehenden Methoden geben deterministische Schätzungen zur Restlebensdauer. Nach Meinung des Autors ist dies kein realistischer Ansatz aufgrund der Höhe der Unsicherheiten für viele der maßgeblichen Parameter in den Alterungsmodellen. Probabilistische Modelle, die Teil der Zuverlässigkeitstheorie sind, würden eine bessere Entscheidungshilfe bieten, da wichtige Parameter über Sensitivitätsanalysen identifiziert und die Restlebensdauer als Überlebenswahrscheinlichkeit dargestellt werden könnten. Generell gilt, dass Restlebensdauerprognosen nicht länger als 10 bis 15 Jahre gültig sein dürften. Auf der Grundlage dieser Schlussfolgerungen werden Modelle vorgeschlagen, die sich für die Aufnahme neuer Daten aus Monitoringmaßnahmen eignen. Informationen aus dem Bereich der medizinischen Statistik und Robotik legen nahe, dass lineare Regressionsmodelle für diese Art des aktualisierten Monitorings gut geeignet sind. Sie enthalten vereinfachte Algorithmen, die sowohl für die manuelle als auch für die automatische Berechnung verwendet werden können.

In der statistischen Medizin gibt es Ansätze zur Erstellung einer Diagnose auf Basis weniger Stichproben, die nützlich sind, wenn begrenzt Informationen verfügbar sind, wie es bei bestehenden Bauwerken der Fall ist. Diese Methoden wurden angewendet, um Alterungsraten zu bestimmen und damit die zukünftige Sicherheit des Bauwerks.

In der Robotik werden häufig rekursive Algorithmen verwendet, um den zukünftigen Zustand basierend auf dem, was bisher passiert ist, vorherzusagen. Dies ist laut Autor ein interessanter Ansatz für die Bewertung der Lebensdauer, wenn Monitoring eingesetzt werden soll.

<sup>9</sup> Veränderung der Reisezeit, Transportzeit, Verkehrssicherheit, Abgasbelastungen usw.

### 2.10.10 Prioritization of bridges and tunnels in earthquake risk mitigation using multicriteria decision analysis [122]

Die Investition in Präventionsmaßnahmen, wie z. B. Ertüchtigungsmaßnahmen und Verbesserungen von Bauwerken in Regionen mit hoher seismischer Bedeutung, zielt darauf ab, einen Beitrag zur Verringerung des Risikos und Ausmaßes von Erdbebenschäden zu leisten. Die Prozesse zur Ertüchtigung von Brücken und Tunneln sind extrem teuer und zeitaufwändig und die zuständigen Behörden haben für ihre Wartung und Reparatur nur begrenzte finanzielle und personelle Ressourcen.

Wie von PHILLIPS und BANA E COSTA [122] festgestellt, muss zur Priorisierung eine Methode angewendet werden, die das maximale Ergebnis mit den vorhandenen Ressourcen erzielt, das heißt eine Rechnung verwendet, die den risikogewichteten Nutzen durch die Kosten teilt. Hierfür ist eine detaillierte seismische Inspektion jeder Brücke und jeden Tunnels notwendig, um zu entscheiden, welche Strukturen nachgerüstet werden müssen und die entsprechenden Kosten für ein akzeptables Risiko zu berechnen. Insgesamt gilt, je höher das Ausmaß der Seismizität, seine Bedeutung und Vulnerabilität, desto höher der Gesamtnutzen der Ertüchtigung eines Bauwerks.

Für den Aufbau des multikriteriellen Modells wurde der MACBETH-Ansatz (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) verwendet, ein auf Differenzmessung basierender Ansatz, der nur qualitative Bewertungen über Attraktivitätsgefälle benötigt, um die relative Attraktivität bzw. Priorität der Brücken und Tunnel zu quantifizieren. Der auf dem additiven Wertemodell basierende Ansatz zielt darauf ab, interaktives Lernen über Probleme und die Ausarbeitung von Empfehlungen zu unterstützen, um Bauwerke in Einzel- oder Gruppenbewertungsprozessen zu priorisieren und auszuwählen.

Generell wurden zwei Hauptproblembereiche für die Bewertung der Brücken und Tunnel identifiziert: Die seismische Anfälligkeit und strategische Bedeutung des Bauwerks. Die Einschätzung des Staates über die Verwundbarkeit jeder Infrastruktur in der Region ist grundlegend für die Priorisierung von Brücken und Tunneln. Die Anfälligkeit einer Brücke oder eines Tunnels setzt sich aus seinen bauwerksbedingten Eigenschaften und die Höhe der seismischen Gefahr am Standort zusammen.

Bei der Bewertung der strategischen Bedeutung der Bauwerke wurden vier Kriterien berücksichtigt, die grundlegende Anliegen für die Umsetzung von Notfallmaßnahmen reflektieren:

- öffentliche Sicherheit,
- Notfallmaßnahmen (sofort nach einem Erdbeben),
- lokale wirtschaftliche Auswirkungen (während der Neupositionierung der Normalität) und
- Interferenz mit anderen Versorgungsleistungen.

Um den Grad der Vulnerabilität einer Brücke oder eines Tunnels abzuschätzen, wurde eine Methode entwickelt, die eine vierstufige, qualitative Skala ergab. Außerdem ist für jedes der vier Kriterien eine quantitative Erfolgsmessung hinsichtlich der strategischen Bedeutung entwickelt worden, um die zu erwartenden Folgen des Funktionsverlustes des Bauwerkes möglichst objektiv abzuschätzen.

Die Methode erforderte einen detaillierten Datenerfassungsprozess. Es wurde eine Datenbank erstellt, in der Informationen über relevante strukturelle Merkmale der Tunnel und Brücken, die lokale seismische Anfälligkeit, die Anzahl der Straßen auf den Brücken und Tunneln und unter den Brücken, die Straßennetzhierarchie, die Anzahl der Fahrspuren und Richtungen sowie die Verkehrsmittelwerte und die Strukturverbindung mit Versorgungsleistungen gespeichert wurden.

Um die Ebenen der Vulnerabilität der zehn ausgewählten Brücken und Tunnel zu bestimmen, mussten mehrere Kettenanfragen an die Datenbank gestellt werden. Die erste Abfrage wählte die Informationen zu den verschiedenen Brücken und Tunneln aus dem Untersuchungsgebiet; die zweite Abfrage betraf das Alter und die strukturellen Merkmale der Bauwerke. Diese Prozedur ermöglichte das Clustering der verschiedenen Bauwerke nach vordefinierten Klassen. Dann wurden Fragilitätskurven verwendet, um die Klassen der erhaltenen Tunnel und Brücken mit der seismischen Anfälligkeit der Zone in Beziehung zu setzen.

Zur Abschätzung der Folgen für die öffentliche Sicherheit, wurden die durchschnittlichen Verkehrswerte der umliegenden Straßen ermittelt. Es war möglich, die durchschnittlichen täglichen Verkehrswerte für den Zeitraum zwischen 7 Uhr und 9 Uhr zu schätzen und, eine gleichmäßige Verteilung des Verkehrs innerhalb dieses Zeitraums vorausge-

setzt, die Anzahl der Fahrzeuge pro Minute zu erhalten. Unter der Annahme einer spezifischen Fahrzeugbelegungsrate konnten schließlich die Konsequenzen für die öffentliche Sicherheit gemessen werden.

Die Ermittlung der Wirkungen in Bezug auf Notfallmaßnahmen begann mit der Identifizierung der Hilfskräfte, die aktiviert werden können, wenn ein Unfall innerhalb des kritischen seismischen Risikobereichs auftritt. Es war dann möglich, den optimalen Weg in einer normalen Situation zu definieren mit allen Bauwerken im normalen Betrieb ohne Störung. Der nächste Schritt bestand in der Definition der optimalen Wege unter Berücksichtigung, dass eines der Bauwerke nicht nutzbar ist. Unter Verwendung der Ergebnisse des Schadensschätzungsmodells wurde die durchschnittliche Anzahl der Opfer für das kritische Gebiet geschätzt, wobei ein Szenario eines Erdbebens mit seinem Epizentrum im unteren Tejo-Tal und einer Magnitude von 6,5 für den Zeitraum zwischen 9:00 und 18:00 Uhr berücksichtigt wurde. Für jede Brücke oder jeden Tunnel wurde dieser Wert mit dem Zeitverlust multipliziert, der bei dem Ausfall eines Bauwerks im Vergleich zum Normalfall auftritt, um die Anzahl der Routen berücksichtigen zu können, die für die Durchführung des Notfallreaktionsprozesses notwendig sind. Dieses Verfahren erlaubte es, die Anzahl der gebrauchten Stunden zu schätzen, um alle Opfer im kritischen Bereich ins Krankenhaus zu bringen.

Die lokalen wirtschaftlichen Auswirkungen wurden auf der Grundlage des Verlustes der Brauchbarkeit der Straßen und Tunnel innerhalb des Untersuchungsgebiets berechnet. Es wurden die effizientesten Alternativrouten für jedes Bauwerk definiert und mit Geschwindigkeitsbeschränkungen und Kapazitätsverlust versehen (aufgrund der Verringerung der Anzahl der Fahrspuren). Die Gesamtzahl der Verspätungsstunden wurde unter Berücksichtigung der Verkehrswerte und der Zunahme der Entfernung und der Staus auf den Alternativstrecken ermittelt. Mit der Anzahl der Arbeitstage als Maßeinheit wurde schließlich die pro Tag verlorene Arbeitszeit aufgrund des Funktionsverlustes einer Brücke oder eines Tunnels bestimmt.

Die Schätzung der Menge von Interferenzen mit anderen Versorgungsleitungen wurde durch eine Standortüberprüfung der Wasser-, Strom-, Gasversorgungs- und Telekommunikationsnetze durchgeführt. Informationen über das öffentliche Verkehrs-

netz (wie z. B. Eisenbahnnetze und Busspuren) sind ebenfalls berücksichtigt worden.

Für jedes der fünf Kriterien sind die MACBETH-qualitativen Beurteilungen von der Gruppe durchgeführt worden. Dies ermöglichte die Konstruktion von fünf Wertfunktionen, die als Prioritätsfunktionen bezeichnet werden. Die Prioritätsfunktion für ein bestimmtes Kriterium dient dazu, jede Konsequenz innerhalb des jeweiligen plausiblen Bereichs mit einem (relativen) Nutzenscore zu assoziieren bzw. eine Gewichtung vorzunehmen, d. h. dem ein oder anderen Kriterium eine höhere Bedeutung beizumessen.

Die Gesamtpunktzahl, die den Gesamtnutzen der Ertüchtigung jeder der zehn Bauwerke misst, konnte schließlich durch additive Aggregation ihrer Prioritätswerte für die fünf Kriterien identifiziert werden. Je höher die Gesamtpunktzahl ist, desto höher ist die Priorität bei der Erstellung eines detaillierten Inspektionsprogramms.

#### **2.10.11 Life-cycle cost-benefit (LCCB) analysis of bridges from a user and social point of view [143]**

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden wichtige Fortschritte bei der Life-Cycle-Cost-Analyse von Bauwerken, insbesondere bei Offshore-Plattformen, Brücken und kerntechnischen Anlagen, erzielt. Aufgrund der großen Unsicherheiten in Bezug auf die Alterung, den Erhalt und die Vorteile solcher Bauwerke scheint die Analyse auf der Basis stochastischer Modellierung aller signifikanten Parameter die einzige relevante Methode zu sein.

Es gibt jedoch eine große Anzahl von Schwierigkeiten, die nicht nur bei der Modellierung, sondern auch bei der praktischen Umsetzung der derzeit entwickelten Modelle zu beachten sind. Der Hauptzweck des Artikels ist es daher, einige dieser Probleme aus der Sicht des Nutzers und der Gesellschaft zu präsentieren und zu diskutieren. Es wird insbesondere die Notwendigkeit der Einbeziehung der Nutzerkosten im Zusammenhang mit der Instandhaltung von Betonbrücken und der Formulierung optimierter Strategien betont. In vielen Fällen dominieren die Nutzerkosten die Gesamtkosten, sie können sogar mehr als zehnmal höher als die Reparaturkosten liegen und sollten deswegen bei einer realen Abbildung aller Kosten einer Maßnahme mit einbezogen werden.

I. d. R. jedoch werden Nutzerkosten, wie Fahrzeugbetriebskosten, Veränderung in der Reisezeit sowie Unfallkosten, nicht einbezogen, wenn optimale Wartungsstrategien und -entscheidungen getroffen werden.

In der Lebenszykluskostenanalyse (LCC) geht es um die Betrachtung der direkten Kosten wie Inspektion und Reparatur und sie reicht in den meisten Fällen nicht aus. Die Lebenszyklus-Nutzen-Kosten-Analyse (LCCB-Analyse) ist eine erweiterte LCC-Analyse, bei der alle Arten indirekter Kosten sowie Nutzerkosten enthalten sind und wird daher empfohlen. Sie sollte nicht nur bei der Planung neuer Brücken, sondern insbesondere auch bei der Planung von Instandhaltungsstrategien für einzelne Bauwerke sowie für Bauwerksgruppen verwendet werden.

Die LCCB-Analyse wurde bisher nur in wenigen Fällen im Brückenbau eingesetzt. Und dies, obwohl Transportunternehmen in der Regel über sehr begrenzte Ressourcen verfügen, was die Schätzung der Gesamtkosten und das Minimieren der Instandhaltungskosten besonders wichtig macht. Der Hauptgrund liege in einem fehlenden Verständnis zwischen Brückenbauingenieuren, Autobahnbehörden und Politikern hinsichtlich der Vorteile der LCCB-Analyse. Zudem tragen unzureichende Daten über die Brückenbedingungen, ihre Alterung sowie die Nutzerkosten ebenfalls zur spärlichen Anwendung der LCCB-Analyse bei.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bevor eine LCCB-Analyse im Brückenbereich zufriedenstellend durchgeführt werden kann, ist noch viel Forschung erforderlich. Ein großer Teil der bisherigen Arbeit beschränkt sich auf kleinräumige Modelle ohne großen Anwendungsbereich. Ein zuverlässiges lebenszyklusbasiertes Tool muss aus der Sicht des Autors sowohl direkte als auch indirekte Kosten beinhalten. Außerdem müsse ein modernes LCCB-Design auf einem probabilistischen Ansatz basieren.

#### **2.10.12 Status of the nation's highways, bridges, and transit – conditions & performance [155]**

Der Bericht soll Entscheidungsträgern eine objektive Beurteilung der physischen Bedingungen, der betrieblichen Leistung und der Finanzierungsmechanismen von Autobahnen, Brücken und Verkehrssystemen auf der Grundlage ihres derzeitigen

sowie projizierten künftigen Zustands im Rahmen alternativer Zukunftsinvestitionsszenarien bieten. Er gibt einen umfassenden, datengetriebenen Hintergrundkontext zur Unterstützung der Entwicklung und Bewertung von Legislativ-, Programm- und Haushaltsoptionen auf allen Regierungsebenen.

Das US Department of Transportation (DOT) hat eine Reihe von kombinierten Dokumenten zur Verfügung gestellt, die die wichtigsten Analysemethoden einschließlich zukünftiger 20-Jahres-Investitionsszenarien enthalten. Neueste Ansätze von Investitions- und Leistungsanalysen beinhalten nicht nur die Bewertung der direkten den Transportagenturen anfallenden Investitionskosten, sondern berücksichtigen auch die Kosten, die den Nutzern des Verkehrssystems entstehen.

Der wirtschaftliche Ansatz bei der Entscheidungsfindung in Bezug auf Transportinvestitionen muss die Analyse und den Vergleich von Nutzen und Kosten enthalten, denn nur Investitionen, deren Nutzen über ihre Kosten hinausgeht, erhöhen den gesellschaftlichen Wohlstand und gelten daher als wirtschaftlich effizient. Um verlässlich zu sein, müssen solche Analysen angemessen den Bereich der möglichen Kosten und Nutzen und die möglichen Alternativen in Betracht ziehen. Eine umfassende Nutzen-Kosten-Analyse einer Verkehrsinvestition berücksichtigt alle potenziell signifikanten Wirkungen auf die Gesellschaft sowie monetarisiert sie für den Vergleich und die Bewertung.

Die in dem Bericht verwendeten Analysewerkzeuge haben daher diese zusätzliche wirtschaftliche Komponente. Die vorgestellten Szenarien für Autobahninvestitionen werden zum Teil aus dem Highway Economic Requirements System (HERS) entwickelt, das die Autobahninvestitionen anhand von Nutzen-Kosten-Analysen modelliert. Das HERS-Modell quantifiziert Benutzer-, Agentur- und Gesellschaftskosten für verschiedene Arten und Kombinationen von Kapitalverbesserungen. HERS berücksichtigt Kosten im Zusammenhang mit Reisezeit, Fahrzeugbetrieb, Sicherheit, Routinewartung und Emissionen, einschließlich Treibhausgasen.

Schätzungen des Brückeninvestitionsszenarios werden anhand des NBIAS-Modells (National Bridge Investment Analysis System) entwickelt. Im Gegensatz zu früheren Brückenmodellen (und ähnlich zu HERS) integriert NBIAS die Nutzen-Kosten-Analyse in die Bewertung der Investitionen in den

Neubau, aber auch in den Ertüchtigungs- und Ersatzbedarfs.

Die Verkehrsinvestitionsanalyse basiert auf dem Transit Economic Requirements Model (TERM). TERM konsolidiert ältere ingenieurgestützte Bewertungstools und nutzt eine Nutzen-Kosten-Analyse, um sicherzustellen, dass der Investitionsnutzen die Investitionskosten übersteigt.

HERS, NBIAS und TERM haben sich noch nicht so weit entwickelt, dass sie für direkte multimodale Analysen verwendet werden können. Obwohl die drei Modelle eine Nutzen-Kosten-Analyse verwenden, sind ihre Methoden zur Durchführung dieser Analyse sehr unterschiedlich. Jedes Modell basiert auf einer separaten Datenbank und verwendet Informationen, die auf seinen spezifischen Teil des Transportsystems anwendbar sind, und behandelt für jeden Bereich spezifische Probleme.

Die drei in diesem Bericht verwendeten Investitionsanalysemodelle sind deterministisch, nicht probabilistisch: Sie liefern einen einzigen prognostizierten Wert der Gesamtinvestition für ein bestimmtes Szenario und nicht eine Reihe wahrscheinlicher Werte. Infolgedessen ist das Element der Unsicherheit in diesen Projektionen nur für allgemeine Charakterisierungen zugänglich, die auf den Eigenschaften des Projektionsprozesses beruhen; Schätzungen von Konfidenzintervallen können nicht entwickelt werden.

Zusätzlich werden Sensitivitätsanalysen vorgestellt, die die Wirkungen von Szenario-Prognosen auf einige der wichtigsten Annahmen untersuchen. Die Projektionen für das Investitionsszenario in diesem Bericht werden mithilfe von Modellen entwickelt, die den aktuellen Systemzustand und die operative Leistung bewerten und 20-Jahres-Prognosen auf der Grundlage von Annahmen über zukünftiges Wachstum der Reisefahrten und einer Vielzahl von technischen und wirtschaftlichen Variablen erstellen.

## **2.11 Messung sozio-ökonomischer Wirkungen in der Bewertung von Verkehrsprojekten und -maßnahmen**

### **2.11.1 Behandlung sozialer Wirkungen in Verkehrsprojekten im internationalen Vergleich – Literatur- und Bestandsanalyse**

Im Folgenden werden soziale Wirkungen und ihre Behandlung in nationalen sowie internationalen Leitlinien zur Bewertung von Verkehrsprojekten erörtert, eine Definition sowie Abgrenzung zu ökonomischen und ökologischen Wirkungen versucht und eine Auflistung der in der Literatur am häufigsten verwendeten sozio-ökonomischen Wirkungen tabellarisch dargestellt. Ökologische, ökonomische und soziale Wirkungen werden häufig zusammen aufgeführt, weil eine klare Trennung als nicht notwendig oder schwierig erachtet wird. Zwischen den Wirkungen bestehen Interdependenzen oder sie bauen sogar aufeinander auf. Das folgende Kapitel konzentriert sich auf die Definition und Behandlung sozialer Wirkungen, da die Entwicklung der Messung sozialer Indikatoren im Transportwesen eine neuere Entwicklung darstellt, die weniger ausgeprägt ist und nicht immer einheitlich gehandhabt wird. „The social impacts and distributional effects of the transport system and transport decision-making has been far less well researched and addressed than the associated economic or environmental considerations“ ([137]). In der vorliegenden Studie werden allerdings alle Wirkungsbereiche betrachtet und zum besseren Verständnis als sozio-ökonomische Wirkungen zusammengefasst.

### **2.11.2 Definition von Social Impacts im Verkehrswesen**

Social Impacts werden von verschiedenen, vorrangig sozialwissenschaftlichen Forschungsdisziplinen als „die Auswirkung von Handlungen (oder auch von Unterlassungen) auf bestimmte oder zufällige Individuen und Gruppen, aufgegriffen und erforscht“ [160]. Es wird betont, dass die Breite der Begriffsanwendung über verschiedene Disziplinen hinweg die „präzise und interdisziplinäre Konzeptualisierung des Terminus technicus“ (ebd.) erschwert. Zudem wurde der (englische) Begriff nicht in die deutschsprachige wissenschaftliche Literatur übersetzt, vielmehr werden themenspezifische Interpretationen vorgenommen. Wenn aber Social Impacts als Wirkungsgröße von Maßnahmen betrachtet wer-

den, so wird in der Regel von sozialen Wirkungen oder gesellschaftlichen Folgewirkungen gesprochen. [156] definiert Social Impact in diesem Kontext als: „...intended and unintended social consequences, both positive and negative, of planned interventions (policies, programs, plans, projects) and any social change processes invoked by those interventions“ sowie „Social Impacts can refer to quantifiable variables [...], but can also refer to qualitative indicators such as culture impacts involving changes to people’s norms, values, beliefs and perceptions about the society in which they live“ ([156] nach [160]).

In Bezug auf Transport- und Mobilitätsmaßnahmen lässt sich die Rolle sozialer Wirkungen eingrenzen. Eine von [153] formulierte, breitere Definition, wird des Öfteren in der Literatur angeführt (z. B. in [160], [140]). Sie erklärt Social impact als „... changes in transport sources that (might) positively or negatively influence preferences, well-being, behavior or perception of individuals, groups, social categories and society in general (in the future)“ [153]. Bei dieser breiteren Definition werden soziale Wirkungen zusammen mit ökonomischen und ökologischen Effekten analysiert, oder mindestens gemeinsam mit ökologischen betrachtet, wie es z. B. auch in dem Leitfaden von [154] der Fall ist, in dem von „broader or wider socio economic and environmental impacts of transport projects“ gesprochen wird [154]. Soziale Wirkungen werden dann im Sinne eines Drei-Säulen-Modells der nachhaltigen Entwicklung diskutiert. Dahinter liegt der Grundgedanke, dass ökonomische und ökologische Effekte gleichzeitig auch soziale Effekte aufweisen bzw. alle drei Dimensionen zeitgleich tangieren. Auch [140] stellen fest, dass in der Literatur und den Bewertungsmethoden von Transport- und Verkehrsprojekten eine Überlappung der unterschiedlichen Wirkungsbereiche stattfindet. „One of the major themes observed within the literature is the overlap between social and other impacts associated with transport, such as environmental, health and economic“ [140].

Andererseits gibt es Leitlinien, die die sozialen Auswirkungen des Verkehrs explizit von den wirtschaftlichen und ökologischen trennen, wie im WebTAG [158], [159] von Großbritannien: „Social impacts cover the human experience of the transport system and its impact on social factors, not considered as part of economic or environmental impacts“ (WebTAG: Unit 4.1: 1). Eine solche, alleinige Betrachtung sozialer Wirkungen ist jedoch in der Literatur auf

Kritik gestoßen. So führen [137] an, dass „it would be more useful to define impacts and then recognize that each potentially has an economic, environmental and social dimension – all of which, in turn, might have distributional consequences“ ([137] nach [160]).

[139] vollzogen einen internationalen Vergleich von Bewertungsmethoden im Transportsektor in England mit denen von Deutschland, den Niederlanden, Schweden, USA, Australien und Neuseeland. Sie stellten fest, dass Unterschiede in Bezug auf Werte, Betonung und Inhalt bestehen, die Ähnlichkeiten aber bei weitem überwiegen.

Generell wurde herausgefunden, dass das Ziel der untersuchten Bewertungssysteme darin besteht, das nationale Preis-Leistungs-Verhältnis von Verkehrsinfrastrukturen zu bewerten und dass die verwendeten Tools eine Nutzen-Kosten-Analyse für die monetarisierten Komponenten und eine Mischung aus quantitativen und qualitativen Ansätzen für die nicht monetarisierten Komponenten sind. Nicht monetarisierbare Wirkungen, wie z. B. in der Regel soziale Effekte, werden überwiegend in einem verbalen Dossier dargestellt. Auch in ihrer Studie wurde nicht explizit zwischen sozialen und ökologischen Wirkungen unterschieden bzw. eine klare Abgrenzung getroffen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die sozialen Wirkungen von Verkehr und ihre Verteilungseffekte über verschiedene Segmente der Gesellschaft traditionell als sekundäre oder sogar tertiäre Beiträge in Bezug auf wirtschaftliche und ökologische Wirkungen betrachtet wurden. Zu Beginn wurde sich bei Bewertung von Verkehrsprojekten i. d. R. auf die ökologischen und insbesondere die ökonomischen Effekte konzentriert.

Dass soziale Wirkungen von Mobilität und Transport gegenüber den ökonomischen und ökologischen Effekten generell seltener im Fokus der Verkehrsforschung standen und stehen, wird im Projekt [160] mit der bereits erwähnten Betroffenheit über verschiedene Disziplinen hinweg beschrieben und mit der Ambiguität der Definition dieser durch diese Disziplinen. Zusätzlich spielt die zuweilen unmögliche separate Messung der Effekte eine Rolle, denn die Quantifizierung von sozialen Wirkungen ist nicht immer möglich. „All diese Aspekte resultieren in einer mangelnden Wahrnehmung in akademischen Kreisen und in einer bislang geringen Integration in Transportpolitiken“ [160].

Dass verkehrliche Maßnahmen aber nicht nur direkten oder indirekten Einfluss auf die Ökonomie und Ökologie in unmittelbarer Umgebung und darüber hinaus haben, sondern Verkehr auch unterschiedlichste soziale und verteilungspolitische Effekte hat, wurde in den jüngsten Jahren immer mehr in der Wissenschaft und Praxis berücksichtigt [140]. Laut dem [133] wurde in den letzten Jahren ein neuer Fokus auf die Wirkungen von Transportmaßnahmen in Bezug auf die Gemeinden beobachtet. Der Anstoß war vielfältig und wurde manchmal von Bürgern und „grass-root-Organisationen“ angeführt, oder durch proaktive Gesetzgebung und Anleitung von öffentlichen Behörden [133]. Auch [137] stellen fest: *There is now a substantial body of researchers worldwide who seek to make evident the role of transport in social processes. Collectively they exploit a wide range of potentially complementary but hitherto largely discrete theoretical and methodological approaches* [138] betonen allerdings, dass ihre Forschungsarbeit immer noch weitgehend isoliert und ziemlich spärlich verbreitet ist.

### **2.11.3 Sozio-ökonomische Wirkungen in unterschiedlichen Bewertungsleitfäden für Verkehrsprojekte**

Es werden anschließend die Quellen kurz erläutert, aus denen die wichtigsten sozio-ökonomischen Wirkungen synthetisiert worden sind. Es wird in dieser Ausarbeitung kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

#### **International Comparisons of Transport Appraisal Practice, Overview Report [139]**

Im internationalen Vergleich zu „Transport Appraisal Practice“ von MACKIE und WORSLEY [139] aus dem Jahre 2013 wird festgestellt, dass alle betrachteten Ländern (England, Deutschland, Niederlande, Schweden, USA, NSW Australien und Neuseeland) ökologische und ökonomische Wirkungen analysieren und bewerten. Es werden Unterschiede festgestellt, jedoch insbesondere auf die großen Gemeinsamkeiten verwiesen. Eine spezifische Unterscheidung zwischen sozialen und ökologischen Wirkungen wurde nicht explizit vorgenommen.

#### **Principles and Guideline for Economical Appraisal of Transport Investment and Initiatives [154]**

Auch in dem Leitfaden von NSW Australia [154] werden zu berücksichtigende, sozio-ökonomische

und ökologische Wirkungen benannt, die als externe umweltrelevante Wirkungen bezeichnet werden können.

Im NSW Australien sind für alle vorgeschlagenen Straßen-, Brücken- und sonstigen Ingenieurbauwerke Umweltverträglichkeitsprüfung (Environmental Impact Assessment – EIA) erforderlich. Eine EIA wird zum Zeitpunkt der Initiierung eines Projektes bzw. einer Maßnahme begonnen, damit die Ergebnisse für eine rechtzeitige Aufnahme in die Nutzen-Kosten-Analyse verfügbar sind.

Insbesondere im Kapitel 3 des Leitfadens geht es um die sozialen, ökonomischen und umweltbezogenen Wirkungen.

#### **Transport Analysis Guidance, Unit A4.1 Social Impact Appraisal und 2015, Unit A3 Environmental Impact Appraisal [158]**

Im WebTAG von Großbritannien [158] wird ebenfalls betont, dass jede soziale Wirkung im Rahmen der Beurteilung von Verkehrsprojekten und -maßnahmen bewertet und in die zusammenfassende Beurteilungstabelle (AST) aufgenommen werden muss.

Wenn spezifische soziale Wirkungen als wichtiges Element eines Vorschlags betrachtet werden, ermöglichen die in dem Leitfaden beschriebenen Methoden der Entscheidungsperson, die meisten dieser Wirkungen zu quantifizieren und zu monetarisieren. Wenn einzelne Wirkungen als weniger wichtig erachtet werden oder wenn für einen quantitativen Ansatz keine ausreichenden Daten oder Bewertungen verfügbar sind, ist es möglich, eine qualitative Bewertung durchzuführen, indem eine siebenstufige Skala von positiven, neutralen oder negativen Auswirkungen vorgelegt wird.

Außerdem geht es in dem WebTAG Unit A3 [158] um das Environmental Impact Appraisal, welches zusätzlich zu den sozialen Wirkungen etliche Umweltwirkungen von Verkehr separat aufführt, die in vielen anderen Leitfäden zu Bewertungsmethoden zusammengefasst dargestellt werden.

In den beiden Leitfäden werden zu jedem Indikator die Berechnungsmethoden aufgeführt und Work-sheets zur Verfügung gestellt.

### **Community Impact Assessment and Environmental Justice for Transit Agencies: a reference [133]**

Dieser Leitfaden wurde vom Center for Transit Research and the Florida Department of Transportation, Public Transit Office [133], entwickelt. Zu den Forschungszielen zählten die Ermittlung von Informationen und Materialien zu Fragen und Ressourcen im Zusammenhang mit der Umweltgerechtigkeit, sozialer Gerechtigkeit und der Anwendung von Methoden zur Folgenabschätzung für die Gemeinschaft (Community Impact Assessment) in der Verkehrsbranche. Der Leitfaden dient zur Bereitstellung von Werkzeugen, Techniken und Referenzen, die zur Bewertung herangezogen werden können. Der Schwerpunkt liegt insbesondere auf der Verwendung des Folgenabschätzungsprozesses für die Gemeinden.

Community Impact Assessment [CIA] ist eine Möglichkeit, Überlegungen aus der Gemeinschaft in die Entscheidungsprozesse, die den Verkehr betreffen, einfließen zu lassen. Aus politischer Sicht handelt es sich um ein Verfahren zur Bewertung der sozio-ökonomischen Wirkungen von Verkehrsprojekten. Die Bewertung kann sich auf eine Vielzahl wichtiger gesellschaftlicher Probleme beziehen und stützt sich auf die Beteiligung der Öffentlichkeit als wichtiges Instrument auch für die Datenerhebung.

Die CIA Reference führt an, dass es unterschiedliche Bewertungsmethoden gibt, um Wirkungen zu analysieren. Es wird empfohlen, mehrere Techniken zu kombinieren, um ein besseres Verständnis der Einstellungen der Gesellschaft zu erhalten und zu garantieren, dass verschiedene gesellschaftliche Gruppen erreicht werden.

### **Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen (2006) – Methodenband zur integrierten Gesamtverkehrsentwicklungsplanung NRW 2006 [141]**

Als zentrale Grundlage für die Arbeiten zur Integrierten Gesamtverkehrsplanung Nord-Rhein-Westfalen (IGVP NRW) [141] ist ein umfangreiches Zielsystem entstanden, das auftragsgemäß alle Verkehrsträger sowie die Aspekte von Stadt-, Raum-, Umwelt- und Sozialplanung berücksichtigt.

Ausgehend von den Oberzielen und Planungsbelangen des IGVP-Gesetzes gliedert sich das Zielsystem in die drei Wirkungsbereiche:

- individuelle und gesellschaftliche Belange,
- Wirtschaft,
- Umwelt.

Zu den drei Wirkungsbereichen gibt es 10 Zielbereiche, die wiederum in ca. 40 Teilzielen ausformuliert sind. Die entsprechenden Indikatoren sind zum Teil monetarisierbar, quantifizierbar, aber auch ausschließlich qualitativ beschreibbar.

### **Ein Modell zur Abschätzung sozialer Wirkungen missionsorientierter Forschungsförderprogramme am Beispiel der Personen- und Gütermobilität [160]**

Im Projekt WIFAS wurde ein konzeptionelles Modell entwickelt, auf Grundlage dessen sich programminduzierte, soziale Wirkungen von Förderprogrammen im Bereich der Mobilitätsforschung erfassen lassen. Hierfür wurde eine Revision der internationalen Literatur durchgeführt, mithilfe derer eine Vielzahl von Konzepten für die Analyse von sozialen Wirkungen identifiziert wurden, die zur Einordnung der sozialen Wirkungsanalyse von FTI-Förderprogrammen nützlich sind und in die Entwicklung der theoretischen Unterfütterung sowie der Vorgehensweise einfließen.

### **Weitere Studien und Bewertungsleitfäden, die berücksichtigt wurden**

Die Impact Assessment Guideline des European Council von 2009 [131] ist ein Leitfaden zu Folgenabschätzungen der Initiativen der Kommission und EU-Rechtsvorschriften auf der Grundlage transparenter, umfassender und ausgewogener Nachweise. Der Leitfaden listet mögliche ökonomische und sozio-ökonomische Wirkungen auf und betont die Notwendigkeit der Identifizierung dieser für die Bewertung einer Initiative.

In der Studie von MARKOVICH und LUCAS [140] wurden unterschiedliche Literaturquellen zu den sozialen und verteilungspolitischen Wirkungen synthetisiert und bewertet. Wissen über diese Problematik in der Gegenwart wurden zusammengefasst, Lücken identifiziert sowie einige der in der Literatur offensichtlichen Muster reflektiert. Zusätzlich werden Möglichkeiten für weitere Forschung hervorgehoben.

CEQA (California Environmental Quality Act) von 2016 [129] ist ein Gesetz, das staatliche und lokale

Behörden dazu verpflichtet, die wesentlichen Umweltauswirkungen ihrer Handlungen zu identifizieren und diese Auswirkungen zu vermeiden oder – falls möglich – zu mildern. Die Richtlinien dazu sind die Vorschriften, die das Gesetz sowohl für die Behörden, die für die Verwaltung des CEQA erforderlich sind, als auch für die Öffentlichkeit allgemein erklären und auslegen. Die Richtlinien enthalten Ziele, Kriterien und Verfahren für die geordnete Evaluierung von Projekten und die Erstellung von Umweltverträglichkeitsberichten.

### Abschließende Bemerkungen

Die Formulierung sozialer Indikatoren ist eine größere Herausforderung als bei Umweltindikatoren, da die Wirkungskette oft weniger eindeutig ist. Damit ist die Zuordbarkeit des sozialen Effekts zu einer bestimmten Intervention oder Maßnahme sowie dessen Messung oft nicht ganz eindeutig.

Darüber hinaus weisen manche sozialen Wirkungen eine schwer quantifizierbare Komponente auf. Daher wird i. d. R. ein Mix aus quantitativen und qualitativen Indikatoren verwendet. Letztere nicht nur um schwer quantifizierbare Information aufzunehmen, sondern auch um eine bessere Interpretation und Bewertung der Ergebnisse zu erhalten. „Die Entscheidung, welche Indikatoren für die Messung sozialer Wirkungen herangezogen werden, richtet sich nach den Anforderungen des zu evaluierenden Sachverhalts. Es stellt sich auch die Frage, ob man ein möglichst vollständiges Bild zeichnen, oder sich auf spezifische, relevante Wirkungen konzentrieren möchte“ [160]. Es wird generell davon ausgegangen, dass es nicht möglich ist, eine vollständige Liste aller Wirkungen zu erfassen, daher ist sich die Literatur einig, dass der Fokus auf den stärksten Wirkungen liegen sollte und projekt- sowie kontextabhängig ist [160].

Zudem sollte darauf aufmerksam gemacht werden, dass soziale Wirkungen einer Politikmaßnahme sich von Ort zu Ort und Projekt zu Projekt sowie zwischen sozialen Gruppen unterscheiden können. Eine allgemein gültige Wirkungsweise bzw. eine ex ante Identifikation entstehender Folgewirkungen ist daher nur eingeschränkt möglich: Selbst ex-post können auftretende Wirkungen von verschiedenen Betroffenen subjektiv unterschiedlich gewichtet werden (innerhalb einer Community oder zwischen Communities) bzw. können ein und dieselben Effekte entweder als positiv oder negativ aufgefasst werden [156]. Auch in [133] wird Ähnliches betont: „An

essential characteristic of transportation is the differential incidence of its impacts. Some groups will gain from any transportation change; others may lose.“ [133]. Das Federal Transport Administration (FTA) Office of Planning (TPL) sagt zu sozialen Wirkungen: „Transit projects affect the social environment in several ways and may change the physical layout, demographics and sense of neighborhood in local communities.“ (FTA 1996 zitiert nach [133]). Außerdem ist es wichtig anzuführen, dass soziale Effekte in Beziehung zueinanderstehen sowie direkt, indirekt oder kumulativ sein können. „Different impacts may relate to each other. Impacts also may be direct, indirect, or cumulative, or the effects counterbalancing“ [133].

Deswegen wird in der Literatur bezogen auf die Messung und Integration sozio-ökonomischer Wirkungen insbesondere die Rolle von partizipativen Verfahren in der Nachhaltigkeitsdiskussion betont [160]. Von einigen Autoren wird bemängelt, dass gängige Verkehrsbewertungsrahmen nicht die Prioritäten der lokalen Gemeinschaften hinsichtlich der Höhe der verschiedenen Wirkungen und möglicher Minderungsmaßnahmen berücksichtigen ([121]). Einige Wissenschaftler verweisen auf die vielversprechende Natur von Nachbarschaftsbefragungen bei der Bewertung der sozialen Wirkungen von Verkehrsprojekten. So zum Beispiel führt [134] an: „These surveys enable planners to deduce the qualities or attributes of neighbourhoods valued by residents; they can then take care to consider these attributes when formulating transportation system changes and mitigating negative impacts resulting from them“ ([134] zitiert nach [140]).

Eine Studie von [121] z. B. verwendete eine Befragung, um die Wirkungen eines Transportprojektes zu messen. Das Ziel dieser Studie war es, die Wahrnehmungen über die potenziellen verkehrsbedingten Wirkungen des Projekts Sizewell C (Bau eines Kernkraftwerks) auf das Wohlergehen lokaler Gemeinschaften zu analysieren, und zwar mithilfe von Tiefeninterviews und einer Umfrage zu bestimmten Präferenzen. Die Befragungen ermöglichten die Gewinnung von Erkenntnissen, die bei der Bewertung von Verkehrsprojekten eine interessante Rolle spielen können. Die in dieser Studie gewonnenen Ergebnisse über die Wahrnehmungen und Prioritäten hinsichtlich der sozialen Wirkungen des Straßenverkehrs im Zusammenhang mit einem großen Bauprojekt zeigten, dass die verwendete Methode die objektiven und auf Experten beruhenden Informationen ergänzt, die von bestehenden Rahmen-

werken bereitgestellt werden, da sie zusätzliche Erkenntnisse über bestimmte Aspekte liefert, die häufig mit anderen Faktoren kombiniert oder nicht für alle relevanten Gruppen untersucht werden [121].

#### 2.11.4 Zusammenfassung der sozio-ökonomischen Wirkungen aus den betrachteten Bewertungsleitfäden

In Tabelle 1 wurden die gängigsten und am häufigsten genannten sozio-ökonomischen Wirkungen zusammengestellt<sup>10</sup>. Die weniger häufigen Wirkungen, die aufgrund der Übersichtlichkeit nicht mit in die Tabelle aufgenommen wurden, waren u. a. Reliability Effects, Comfort und Crowding, Regeneration, Effects on other modes of transport, Pedestrian/Cyclists, Option and Non-Use Values, Personal Affordability sowie Leistbarkeit und Finanzierbarkeit. Zuweilen war es schwer, eine Zusammenfassung oder eindeutige Abgrenzung zwischen den Kenngrößen zu vollziehen, da einige, gleiche Wirkungen unterschiedlich bezeichnet werden, andere wiederum ähnlich klingen, in ihrer Definition aber differenziert zu betrachten sind.

Zusätzlich zu den Wirkungen wird in der Tabelle auch angegeben, in welchen Quellen sie berücksichtigt werden. Außerdem ist angegeben, ob sie in der Praxis monetarisiert, quantifiziert oder qualitativ beschrieben werden. Es ist zu beachten, dass [160] und [140] bereits Zusammenfassungen von sozialen und ökologischen Wirkungen aus verschiedenen Quellen sind.

Eine nähere Beschreibung der Wirkungen erfolgt nur bei denjenigen, die für die vorliegende Studie zu Effekten des Monitorings im Erhaltungswesen als relevant angesehen werden. Die Tabelle ist in absteigender Häufigkeit der Zitierung aufgebaut.

## 2.12 Monitoring

Im Allgemeinen bezieht sich der Begriff Structural Health Monitoring (SHM) auf den Prozess der kontinuierlichen oder regelmäßigen messtechnischen Überprüfung einer Struktur, um Veränderungen im Zustand oder in der Umgebung der Struktur zu überprüfen und festzustellen [81]. Der übergeordnete Zweck des SHM ist die Feststellung der struk-

turellen Gesundheit, d. h. Abweichungen vom der angenommenen oder erwarteten strukturellen Verhalten, welches durch Verschlechterung, Beschädigung, Umweltbedingungen oder eine andere Quelle verursacht werden. Diese Abweichung wird als Schaden verstanden. Dabei ist die Schadenidentifikation der Schlüssel zum SHM. Sie beinhaltet die Feststellung des Vorhandenseins, der Lage, der Art und des Schweregrades eines Schadens [82].

sozio-ökonomische Wirkung	Quelle	Messung
Luftverschmutzung	1,2,3,4,5,8,9	monetarisiert
Unfälle	1,3,4,5,8,9	monetarisiert
Lärm	1,2,3,4,5,8	monetarisiert
Reisezeit*	1,6,7	monetarisiert
Erbe, historische und kulturelle Ressourcen	1,2,3,4,8,9	qualitativ
Trennwirkungen	2,3,5,6,8	qualitativ, quantitativ, monetarisiert
Sicherheit	1,3,6,8,9	qualitativ
Wasserqualität	2,3,4,8,9	quantitativ und monetarisiert
Erreichbarkeit	3,4,6,7	qualitativ
Landnutzung	6,7,8,9	qualitativ
Biodiversität	2,3,4,9	qualitativ
Visuelle Intrusion	2,4,6,8	qualitativ
breitere ökonomische Effekte	1,6,9	sehr heterogen
Klimawandel	1,3,9	monetarisiert
Physische Aktivität	3,6,8	monetarisiert
Reisequalität	3,6,8	qualitativ, quantitativ, monetarisiert
Gemeindewirkungen	2,4,6	qualitativ
Vibration	2,4	quantitativ
Notfallmaßnahmen	4,7	qualitativ

\* Reisezeit wird hier an 4. Stelle aufgeführt, da sie in den Quellen Nr. 6 und Nr. 7 aufgeführt ist (Zusammenstellung von Indikatoren aus verschiedenen Literaturen) und wird daher stärker gewichtet.

Legende  
 1 – MACKIE and WORSLEY (2013) [139]  
 2 – Transport for NSW (2006) [154]  
 3 – WebTag (2014/2015) Unit A3, A4 [158], [159]  
 4 – FDOT (2002) [133]  
 5 – Integrierte Gesamt VP NRW (2006)  
 6 – WIFAS (2013) [160]  
 7 – CEQA (2016) [129]  
 8 – MARKOVICH und LUCAS (2011) [140]  
 9 – EC (2009) [131]

Tab. 1: Zusammenstellung sozio-ökonomischer Wirkungen in der Literatur [eigene Darstellung]

<sup>10</sup> Es besteht hier kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Grundlage für das SHM ist die Messung. Als Messung wird die Erfassung und Quantifizierung eines relevanten Indikators zu einem bestimmten Zeitpunkt verstanden. Das Monitoring entspricht einer Messung und Bewertung des Messergebnisses über die Zeit (kontinuierlich oder diskret). Die Bewertung im Monitoring dient als Entscheidungsgrundlage und muss daher auf die möglichen Entscheidungsalternativen ausgerichtet sein. SHM fokussiert auf das Monitoring von Indikatoren eines Bauteils die Rückschlüsse auf die Funktionalität und den Zustand des Bauwerks schließen lassen.

Die SHM-Systeme werden seit Jahrzehnten in verschiedenen Ingenieurdisziplinen, darunter Luftfahrt und Maschinenbau, eingesetzt. Ihre Anwendung auf Infrastrukturbauwerke hat sich jedoch erst in den letzten 20 – 30 Jahren entwickelt, was durch die technologischen Entwicklungen erleichtert wurde. Diese Entwicklungen haben ermöglicht, fernab der laborähnlichen Bedingungen, SHM an Infrastrukturbauwerken anzuwenden und mit den zum Teil herausfordernden Umweltbedingungen umzugehen.

Ursprünglich wurden die SHM-Systeme auf Brücken installiert und eingesetzt, um zur Lösung spezifischer Probleme (z. B. Überlastung, Ermüdung) beizutragen oder um Defekte zu überwachen, die sich selbst manifestieren oder durch andere Mittel identifiziert wurden (z. B. Sichtprüfung, Größenänderung und/oder Lastmuster).

SHM-Systeme wurden auch eingesetzt um das Verhalten von neuen Materialien oder Bauformen zu validieren. Diese Anwendungen ergaben sich auch neuen Anforderungen, wie beispielsweise der immer kürzeren Bauzeit und dem Bedarf an zeitsparenden, neuen Konstruktionslösungen, schlankeren Strukturen und erhöhten Straßenverkehrslasten [83].

In den letzten Jahren gibt es jedoch einen zunehmenden Trend, von diesem reaktiven Ansatz für SHM zu einem eher prädiktiven und ganzheitlichen Ansatz überzugehen, der SHM in eine Gesamtmethodik für bestehende Strukturen integriert. SHM ermöglicht die Überwachung einer großen Anzahl von Brücken über ihren gesamten Lebenszyklus, um ihre Instandhaltung besser zu planen und Schäden und Defekte zu vermeiden, bevor sie tatsächlich auftreten. Dieser Trend spiegelt sich in den jüngsten Großforschungsprojekten wie Sustainable Bridges [84], MAINLINE [85], SMARTRAIL [86] oder Intelligente Brücke [87], [88] wider.

Der SHM-Prozess kann grob in die Messung und Erfassung der Daten und die Analyse der Daten unterteilt werden.

Die Messung beinhaltet die Erfassung, Verarbeitung, Kommunikation und Archivierung von Informationen über die Ereignisse und ihre Auswirkungen auf eine Struktur in einem bestimmten Zeitraum, in der Regel mit einem hohen Automatisierungsgrad [85]. Die Informationen beziehen sich in der Regel auf Belastungsbedingungen (Verkehr), Verformung, Vibration, meteorologische und Umweltbedingungen. Sie wird mithilfe verschiedener Geräte durchgeführt, darunter die folgenden Hauptkomponenten:

- Sensoren (Wandler) zur Erfassung physikalischer oder chemischer Größen wie Dehnung, Krümmung, Durchbiegung, Verschiebung, Drehwinkel/Neigung, Kraft, Beschleunigung, Temperatur, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Korrosivität, etc. In der Praxis ist es schwierig, die Sensoranforderungen an ein SHM-System zu verallgemeinern, da deren Auswahl auf eine bestimmte Brücke und Anwendung zugeschnitten sein sollte. Die Verbindungs- und Kommunikationsausrüstung wird traditionell mithilfe von Kabeln durchgeführt. Diese sind oft Schwachstellen im Gesamtsystem. In modernen Systemen werden daher vermehrt mithilfe von drahtlosen Netzwerken gearbeitet.
- Das Datenerfassungsgerät dient zur dynamischen oder statischen Erfassung, Digitalisierung, Erstverarbeitung, Visualisierung und Kommunikation von sensorisch erfassten Daten.
- Die Stromversorgungseinrichtungen in Form von Hauptstromleitungen (falls vorhanden), Batterien, Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen, Energiegewinnung oder Hybridkombinationen der vorgenannten Art.

Der Auswertungsteil (Datenanalyse) wird mit dem Ziel durchgeführt, den strukturellen Zustand zu ermitteln, d. h. die Daten strukturiert statistisch zu analysieren, um Veränderungen und Muster im Tragwerksverhalten zu finden, die Indikatoren für eine Verschlechterung oder einen Schaden sein können. Dazu können Änderungen der Material- und/oder geometrischen Eigenschaften einer Struktur gehören, einschließlich Änderungen der Lagerbedingungen und der Randbedingungen.

Eine detaillierte Darstellung verschiedener SHM-Systeme findet sich jedoch in einer Reihe von Referenzen, die in [88], [89], [90] und [91] umfassend zusammengefasst sind.

Es ist schwierig zu verallgemeinern, welche Art von SHM-System in bestimmten Situationen verwendet werden können, da jedes System auf den erforderlichen Zweck, die Art der Struktur, den Standort usw. zugeschnitten sein sollte. Es handelt sich um einen sehr multidisziplinären Bereich. Bei der Auslegung eines SHM-Systems sollten jedoch die folgenden Punkte berücksichtigt werden [83]:

- bestehende Normen und Richtlinien,
- Umgebungsbedingungen,
- die geforderte Lebensdauer des Systems und verschiedene Schnittstellen,
- zu überwachende Parameter, einschließlich Umweltparameter – diese sollten zusammen mit den Statikern identifiziert werden und beinhalten die Identifizierung sogenannter „Hot Spots“ an der Struktur, d. h. die Orte, an denen bereits bestehende oder erwartete Schäden und Schäden vorhanden sind oder am ehesten eintreten können,
- Auswahl der geeigneten Hardware (Sensoren, Datenerfassungsgeräte, Kommunikationsgeräte usw.),
- Erstellung eines detaillierten Installations- und Überwachungsplans,
- Installation des Systems,
- Test- und Verfeinerungsverfahren zur Validierung und Optimierung des SHM-Systems,
- Betrieb und Wartung des Systems,
- Umgang mit Daten, Informationen, Alarmen, Warnungen, Warnungen, Schwellwerten etc.

Unabhängig von der Art des SHM-Systems gibt es einige grundlegende allgemeine Prinzipien, die für alle Systeme gelten, wie in [82] beschrieben ist:

- alle Materialien haben inhärente Fehler oder Mängel.
- Die Schadensbewertung beinhaltet einen Vergleich zwischen zwei Systemzuständen, daher ist es erforderlich, einen Basiszustand festzulegen.

- Die Feststellung des Vorhandenseins und der Lage von Schäden kann in einem unbeaufsichtigten Lernmodus erfolgen, aber die Feststellung der Art des vorhandenen Schadens und der Schadensschwere kann im Allgemeinen nur in einem überwachten Lernmodus erfolgen.
- Sensoren können Schäden nicht wirklich messen. Die generierten Informationen erfordern eine Merkmalsgewinnung durch Signalverarbeitung und statistische Klassifizierung, um Sensordaten in Schadensinformationen umzuwandeln.
- In SHM-Systemen, die nicht mit einer intelligenten Datenaufbereitung ausgestattet sind, gilt: Je empfindlicher eine Messung auf Beschädigung reagiert, desto empfindlicher ist sie auf sich ändernde Betriebs- und Umgebungsbedingungen.
- Die erforderlichen Eigenschaften des SHM-Messsystems werden durch die Längen- und Zeitskalen bestimmt, die mit der Einleitung und Entwicklung von Schäden verbunden sind.
- Es besteht ein Kompromiss zwischen der Schadensempfindlichkeit eines Algorithmus und seiner Rauschunterdrückungsfähigkeit.

Die Auswahl eines geeigneten SHM-Systems zur Erfüllung seiner geforderten Funktion ist ein komplexer Prozess. In [91] wurde jedoch eine hochrangige Kategorisierung von SHM-Systemen vorgeschlagen, die darauf abzielt, zu verstehen, wie Überwachungsdaten verwendet werden können, und ihre Auswahl zu steuern.

Nach einer umfassenden Überprüfung verschiedener vergangener SHM-Implementierungen argumentierten die Autoren in [91], dass es vielen der SHM-Implementierungen an klar festgelegten Zielen mangelt (siehe Tabelle 2). Als Folge hieraus wurden in [91] klare und einfache Kategorien vorgeschlagen, um die Festlegung von Zielen und die Aufnahme von Informationen zu erleichtern, die für Tragwerkseigentümer von Vorteil sein können. Es wurden fünf Einsatzmöglichkeiten vorgeschlagen und nach ihrer Komplexität und ihrem Wert bewertet [11]:

Darüber hinaus haben die Autoren in [91] 30 verschiedene SHM-Studien überprüft und gemäß dem vorgeschlagenen System kategorisiert, zusammen mit kurzen Beschreibungen der für die Messungen verwendeten Schlüsseltechnologien, erklärten Zie-

Kategorie	Beschreibung	Komplexität	Wert für die Eigentümer von Anlagen
1	Anomalieerkennung	Niedrig	Begrenzt. Geben keinen sofortigen Wert. Können aber weitere Untersuchungen des überwachten Bereichs einleiten.
2	Studien zum Einsatz von Sensoren	Niedrig	Begrenzt. Geben keinen sofortigen Wert. Wertvoll für die Bewertung der Fähigkeiten neuer Sensoren – kann in Zukunft zu Verbesserungen der technischen Leistungsfähigkeit führen.
3	Modellvalidierung	Mäßig	Begrenzt. Geringer unmittelbarer Wert für den Anlagenbesitzer; nützlich für Brückenkonstruktoren, da dies zu Verbesserungen bei zukünftigen Brückenkonstruktionen führen und Vertrauen in die aktuellen Tragwerksentwürfe schaffen kann.
4	Grenzwertprüfung	Mäßig	Sehr nützlich. Sofortiger Wert für den Eigentümer, da ein direkter Bezug zum Leistungskriterium besteht; die Festlegung des Leistungskriteriums kann jedoch sehr schwierig sein (daher moderate Komplexität).
5	Schadensfeststellung	Hoch	Äußerst nützlich. Sofortiger Wert für den Anlagenbesitzer; jedoch extrem schwierig zu erreichen (daher hohe Komplexität).

Tab. 2: Kategorisierungssystem von SHM [91]

len der Studie und der wichtigsten Ergebnisse. Daher ist die Studie [91] eine sehr komprimierte und wertvolle Informationsquelle über verschiedene SHM-Systeme und deren Wert für Infrastrukturbesitzer.

Das SHM ist ein sehr breites und multidisziplinäres Gebiet, das in weiten Teilen sehr gut dokumentiert ist [83], [84], [85], [88], [90]. Daher konzentrieren sich die folgenden Abschnitte auf drei sehr spezifische Bereiche der Brücke SHM, die der

- Überwachung von Rissbildung,
- Korrosion und
- Lagern

gewidmet sind, und stellen einige neuartige Überwachungstechnologien in diesen Bereichen vor.

### 2.12.1 Rissüberwachung

Die Überwachung von Rissbildungen in Bauwerken kann mit verschiedenen Methoden durchgeführt werden.

Die gebräuchlichsten Rissüberwachungsgeräte sind Extensometer, die an Rissen installiert werden, um deren Breite und Ausbreitung zu messen. Diese Sensoren können Auflösungen von 0,01 mm erreichen. Ein Beispiel hierfür kann in [92] gefunden werden.

Digitale Bildgebung und Bildverarbeitungsverfahren erweisen sich auch bei der Rissprüfung als vorteilhaft. Standard-Digitalkameras, gekoppelt mit einer

Bildverarbeitungssoftware, können, wie in [93] demonstriert, verwendet werden, um Rissparameter wie Breite, Breitenvariation und Profile mit einer guten Präzision im Vergleich zu herkömmlichen Methoden zu bestimmen. Eine ausgefeiltere Technik wird von den Autoren von [94] vorgeschlagen, die eine zerstörungsfreie Brückeninspektionsmethode vorschlagen, die eine Kombination aus hochauflösender digitaler Bildgebung (HRDI), hochauflösendem Video (HDV) und Infrarotthermografie (IR) zur Erkennung von Rissen verwendet. Eine hybride Bildverarbeitungsstrategie wurde auch in [95] zur Erkennung von Rissen aus Bildern verwendet, die von einem unbemannten Luftfahrzeug (UAV auch als Drohne bezeichnet) aufgenommen wurden. [95] präsentiert einen Prototyp des UAV-basierten Systems, das mit einem Mikrocomputer, einer Kamera, einem Ultraschall-Wegsensor und einem WiFi-Kommunikationsmodul ausgestattet ist. Die Erkennung von Rissen in Bildern kann auch durch den Einsatz neuraler Netzwerke unterstützt werden, wie in [96] für Betonbauwerke beschrieben.

In den letzten Jahren hat sich der Einsatz von faseroptischen Sensoren zur Überwachung von Rissbildungen stark weiterentwickelt. Der Einsatz von Glasfaser zur direkten Schadenserkenkung, Lokalisierung und Quantifizierung ist in [97] dargestellt. Die Standardprüfmethode zur Bewertung der Messleistung von verteilten Sensoren wie Brillouin-Streulichtleitern und anderen Langzeitsensoren zur Überwachung von Rissen wird in [98] vorgeschlagen. Der Einsatz von langglasfaseroptischen Sensoren zur Überwachung von Rissen in Betonbauwerken ist in [99] beschrieben.

Das auf intelligenten Werkstoffen basierende Verfahren wird in [100] vorgestellt. Dort wird ein Verfahren zur Überwachung von Rissen, einschließlich Initiierung, Größe, Form, Lage und Ausbreitung von Defekten, vorgestellt, welches auf eine Reihe von bestehenden Brücken angewendet wird. Es wird auch ein Verfahren zur Herstellung der intelligenten Folie vorgestellt. Die Anwendung des vorgeschlagenen Systems auf 6 Brücken in China wird vorgestellt, wo das System an speziell ausgewählten rissanfälligen Stellen installiert wurde. Die Ergebnisse zeigen nachweislich eine gute mittelfristige (5 Jahre) Stabilität und Zuverlässigkeit in Verbindung mit der Fähigkeit, Risse zu erkennen und das Wachstum zu verfolgen. Die Funktionsweise des Sensors ist ähnlich wie bei einer Rissglasüberwachungsplatte.

Ein zusammenfassender Überblick über verschiedene Techniken zur Überwachung der Rissbildung ist in [100] kurz dargestellt. [100] stellt faseroptische Abtastsysteme, statistische Mustererkennungsmethoden, vibrationsbasierte Techniken, elektromechanische Impedanzmethoden und elastischen Wellentechniken vor und gibt einen kurzen Überblick über jede Methode. Die in Strukturen eingebetteten faseroptischen Sensoren des Fibre Bragg Grating (FBG) ermöglichen die Erfassung von Echtzeitdaten über die Dehnung, mit denen Abweichungen von der vorhergesagten oder angenommenen Charakteristik festgestellt werden können. Die Überwachungsdaten können auch mit statistischen Mustererkennungstechniken verarbeitet werden, um Änderungen in den statistischen Daten zu extrahieren, die auf Rissbildung hinweisen können. [100] konzentriert sich jedoch hauptsächlich auf die schwingungsbasierten Methoden, die es ermöglichen, Rissbildung aufgrund von Änderungen der Schwingungsparameter von Strukturen, wie Eigenfrequenzen oder Modenformen, aufgrund von Änderungen der Steifigkeit zu erkennen. Das Verfahren funktioniert, wenn es zu einer signifikanten Rissbildung gekommen ist. Es ist eher ungeeignet für kleinere Schäden oder für eine Überwachung eines Risses über die Zeit. [100] diskutiert auch eine neue Methode, die auf der Integration von intelligenten Materialien, wie piezoelektrischen Materialien und ihre Verwendung als Sensoren und Aktoren zur Erkennung von Rissen basiert. Der Schwerpunkt von [100] liegt jedoch auf einer neuartigen, auf elastischen Wellen basierenden Methode, die als GuidedWave-(GW)-Methode als grundlegendes Werkzeug für die Rissprüfung bezeichnet wird. Es

beschreibt die GW-Methode als aktive SHM-Technologie, die eine Kombination aus Ultraschallprüfung und Schallemissionstechnik ist, die es ermöglicht, lokale Risse an jeder Struktur zu erkennen und in Kombination mit einer vollständigen SHM-Methodik das Auftreten von Rissen zu identifizieren, zu lokalisieren und die Schwere des Risses zu bewerten.

[100] listet auch die Vorteile des Verfahrens auf, wie seine Zeit- und Kosteneffizienz, seine große Abdeckung mit einer begrenzten Anzahl von Sensoren, seine schnelle und wiederholbare Inspektion und seine Empfindlichkeit gegenüber kleinen Rissen. Es bietet auch eine vergleichende Analyse der verschiedenen GW-Methoden und einen Überblick über die Methoden zur Integration der GW-Methoden in das SHM.

Akustische Wellen werden häufig zur Erkennung und Quantifizierung von Rissbildung eingesetzt. Sie werden als akustische Emissionsmethoden (AE), wie in [101] beschrieben, oder als Ultraschallmethoden (US) verwendet, mit Implementierungen auf Brücken in der Türkei [103] und in Polen [104].

[105] wandte Schallemissionstechniken (AE) an, um unter Laborbedingungen eine Reihe von Proben von mehrzelligen Stahlbeton-Boxträgern unter Torsionsbelastung zu überwachen. Die Studie wurde durchgeführt, um qualitative und quantitative Daten zur Charakterisierung von Torsionsbruch und Schadensbewertung bei Kastenträgern zu sammeln. Die Autoren gaben an, das Ziel der Lokalisierung der durch die Torsionslast induzierten Rissbildung und der Quantifizierung der Schadensschwere in verschiedenen Phasen der Rissbildung erreicht zu haben, und kamen zu dem Schluss, dass sowohl qualitative als auch quantitative Methoden erforderlich sein könnten, um den Schadensgrad zu beurteilen und das wahre Muster des Strukturversagens zu erfassen.

Ein neuer Ansatz zur Überwachung von Ermüdungsrissen an Stahlbrücken wird in [106] vorgestellt. [106] schreibt, dass derzeit keine einzige Methode zur Verfügung steht, um Rissquellen auf globaler Ebene zu erkennen, da es verschiedene Quellen der Verschlechterung und Orte der Ermüdungsrisse auf Brücken geben kann und stellt eine Methodik vor, die Schallemissions- und Ultraschallwellenprüfung mit piezoelektrischen aktiven Wafer-sensoren (PWAS) integriert.

### 2.12.2 Korrosionsüberwachung

Korrosion ist ein Oxidationsprozess, der in metallischen Strukturen infolge von chemische, elektrochemische und/oder elektrolytische Reaktionen mit seiner Umgebung auftritt.

Es ist der Hauptabbaumechanismus für Stahl- und Betonbrücken (armierte und vorgespannte). Sie ist jedoch in der Regel am stärksten bei Stahlbeton-Brücken ausgeprägt. Die Korrosion wird initiiert, wenn gleichzeitig Sauerstoff und Feuchtigkeit den Stahl oxidieren lassen. Der Prozess kann durch die Anwesenheit anderer schädlicher Stoffe wie Chloride im Meerwasser, Tausalze, Kohlendioxid, Sulfate und Stickstoffdioxid, die bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe in der Luft vorhanden sind, weiter beschleunigt werden. Das korrodierende Metall dehnt sein Volumen aus (ca. um den Faktor sechs) und übt Innendruck auf seine unmittelbare Umgebung aus, was zu Ablösungen, Rissen und allgemeinen Schäden führt. Dies wiederum eröffnet Eindringwege für andere Substanzen, die den Korrosionsprozess beschleunigen können. Daher kann eine frühzeitige Erkennung von Korrosion durch den Einsatz von Überwachungstechniken ein wichtiges Instrument sein, um einer signifikanten Zustandsverschlechterung von Brücken, insbesondere von Stahlbetonbrücken, entgegenzuwirken, bei denen die Korrosion der Bewehrung erst in relativ fortgeschrittenem Stadium visuell erkennbar wird.

Im Allgemeinen konzentriert sich die Überwachung der Korrosion in Betonbauwerken auf Parameter und Prozesse wie Chloridkonzentration, Widerstand, Temperatur [83] und Karbonatisierung [90]. Die kontinuierliche Überwachung führt nicht ohne weiteres zu zufriedenstellenden Ergebnissen, da sich die Lebensdauer einer Struktur und die Lebensdauer eines Überwachungssystems wesentlich unterscheiden.

Daher konzentrieren sich bisher die meisten Bemühungen zur Erkennung von Korrosion auf die zerstörungsfreien Methoden zur Erkennung und Quantifizierung des Korrosionsgrades, die in der Regel den Zugang zu den betroffenen Bereichen der Struktur erfordern.

Um die Korrosion zu überwachen, wurden in den letzten Jahrzehnten eine Reihe von verschiedenen Messverfahren und Korrosionssensoren entwickelt. Diese Systeme können auf verschiedene Weise kategorisiert werden, wobei eine die Installationsme-

thode ist, bei der die Sensoren entweder in die Struktur eingebettet oder nachträglich auf ihr installiert werden. Generell ist der Einsatz von eingebetteten Sensoren nur bei neu gebauten oder reparierten Bauwerken möglich, da für den effektiven Betrieb der meisten Sensoren ein direkter Kontakt mit der metallischen Bewehrung erforderlich ist. Sie haben auch den großen Vorteil, dass sie Daten aus Bereichen der Struktur bereitstellen können, die nach dem Bau schwer zugänglich sind. Die nachträglich installierten Sensoren können an bestehenden Konstruktionen eingesetzt werden, erfordern jedoch in der Regel einen angemessenen Zugang und einen zerstörerischen Eingriff in die Betondecke und/oder Metallbewehrung.

Eine weitere Kategorisierung der Korrosionsüberwachungssysteme basiert auf dem Sensorprinzip, wobei die folgenden Hauptkategorien unterschieden werden können [107]:

- elektrochemische Sensoren/Systeme,
- faseroptische Sensoren/Systeme,
- optisch-elektrochemische Systeme (d. h. ein Hybrid aus den beiden obigen Kategorien),
- neuartige intelligente Sensoren:
  - zementbasierte Dehnungssensoren,
  - nanomaterialbasierte Sensoren,
  - Sensoren für mikroelektromechanische Systeme (MEMS).

Die elektrochemischen Sensoren sind die am weitesten verbreiteten für die Überwachung der Korrosion in Brücken, mit einer umfassenden Übersicht über verschiedene Typen, zusammen mit ihren Vor- und Nachteilen, die in [107] und [108] vorgestellt werden. Es können mehrere zerstörungsfreie Abtasttechniken unterschieden werden [107]:

- Leerlaufpotenzial,
- Oberflächenpotenzial,
- Betonwiderstand,
- Polarisationswiderstand,
- galvanischer Strom,
- akustische Analyse.

Die detaillierte Diskussion der Prinzipien dieser Techniken geht über den Rahmen dieses For-

schungsprojektes hinaus; weitere Details finden sich jedoch in [107] und [108]. Diese Techniken ermöglichen in Kombination mit anderen Sensortechniken und Sensoren die Überwachung kritischer Parameter aus der Sicht der Einleitung und des Fortschritts der Korrosion, wie Chloridgehalt, pH-Wert, Potenzial, Widerstand, Korrosionsrate, Sauerstofftransport, Feuchtigkeit, Temperatur, [107]. Wie in [107] und [108] festgestellt ist, ist jedoch aufgrund bestimmter Einschränkungen (Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen, Haltbarkeit, Langzeitstabilität) der derzeit verfügbaren Sensoren auf der Grundlage dieser Techniken eine Kombination verschiedener Techniken unerlässlich, um genaue und zuverlässige Informationen über die Korrosion der Bewehrung im Laufe der Zeit zu erhalten.

Die faseroptischen Sensoren (FOS) sind in [110] diskutiert. Dort sind die Methoden zur Erkennung von Korrosion, basierend auf den Messungen der Dehnung durch erhöhten Druck von korrodierenden und expandierenden Bewehrungen, vorgestellt.

In [107] wird eine Zusammenfassung der neueren Forschung zusammen mit den Vorteilen von FOSs vorgestellt, darunter Merkmale wie geringe Größe, geringes Gewicht, Korrosionsbeständigkeit, Beständigkeit gegen elektromagnetische Störungen, hohe Empfindlichkeit, Abstimbarkeit zur Erkennung verschiedener Signale und Fähigkeit zur Durchführung kontinuierlicher und langfristiger Messungen. Der größte Nachteil sind jedoch die hohen Kosten der Ausrüstung. Es wurde auch festgestellt, dass die FOS ein großes Potenzial als Frühwarnsystem in korrosionskritischen Situationen haben [107]. Eine weitere Anwendung des FOS, insbesondere ein Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Sensor, wurde in [109] vorgestellt. Besonderes Augenmerk wurde auf Techniken gelegt, die auf Ultraschallwellen basieren. Es wird argumentiert, dass physikalisch basierte Überwachungstechniken eine genaue Zustandsbewertung der Stahlkorrosion durch direkte Messungen an eingebettetem Stahl liefern können. Sie sind vielversprechende Techniken zur Überwachung über einen größeren Inspektionsbereich; die Einschränkungen wurden jedoch auch hervorgehoben [109].

Systeme, die hybride optisch-elektrochemische Systeme, die FOS und elektrochemische Sensoren kombinieren, haben in den letzten Jahren großes Interesse geweckt, wie in [107] zusammengefasst

und diskutiert wird. Diese Systeme konnten verschiedene physikalische und chemische Parameter messen, die den Zustand von Stahlbetonstrukturen repräsentieren und Information über Wartungsstrategien für Stahlbetonbrücken liefern können [107].

Neuartige intelligente Sensoren wurden in [107] diskutiert. Die kleinen und kostengünstigen MEMS-Sensoren mit drahtloser Kommunikation haben sich als sehr vielversprechende Technik erwiesen, da eine große Anzahl unabhängiger MEMS-Vorrichtungen leicht verteilt und in eine Betonstruktur eingebettet werden kann, die eine gute räumliche Abdeckung der Struktur bietet und die Überwachung einiger korrosionsbezogener Parameter (z. B. Temperatur und Feuchtigkeit) ermöglicht. Es werden auch andere Smart-Sensing-Methoden entwickelt, von denen viele jedoch noch immer unter schlechten und inkonsistenten Reaktionen, Signaldrift, verkürzter Lebensdauer oder mangelnder Eignung für den Betrieb bei hohen pH-Werten leiden [107].

Im Rahmen des Projekts Sustainable Bridges [84] wurden Korrosionsüberwachungssysteme für Stahlbetonbrücken überprüft, um durch Monitoring eine optimale präventive Instandhaltungsstrategie für Stahlbetonbrücken zu identifizieren.

Ein Überblick über die veröffentlichten Einsätze der Korrosionsüberwachungssysteme sind in [111] gegeben, zusammen mit Fallstudien, die auf den Einsätzen dieser Systeme basieren. Eine Reihe weiterer korrosionsbezogener Einsätze sind in [91] zusammengefasst.

Der Bereich der Korrosionsüberwachung und deren Anwendung auf das Monitoring von Brücken hat in der jüngeren Vergangenheit einige bedeutende Entwicklungen erfahren, weshalb ständig neue Ideen entwickelt und getestet werden. Zum jetzigen Zeitpunkt erscheint jedoch die Verwendung von Kombinationen etablierter elektrochemischer Sensoren, die die Messung verschiedener korrosionsbezogener Parameter ermöglichen, als die zuverlässigste Methode zur Korrosionsüberwachung, insbesondere in Langzeit-SHM-Anlagen. Auch die faseroptischen Sensoren und die hybriden elektrochemisch/optischen Systeme haben zunehmend an Bedeutung gewonnen, werden aber durch die hohen Kosten der Hardware für FOS noch immer nicht breit eingesetzt.

### 2.12.3 Überwachung von Brückenlagern

Die Überwachung von Brückenlagern kann bei neuen und bestehenden Brücken mit unterschiedlichen Zielen durchgeführt werden. Die häufigsten sind:

- Überwachung von Schäden oder Fehlfunktionen an Lagern,
- Überwachung der Lagerbewegungen,
- Überwachung der Lagerbelastung.

Zahlreiche Sensoren zur Überwachung von Lagern sind derzeit verfügbar und können in das Überwachungssystem integriert werden. Der Einsatz verschiedener Sensortypen und Überwachungssysteme steht in direktem Zusammenhang mit dem Hauptgrund und dem erwarteten Ergebnis der Überwachung.

#### Überwachung von Schäden oder Fehlfunktionen an Lagern

Zur einfachen Erkennung eines Lagerschadens können Beschleunigungssensoren verwendet werden, um das dynamische Verhalten der Struktur und/oder des Lagers aufzuzeichnen. Im Falle einer Schädigung des Lagers kann das unregelmäßige modale Verhalten der Struktur oder ein hohes Maß an Vibrationen am Lager ein Auslöser für eine Schadensmeldung sein [90]. Verschiedene Arten von Wegaufnehmern können auch verwendet werden, um signifikante Verschiebungsänderungen an den Strukturelementen in der Lagerumgebung zu überwachen, die auf eine Beschädigung oder Fehlfunktion hinweisen.

#### Überwachung der Lagerbewegungen

Die gebräuchlichste Methode zur Überwachung von Lagerbewegungen basiert auf der Anwendung von LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers) und Tiltmetern. LVDT's und Tiltmeter können problemlos auf neuen und bestehenden Brücken eingesetzt werden. Gemäß [112] sind LVDT's gut geeignet, um kurzfristige Verformungen im Feld zu überwachen.

Faseroptische Sensoren eignen sich auch zur Messung von Lagerbewegungen [114], [115]. Sie wurden in [113] für Messungen der Verschiebungen von elastomeren Brückenlagern verwendet.

#### Überwachung der Belastungen von Lagern

Neue Lager können zur Belastungsüberwachung mit eingebetteten Sensoren ausgestattet werden.

Es können verschiedene Arten von Sensoren verwendet werden. Herkömmliche Methoden, die auf der Verwendung verschiedener Arten von Dehnungsmessstreifen basieren, können wie in [113] beschrieben verwendet werden. Piezoelektrische Elemente innerhalb eines konventionellen Topflagers und eines Gummi-Elastomerlager wurden zur Messung der vertikalen Lagerreaktionen verwendet [116]. Wägezellen wurden in verschiedenen Leistungstests an Lastmesstopflagern [117] sowie an realen Brücken [118], [119] eingesetzt. Außerdem wurden faseroptische Sensoren zur Messung der Traglasten eingesetzt [120]. Die Überwachung der Traglasten an bestehenden Brücken ist etwas schwieriger. Bei bestehenden Brücken ist es jedoch möglich, die Tragfähigkeit zu beurteilen, indem man die Prüflast mit dem bekannten Gewicht des Lkw als Last auf der Brücke durchführt. Während der Prüflast sind Dehnungen von Lagerelementen und Verschiebungen zu messen.

### 2.12.4 Mathematische Modellierung von Monitoring

Die mathematische Modellierung von Monitoring ist z. B. in [39] beschrieben. In der Literaturrecherche wird auf eine Beschreibung verzichtet, denn das Thema ist in Kapitel 3.3 aufgegriffen.

## 3 Bayes'sche Entscheidungstheorie in Bezug auf den Nutzen von Monitoringmaßnahmen

Die Grundlage der Bayes'sche Wahrscheinlichkeit und Entscheidungstheorie ist in Kapitel 2.6 und 2.6.1 behandelt. In diesem Kapitel wird deren Anwendung auf die Problemstellung dieser Studie beschrieben: die Bestimmung des Nutzens von Monitoringmaßnahmen.

### 3.1 Einleitung

Nachfolgend werden die Grundlagen zur informierten Entscheidungsfindung basierend auf Monitoringmessungen erläutert: das Value of Information Konzept.

Das Value of Information Konzept wurde von [24] und [174] formalisiert. Gemäß [174], ist der Value of

Information von Monitoring definiert als Differenz zwischen dem Erwartungswert der Kosten  $K$  für den Betrieb der Infrastruktur, wenn kein Monitoringüberwachung installiert ist, und dem Erwartungswert der Kosten  $K^*$  für den Betrieb der Infrastruktur, wenn eine Monitoringüberwachung installiert ist. Der Value of Information kann als maximaler Preis verstanden werden, welchen der Infrastrukturbetreiber bereit ist für die Informationen aus dem SHM zu bezahlen.

Nachfolgend wird im Kapitel 3.2 die Bestimmung des Value of Information anhand eines einfachen fiktiven Beispiels beschrieben. Diese Ausführungen beruhen auf [20]. Im Kapitel 3.3 wird auf die Modellierung von Monitoring, und insbesondere auf die Modellierung des stochastischen Zusammenhangs zwischen Bauteilzustand und Monitoringmessungen eingegangen.

## 3.2 Bayes'sche Entscheidungsanalysen

Prinzipiell besteht die Aufgabe des Ingenieurs darin, eine Entscheidungsgrundlage für die Planung, den Entwurf, den Bau, den Betrieb und den Unterhalt von technischen Anlagen zu liefern. Dabei sollte der für die ganze Lebensdauer der Anlage berechnete Nutzen maximiert und gleichzeitig die Anforderungen des Gesetzgebers und der Gesellschaft bezüglich Sicherheit des Personals und der Umwelt erfüllt werden.

Da die verfügbare Information (etwa über Einwirkungen, Materialeigenschaften, zukünftige Arbeitsbedingungen oder Abnutzungsprozesse) unvollständig oder unsicher ist, kann man von einem Entscheidungsproblem bei unsicherer Information sprechen.

Das vorliegende Kapitel bespricht einige Grundfragen der Entscheidungsfindung bei unsicherer Information die auf der Bayes'schen Entscheidungstheorie aufbaut. Die Darstellung betrachtet ihrerseits allgemeine Aspekte der Entscheidungstheorie und illustriert sie anhand eines einfachen Beispiels<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Das Beispiel ist fiktiv: weder die Wahrscheinlichkeiten noch die Konsequenzen haben einen Zusammenhang mit der Realität und sollen in der Praxis auf keinem Fall übernommen werden.

Schließlich wird das Entscheidungsproblem der Risikoanalyse im allgemeinen Rahmen der Entscheidungstheorie vorgestellt.

### 3.2.1 Der Entscheidungs-/Ereignis-Baum

Bei praktischen Entscheidungsproblemen bezüglich Betrieb und Unterhalt von komplexen Infrastrukturobjekten, kann die Anzahl der Entscheidungsalternativen hoch sein, weshalb ein Rahmen für die systematische Analyse der Konsequenzen zweckmäßig ist. Ein Entscheidungs-/Ereignis-Baum wie in Bild 14 kann eine zweckmäßige Beschreibung des Entscheidungsproblems liefern.

Um den Entscheidungs-/Ereignis-Baum von Bild 14 zu erläutern, betrachten wir folgendes, sehr einfaches Entscheidungsproblem. Es wird ein bestehendes Schrägkabelbrückenbauwerk betrachtet, bei dem die Kabel sehr alt sind und von denen der Betreiber nicht weiß ob sie noch sicher sind. Bei einem Kabelversagen muss damit gerechnet werden, dass das gesamte Brückenbauwerk versagt.

Der Betreiber muss somit entscheiden, ob er die Kabel belässt bis die Brücke durch einen Ersatzneubau ersetzt wird, und so das Risiko eingeht, dass die Brücke versagt, oder die Kabel sofort ersetzt. Wenn sich der Betreiber für einen Ersatz entscheidet, entstehen Unterhaltskosten von 500. Falls er sich dafür entscheidet die Kabel zu belassen und abzuwarten entstehen vorerst keine Kosten, jedoch muss berücksichtigt werden, dass bei

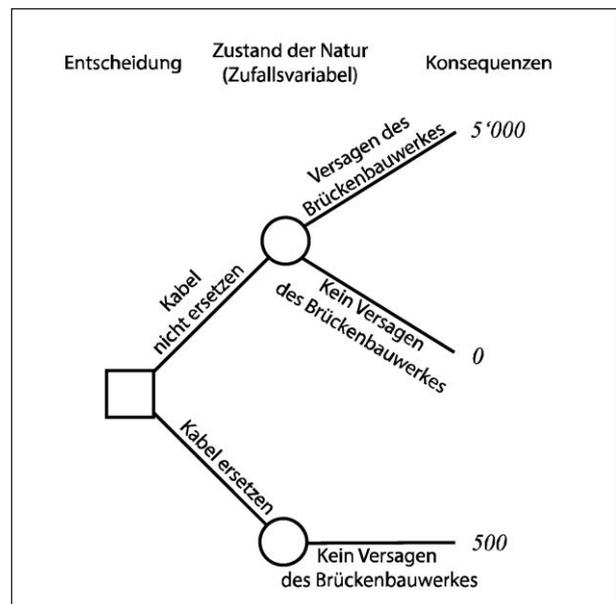


Bild 14: Entscheidungs-/Ereignis-Baum [eigene Darstellung]

einem Brückenversagen Sach- und Personenschäden entstehen (5.000). Werden die Kabel nicht ersetzt und die Brücke versagt nicht, entstehen keine Kosten. Aufgrund seiner Erfahrung schätzt der Brückenbetreiber die Versagenswahrscheinlichkeit des Brückenbauwerks mit den alten Kabeln auf 0,07.

Wir berücksichtigen hier den Grundsatz, wonach die Entscheidungen aufgrund der Erwartungswerte für die entsprechenden Konsequenzen getroffen werden müssen. Dieses Problem wird im Folgenden näher beleuchtet.

### 3.2.2 Entscheidungen aufgrund von Erwartungswerten

Nachfolgend wird das Entscheidungsproblem abstrakt beschrieben, bevor wieder auf das konkrete Beispiel eingegangen wird.

Man betrachte den einfachen Fall einer Entscheidung zwischen den folgenden zwei Handlungen  $a_0$  und  $a_1$ . Die Konsequenz von Handlung  $a_1$  ist mit Sicherheit  $K_1$ , während die Konsequenzen von Handlung  $a_0$  unsicher sind. Der Zustand mag  $z_1$  mit der Konsequenz  $K_{0,1}$  sein oder  $z_2$  mit Konsequenz  $K_{0,2}$ . Der Entscheidungs-/Ereignis-Baum erscheint in Bild 15.

Bevor der wahre Zustand bekannt ist, hängt die optimale Entscheidung von der Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Möglichkeiten und vom Ausmaß der Konsequenzen  $K_{0,1}$ ,  $K_{0,2}$  und  $K_1$  ab.

Vor einer weiteren Analyse des Problems muss man nun die Präferenzen des Ingenieurs bzw. des Entscheidungsträgers in Zahlen ausdrücken. Nimmt

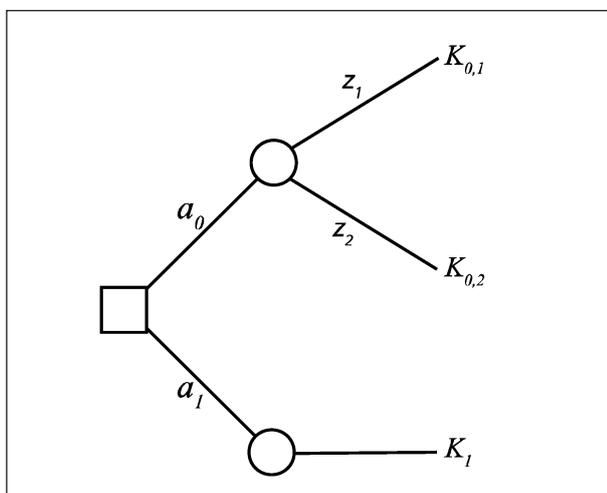


Bild 15: Entscheidungs-/Ereignis-Baum zur Illustration eines typischen Entscheidungsproblems [eigene Darstellung]

man an, dass der Entscheidungsträger lieber  $K_{0,2}$  als  $K_{0,1}$ , lieber  $K_1$  als  $K_{0,1}$  und lieber  $K_{0,2}$  als  $K_1$  hätte, so kann man die Präferenzen durch eine Funktion  $u$  ausdrücken mit:

$$u(K_{0,2}) > u(K_1) > u(K_{0,1}) \quad \text{Gl. 24}$$

Es geht nun darum, eine besondere Funktion, die sog. Nutzenfunktion, so zu wählen, dass man konsequent zwischen  $a_1$  und  $a_0$  entscheiden kann, indem man  $u(K_1)$  mit dem Erwartungswert aus Handlung  $a_0$  vergleicht, nämlich

$$p \cdot u(K_{0,2}) + (1-p)u(K_{0,1}) \quad \text{Gl. 25}$$

wobei  $p$  die Wahrscheinlichkeit des Zustandes  $\theta_1$  ist.

Unter der Annahme, dass  $u(K_{0,1})$  und  $u(K_{0,2})$  geeignete Werte erhalten haben, lautet nun die Frage: Welchen Wert soll  $u(K_1)$  bekommen, um den Erwartungswert zu einem gültigen Entscheidungskriterium zu machen? Falls die Wahrscheinlichkeit des Zustands  $\theta_1$  gleich 0 ist, so würde der Entscheidungsträger  $a_0$  statt  $a_1$  wählen, da er  $K_{0,2}$  gegenüber  $K_1$  bevorzugt. Ist dagegen die Wahrscheinlichkeit des Zustands  $\theta_1$  gleich 1, so wählt er  $a_1$  statt  $a_0$ . Für eine unbestimmte Wahrscheinlichkeit des Zustands  $\theta_1$ ,  $p^*$  zwischen 0 und 1 kann die Wahl zwischen  $a_0$  und  $a_1$  nicht mehr eindeutig getroffen werden (Indifferenz). Der Wert  $p^*$  und  $u(K_1)$  hängen wie folgt zusammen:

$$u(C) = p^* u(K_{0,1}) + (1-p^*)u(K_{0,2}) \quad \text{Gl. 26}$$

Also muss  $u(K_1)$  für alle Werte von  $p^*$  zwischen  $u(K_{0,1})$  und  $u(K_{0,2})$  liegen und deshalb ist die Nutzenfunktion mit den angegebenen Präferenzen konsistent. Zusätzlich sieht man, dass der verantwortliche Ingenieur Handlung  $a_0$  statt  $a_1$  nur dann wählen sollte, wenn der Erwartungswert  $E[u|a_0]$  des Nutzens dieser Handlungsalternative größer ist als  $E[u|a_1]$ . Man sieht aus Gleichung 27, dass dies für alle  $p$  grösser als  $p^*$  und mit  $u(C)$  gilt:

$$\begin{aligned} u(K_1) &> p u(K_{0,1}) + (1-p)u(K_{0,2}) \\ c \\ p^* u(K_{0,1}) + (1-p^*)u(K_{0,2}) &> u(K_{0,1}) + (1-p)u(K_{0,2}) \\ c \\ u(K_{0,2}) + (u(K_{0,1}) - u(K_{0,2})) p^* &> u(K_{0,2}) + (u(K_{0,1}) - u(K_{0,2})) p \end{aligned} \quad \text{Gl. 27}$$

Hat der Entscheidungsträger also  $u(K_1)$  aufgrund seiner Präferenzen ( $K_{0,2}$  vor  $K_1$  und  $K_1$  vor  $K_{0,1}$ )

und der Indifferenzwahrscheinlichkeit  $p^*$  konsistent bewertet, so entscheidet die Rangliste der Erwartungswerte über die Rangliste der Handlungen.

### 3.2.3 Entscheidungsfindung unter Unsicherheit

Hat man das Entscheidungsproblem durch einen Entscheidungs-/Ereignis-Baum dargestellt und die Nutzen- sowie Wahrscheinlichkeitswerte geeignet gewählt, so kann man die Entscheidungsalternativen zahlenmäßig auswerten. Je nach dem Informationsstand zur Zeit der Entscheidung unterscheidet man zwischen drei Arten der Analyse: a-priori, a-posteriori und prä-posteriori Analyse. Jede dieser drei Arten ist bei praktischen Anwendungen der Entscheidungsanalyse wichtig und soll deshalb hier kurz besprochen werden.

### 3.2.4 Entscheidungsanalyse bei bekannter Information – a-priori Analyse

Hat man die Nutzenfunktion definiert und die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Zustände des Umfelds geschätzt, so reduziert sich die Analyse auf die Berechnung des erwarteten Nutzens für jede der möglichen Handlungen. Im Folgenden wird der Nutzen vereinfachend durch die Kosten dargestellt, also entspricht die optimale Entscheidung einer Minimierung der erwarteten Kosten, was einer Maximierung des erwarteten Nutzens gleichkommt.

An dieser Stelle heißt die probabilistische Beschreibung (Wahrscheinlichkeit)  $P[z]$  der Zustände eine A-priori-Wahrscheinlichkeit und sie wird  $P'[z]$  geschrieben.

Um diese a-priori Entscheidungsanalyse zu illustrieren, betrachten wir wieder das Entscheidungsproblem von Kapitel 3.2.2 und formulieren es wie folgt: Der Entscheidungsträger hat die Wahl zwischen zwei Handlungen:

- $a_0$ : Kabel nicht ersetzen,
- $a_1$ : Bestehende Kabel mit neuen ersetzen.

Die möglichen Zustände des Kabels sind:

- $z_1$ : die Traglast der Kabel ist nicht ausreichend (Brücke versagt),
- $z_2$ : die Traglast der Kabel ist ausreichend (Brücke versagt nicht).

Die a-priori Wahrscheinlichkeiten für die Zustände  $z_1$  und  $z_2$  sind:

$$P'[z_1] = 0,07 \text{ und}$$

$$P'[z_2] = 0,93.$$

Aufgrund dieser a-priori Information berechnet man die erwarteten Kosten  $E'[K]$  durch:

$$\begin{aligned} E'[K] &= \min\{P'[z_1] \cdot (5000) + P'[z_2] \cdot 0; 500\} \\ &= \min\{350; 500\} = 350 \end{aligned} \quad \text{Gl. 28}$$

Der Entscheidungs-/Ereignis-Baum wird in Bild 16 zusammen mit den erwarteten Kosten für die beiden Entscheidungsalternativen dargestellt.

Man sieht, dass Handlung  $a_0$  (bestehende Kabel nicht ersetzen) zu niedrigeren Kosten (höherer erwarteter Nutzen) führt, sodass diese Alternative die optimale Entscheidung darstellt.

### 3.2.5 Entscheidungsanalyse mit zusätzlicher Information – a-posteriori Analyse

In der a-priori Entscheidungsanalyse wurde die Möglichkeit, die Kabel mit Monitoring zu überwachen, nicht berücksichtigt. Steht dank Monitoring zusätzliche Information über den Zustand der Kabel zur Verfügung, so kann man den probabilistischen Rahmen für die Entscheidungsanalyse aktualisieren, worauf man die Analyse analog zur Situation mit gegebener a-priori Information fortsetzen kann.

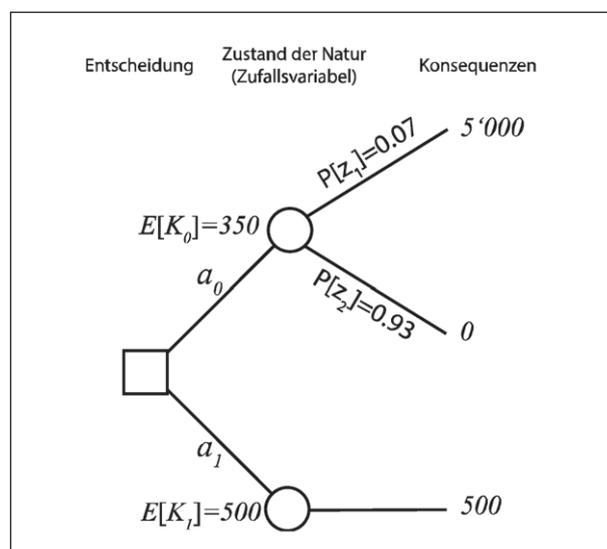


Bild 16: Einfaches Entscheidungsproblem mit zugeordneten a-priori Wahrscheinlichkeiten und Konsequenzen [eigene Darstellung]

Sind die Monitoringergebnisse  $\theta_i$  vorhanden, so wird die aktualisierte (oder die a-posteriori) Wahrscheinlichkeit  $P''[z_k]$  des Zustands  $z_k$  mithilfe der Bayes'schen Formel berechnet:

$$P''[z_k] = \frac{P[\theta_i|z_k] P'[z_k]}{\sum_j P[\theta_i|z_j] P'[z_j]} \quad \text{Gl. 29}$$

Dies kann auch wie folgt erklärt werden:

$$\left( \begin{array}{l} \text{A-posteriori Wahrscheinlichkeit für} \\ \text{Zustand } z_k \text{ gegeben die Beobachtung} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{Normierungs-} \\ \text{faktor} \end{array} \right) \cdot \left( \begin{array}{l} \text{Likelihood der Beobachtung} \\ \text{gegeben Zustand } z_k \end{array} \right) \cdot \left( \begin{array}{l} \text{A-priori Wahrschein-} \\ \text{lichkeit für Zustand } z_k \end{array} \right) \quad \text{Gl. 30}$$

Der Normierungsfaktor sorgt dafür, dass  $P'[z_k]$  zu einer echten Wahrscheinlichkeit wird. Die Mischung zwischen neuer und alter Information erscheint durch die Likelihood der Beobachtung  $P[\theta_i|z_k]$  und die a-priori Wahrscheinlichkeit ist  $P'[z_k]$ . Die Likelihood ist die bedingte Wahrscheinlichkeit einer Beobachtung  $\theta_i$  gegeben dem wahren Zustand  $z_k$ .

Bild 17 illustriert die entsprechenden a-priori und a-posteriori Dichtefunktionen zusammen mit den

Likelihoodfunktionen. Im ersten Fall ist die a-priori Information stark und die Likelihood schwach (kleiner Stichprobenumfang), im zweiten Fall sind a-priori Information und Likelihood von vergleichbarer Stärke, im letzten Fall ist die a-priori Information relativ schwach im Vergleich zu der Likelihood.

Zurück zum Beispiel: Es wird nun davon ausgegangen, dass die Brückenkelabel mittels Monitoring überwacht werden. Es wird angenommen, dass das Monitoringergebnis folgende drei diskrete Schädigungsindikationen umfassen kann:

- $\theta = I_1$ : Keine Schädigung,
- $\theta = I_2$ : Kleine Schädigung,
- $\theta = I_3$ : Große Schädigung.

Die Information aus dem Monitoring ist mit Unsicherheiten verbunden, und die Likelihood der wahren Brückenzustände unter den verschiedenen, oben beschriebenen Indikationen ist in Tabelle 3 gegeben.

Wird nun angenommen, dass das Monitoring ein Resultat  $\theta = I_2$  (kleine Schädigung) anzeigt, so kann man aufgrund einer A-posteriori Entscheidungsanalyse feststellen, ob nun abgewartet oder einen so-

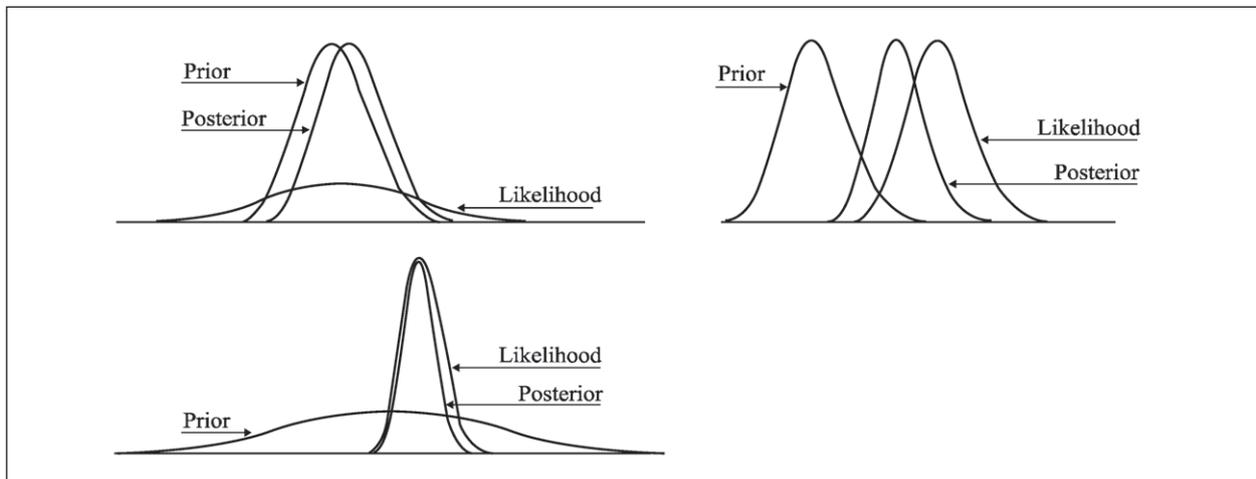


Bild 17: Illustration der Aktualisierung von Wahrscheinlichkeiten [eigene Darstellung]

	Wahrer Zustand der Brücke	
	$z_1$ : Traglast der Kabel ist nicht ausreichend	$z_2$ : Traglast der Kabel ist ausreichend
$\theta = I_1$ : Keine Schädigung ersichtlich	0,1	0,8
$\theta = I_2$ : Schädigung ersichtlich	0,2	0,1
$\theta = I_3$ : Große Schädigung ersichtlich	0,7	0,1

Tab. 3: Likelihood der wahren Brückenzustände bedingt durch die Ergebnisse des Monitorings

fortigen Ersatzneubau die optimale Entscheidung darstellt.

Die A-posteriori Wahrscheinlichkeiten  $P''[z|\theta]$  gegeben das Monitoringergebnis  $\theta = I_2$ :

$$P''[z_1 | I_2] = \frac{P[I_2 | z_1]P'[z_1]}{P[I_2 | z_1]P'[z_1] + P[I_2 | z_2]P'[z_2]}$$

$$= \frac{0.2 \cdot 0.07}{0.2 \cdot 0.07 + 0.1 \cdot 0.93} = 0.13$$

$$P''[z_2 | I_2] = \frac{P[I_2 | z_2]P'[z_2]}{P[I_2 | z_1]P'[z_1] + P[I_2 | z_2]P'[z_2]}$$

$$= \frac{0.1 \cdot 0.93}{0.2 \cdot 0.07 + 0.1 \cdot 0.93} = 0.87 \quad \text{Gl. 31}$$

und sind in Bild 18 dargestellt. Hat man nun die aktualisierten Wahrscheinlichkeiten berechnet, so erhält man den a-posteriori Erwartungswert  $E''[K|I_2]$  des Nutzens der optimalen Handlung:

$$E''[K | I_2] = \min\{P''[z_1 | I_2] \cdot (5000) + P''[z_2 | I_2] \cdot 0; 500\}$$

$$= \min\{650; 500\} = 500 \text{ ME} \quad \text{Gl. 32}$$

Aus der Rechnung geht hervor, dass unter Beachtung der neuen Information die optimale Entscheidung nun  $a_1$  ist (Kabel ersetzen). Der dazugehörige Entscheidungsbaum wird in Bild 18 gezeigt.

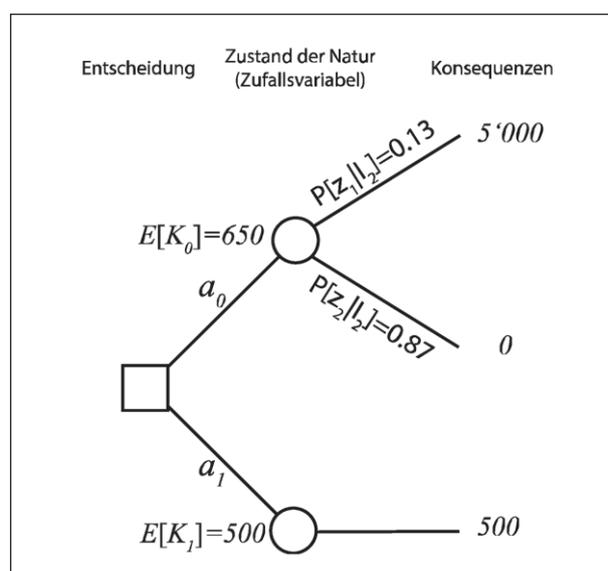


Bild 18: Illustration des Entscheidungs-/Ereignis-Baums für das Problem der Wasserversorgung [eigene Darstellung]

### 3.2.6 Entscheidungsanalyse mit „unbekannter“ Information – prä-posteriori Analyse

Aus dem Beispiel geht hervor, dass die zusätzliche Information aus der Monitoringüberwachung zu einer Verbesserung der Entscheidungsgrundlage beiträgt und somit einen Nutzen hat. Es ist aber klar, dass diese Informationen nicht umsonst zu haben sind, denn das Monitoring verursacht Kosten und die Grundfragestellung dieser Studie ist es, vor der Installation eines Monitoringsystems zu berechnen ob dessen Nutzen größer als dessen Kosten sind. Dazu wird eine prä-posteriori Entscheidungsanalyse verwendet.

Betrachtet man wieder das Beispiel des vorigen Abschnitts, wird das Entscheidungsproblem auf die Frage reduziert, ob man ein Monitoringsystem an dem Kabel installieren soll oder nicht. Dabei werden die erwarteten Kosten für den Brückenbetrieb ohne respektive mit Monitoringsystem bestimmt:

- Wird kein Monitoringsystem installiert, entsprechen die erwarteten Kosten den a-priori Berechnungen im Kapitel 3.2.4, das heißt  $E'[K] = 350$  ME.
- Wird ein Monitoringsystem installiert, werden die erwarteten Kosten  $E[K]$  mit der prä-posteriori (unter Vernachlässigung der Monitoringkosten  $K_m$ , mehr dazu unten) wie folgt bestimmt:

$$E[K] = \sum_{i=1}^n P'[I_i] E''[K|I_i] = \sum_{i=1}^n P'[I_i] \min\{E''[K(a_j)|I_i]\}$$

Gl. 33

wobei  $n$  die Anzahl der verschiedenen Monitoringergebnisse ist und  $m$  die Anzahl der verschiedenen Entscheidungsalternativen bezeichnen. In Gleichung 33 ist  $P'[I_i]$  (die a-priori Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoringergebnis  $\theta = I_i$ ) der einzige neue Ausdruck gegenüber den früheren Abschnitten. Er wird berechnet durch:

$$P'[I_i] = P[I_i | z_1]P'[z_1] + P[I_i | z_2]P'[z_2] \quad \text{Gl. 34}$$

Aus den Angaben in den Kapiteln 3.2.4 und 3.2.5 berechnet man die a-priori Wahrscheinlichkeiten  $P'[I_1]$ ,  $P'[I_2]$  und  $P'[I_3]$  dafür, dass der Inspektion eine der möglichen Indikationen liefert, durch:

$$P'[I_1] = P[I_1 | z_1]P'[z_1] + P[I_1 | z_2]P'[z_2]$$

$$= 0.1 \cdot 0.07 + 0.8 \cdot 0.93 = 0.75$$

$$P'[I_2] = P[I_2|z_1]P'[z_1] + P[I_2|z_2]P'[z_2]$$

$$= 0.7 \cdot 0.07 + 0.1 \cdot 0.93 = 0.14$$

$$P'[I_3] = P[I_3|z_1]P'[z_1] + P[I_3|z_2]P'[z_2]$$

$$= 0.2 \cdot 0.07 + 0.1 \cdot 0.93 = 0.11 \quad \text{Gl. 35}$$

Die a-posteriori Wahrscheinlichkeiten  $P''[z_i|I_1]$ ,  $P''[z_i|I_2]$  und  $P''[z_i|I_3]$  sind im Kapitel 3.2.5 bereits berechnet. Daraus ergeben sich die a-posteriori erwarteten Kosten gemäß Gleichung 36:

$$E''[K|I_1] = \min\{P''[z_1|I_1] \cdot (5000) + P''[z_2|I_1] \cdot 0; 500\}$$

$$= \min\{0.009 \cdot 5000 + 0.991 \cdot 0; 500\}$$

$$= \min\{45; 500\} = 45 \text{ ME} \quad \text{Gl. 36}$$

$$E''[K|I_2] = \min\{P''[z_1|I_2] \cdot (5000) + P''[z_2|I_2] \cdot 0; 500\}$$

$$= \min\{0.13 \cdot 5000 + 0.87 \cdot 0; 500\}$$

$$= \min\{650; 500\} = 500 \text{ ME} \quad \text{Gl. 37}$$

$$E''[K|I_3] = \min\{P''[z_1|I_3] \cdot (5000) + P''[z_2|I_3] \cdot 0; 500\}$$

$$= \min\{0.35 \cdot (5000) + 0.65 \cdot 0; 500\}$$

$$= \min\{1750; 500\} = 500 \text{ ME} \quad \text{Gl. 38}$$

Berücksichtigt man zusätzlich die Monitoringkosten  $K_m$ , so berechnet man die erwarteten Gesamtkosten durch:

$$E[K] = E''[K|I_1]P'[I_1] + E''[K|I_2]P'[I_2] + E''[K|I_3]P'[I_3]$$

$$= (45 + K_m) \cdot 0.75 + (500 + K_m) \cdot 0.14 + (500 + K_m) \cdot 0.11$$

$$= (317 + K_m) \text{ GE} \quad \text{Gl. 39}$$

Der Vergleich der erwarteten Kosten mit und ohne Monitoringsystem erlaubt es Entscheidungen, ob sich ein Monitoringsystem lohnt, zu treffen (siehe Kapitel 3.2.7).

### 3.2.7 Value of Information

Der Vergleich mit den erwarteten Kosten in der a-priori Analyse zeigt, dass man eine Inspektion durchführen sollte, falls seine Kosten  $K_m$  kleiner sind als 33 ME:

$$E'[K] - E[K] = 350 - (317 + K_m) = 33 - K_m \quad \text{Gl. 40}$$

Aus dieser Berechnung kann direkt das Konzept der Value of Information abgeleitet werden.

Die Information, die durch das Monitoring zur Verfügung steht, erlaubt es die Brücke mit kleineren erwarteten Kosten zu betreiben. Somit kann ohne weiteres festgehalten werden, dass die Information einen Wert hat, nämlich:

$$\text{Vol} = E'[K] - E[K] \quad \text{Gl. 41}$$

Ist  $\text{Vol} > 0$  lohnt es sich ex-ante ein Monitoringsystem durchzuführen.

Die Value of Information Analyse (Vol-Analyse) basiert auf den Grundsätzen zur Entscheidungsfindung unter Unsicherheit [24]. Das bedeutet, dass im Einzelfall möglicherweise in einer ex-post Betrachtung ein Monitoring nicht sinnvoll war, welches in der ex-ante Betrachtung als gerechtfertigt eingestuft wurde. Bei einer größeren Anzahl von Entscheidungen wird die Anwendung des Konzepts der Value of Information Analyse jedoch im Mittel zu optimalen Entscheidungen führen.

## 3.3 Modellierung von Monitoring

Zur Bestimmung des Wertes von Monitoring wird ein quantitatives Modell benötigt, welches den Zusammenhang herstellt zwischen den Resultaten des Monitorings und den relevanten Schädigungsparametern des Bauwerks. Ein solches Modell beschreibt die Qualität und Fähigkeiten des Monitorings, Schäden im Bauwerk zu identifizieren und/oder zu charakterisieren. Es gibt qualitative Modelle [175], welche für die erste Auswahl von geeigneten Monitoringtechnologien verwendet werden können. Diese erlauben aber keine Quantifizierung des Effekts von Monitoring. Daher liegt der Fokus hier auf Modellen, welche den Einfluss des Monitorings auf das Modell des Bauwerkszustandes quantifizieren. Der Bauwerkszustand wird dabei über die Parameter  $\Theta$  beschrieben, welche als Zufallsvariablen modelliert sind<sup>12</sup>.

Es können grundsätzlich drei Situationen des Monitoring-Einsatzes unterschieden werden, welche in Bild 19 skizziert sind.

1. Die mit dem Monitoringsystem beobachtbaren Größen sind direkt Parameter des Schädigungs-

<sup>12</sup> Im Kapitel 3.3 werden unterschiedliche Parameter- und Variabelbezeichnungen verwendet als im Kapitel 4.

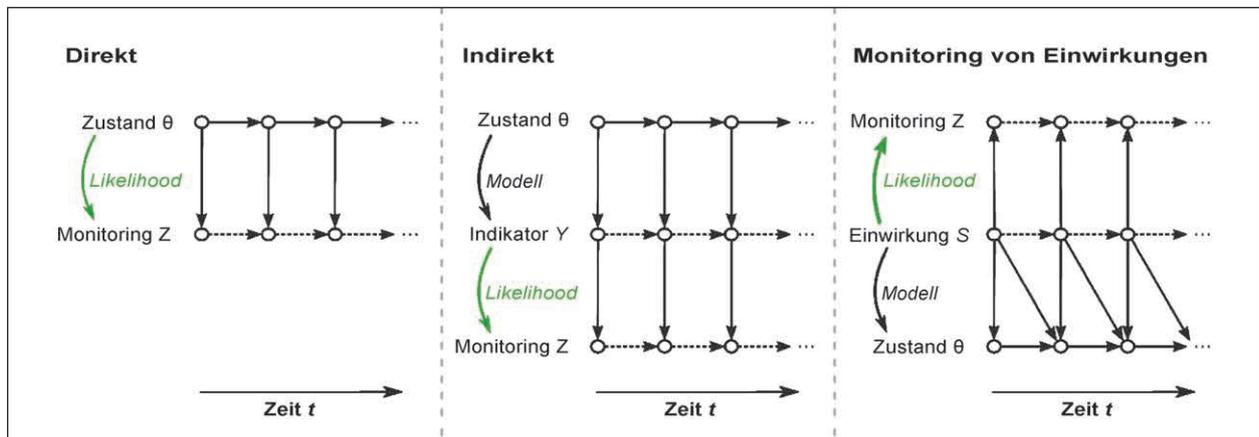


Bild 19: Unterschiedliche Situationen beim Einsatz von Monitoring [eigene Darstellung]

oder Zustandsmodells, d. h. Teil von  $\Theta$  (Bild 19, links), etwa wenn ein Korrosionsabtrag gemessen wird, welcher direkt im Korrosionsmodell und dem Bauwerksmodell als Parameter erscheint.

2. Die mit dem Monitoringsystem beobachtbaren Größen sind nur indirekt mit dem Schädigungs- oder Zustandsmodell verknüpft, über messbare Indikatoren  $Y$ , welche mit dem Zustand korreliert sind (Bild 19, Mitte). Dies ist etwa der Fall beim Monitoring eines Risses, welcher auf Schäden in der Vorspannung hinweisen.
3. Schließlich sind Monitoringsysteme im Einsatz, welche die Einwirkungen aufs Tragwerk messen, wie etwa Weigh-In-Motion (Bild 19, rechts). Auf diesen letzten Fall wird hier nicht näher eingegangen, da der Fokus des Projektes nicht auf dieser Art von Monitoring liegt. Quantitative Modelle für die Qualität des Monitorings in diesem Fall sind allerdings konzeptionell auch eher einfacher als für die anderen beiden Fälle.

Das Ziel von Monitoring ist es, Informationen zu gewinnen, welche die Unsicherheit über den Zustand des Bauwerkes reduzieren. Diese Information lässt sich mathematisch in allgemeiner Form über die sogenannte Likelihood Funktion<sup>13</sup>  $L(\theta)$  definieren. Im Fall 1 ist diese:

$$L(\theta) \propto \Pr(Z|\theta = \theta) \quad \text{Gl. 42}$$

<sup>13</sup> Die Likelihood-Funktion wird in der Mathematik ganz allgemein verwendet, um Messresultate zu beschreiben. Von ihr rührt auch die Maximum Likelihood Methode her, dass meistverwendete statistische Schätzverfahren.

Dabei ist  $\theta$  der Vektor von Parametern, welche den Zustand des Bauwerkes beschreiben, etwa Parameter eines Schädigungsmodells, und  $Z$  ist das Monitoring-Resultat. Die Reduktion der Unsicherheit im Zustand wird dann mittels einer Bayes'schen Analyse quantifiziert [176], [179]:

$$f_{\theta|Z}(\theta) \propto L(\theta)f_{\theta}(\theta) \quad \text{Gl. 43}$$

$f_{\theta|Z}(\theta)$  ist die aktualisierte Verteilung (die a-posteriori Verteilung) der Bauwerkszustandsparameter gegeben die Monitoringresultate  $Z$ .

Im Fall 2 ist die Likelihood Funktion:

$$L(y) \propto \Pr(Z|Y = y) \quad \text{Gl. 44}$$

Dabei sind  $Y$  die Indikatoren, welche mit dem Zustand des Bauwerkes korreliert sind, etwa die Rissgröße im Beton. Um den Einfluss der Messungen  $Z$  auf das Zustandsmodell zu quantifizieren, ist die Verbindung zwischen Indikatoren  $Y$  und Zustandsparameter  $\theta$  notwendig. Auch diese ist in aller Regel probabilistisch, und über eine weitere bedingte Wahrscheinlichkeit beschrieben:

$$\Pr(Y = y|\theta = \theta) \propto f_{Y|\theta}(y|\theta) \quad \text{Gl. 45}$$

Im Beispiel-Fall handelt es sich etwa um die Wahrscheinlichkeit einer gewissen Rissgröße, bedingt auf den Zustand des Bauwerkes.

Um in diesem Fall den Effekt des Monitorings auf den Bauwerkszustand zu quantifizieren, muss die Bayes'sche Analyse nach Gleichung 43 erweitert werden auf:

$$f_{\theta|Z}(\theta) \propto \int L(y)f_{Y|\theta}(y|\theta)f_{\theta}(\theta) dy \quad \text{Gl. 46}$$

Zur Illustration dieser Beziehungen wird ein einfaches Beispiel betrachtet: Das Auftreten eines Ris-

ses im Bauwerk ( $Y = 1$ ) deutet auf mögliche Schäden hin ( $\theta_t = 1$ ). Die Wahrscheinlichkeit von Schäden ist in einem üblichen Bauwerk bei  $\Pr(\theta_t = 1) = 0.005$ . Bei Schäden tritt ein Riss mit Wahrscheinlichkeit  $\Pr(Y = 1 | \theta_t = 1) = 0.5$  auf. Aber auch ohne Schäden kann es mit einer Wahrscheinlichkeit von  $\Pr(Y = 1 | \theta_t = 0) = 0.01$  zu einem Riss kommen. Kann der Riss nun direkt betrachtet werden, dann entspricht  $Z = Y$  und man erhält den Fall 1. Dann ergibt sich die aktualisierte Wahrscheinlichkeit von Schäden bedingt auf die Beobachtung eines Risses nach Gleichung 43 zu:

$$\begin{aligned} & \Pr(\theta_t = 1 | Z = 1) \\ &= \Pr(Z = 1 | \theta_t = 1) \Pr(\theta_t = 1) \frac{1}{\Pr(Z = 1)} \\ &= 0.5 \cdot 0.005 \cdot \frac{1}{0.5 \cdot 0.005 + 0.01 \cdot 0.995} \\ &= 0.2 \end{aligned} \tag{Gl. 47}$$

Die Beobachtung erhöht somit die Wahrscheinlichkeit eines Schadens von a-priori 0.005 auf a-posteriori 0.2.

Kann nun das Vorhandensein des Risses nicht exakt bestimmt werden, muss die Likelihood für das Entdecken des Risses formuliert werden. Es wird angenommen, dass ein vorhandener Riss mit Wahrscheinlichkeit  $\Pr(Z = 1 | Y = 1) = 0.9$  auch entdeckt wird. Allerdings kann auch bei Nichtvorhandensein eines Risses mit einer Wahrscheinlichkeit von  $\Pr(Z = 1 | Y = 0) = 0.05$  ein Riss identifiziert werden. Die Aktualisierung der Schadenswahrscheinlichkeit erfolgt nun nach Gleichung 46 zu:

$$\begin{aligned} & \Pr(\theta_t = 1 | Z = 1) \\ &= \Pr(Z = 1 | \theta_t = 1) \Pr(\theta_t = 1) \frac{1}{\Pr(Z = 1)} \\ &= 0.5 \cdot 0.005 \cdot \frac{1}{0.5 \cdot 0.005 + 0.01 \cdot 0.995} = 0.2 \\ &= \frac{0.005}{\Pr(Z = 1)} \cdot (0.05 \cdot 0.5 + 0.9 \cdot 0.5) \\ &= 0.039 \end{aligned} \tag{Gl. 48}$$

Dabei ist:

$$\begin{aligned} \Pr(Z = 1) &= 0.005 \cdot (0.05 \cdot 0.5 + 0.9 \cdot 0.5) \\ &\quad + 0.995 \cdot (0.05 \cdot 0.99 + 0.9 \cdot 0.01) \\ &= 0.06 \end{aligned} \tag{Gl. 49}$$

In diesem Fall ist die aktualisierte Wahrscheinlichkeit nur  $\Pr(\theta_t = 1 | Z = 1) = 0.039$  im Vergleich zu  $\Pr(\theta_t = 1 | Z = 1) = 0.2$  beim Fall einer perfekten Beobachtung. Das indirekte Monitoring liefert hier somit wesentlich weniger Information als das perfekte Monitoring, bei dem der Riss direkt beobachtet wird.

Die Form der Likelihoodfunktion im konkreten Anwendungsfall hängt vom Format der Monitoringresultate ab, sowie vom Format der Schädigungsparameter, bzw. Indikatoren ab. In Tabelle 4 sind die unterschiedlichen Fälle aufgelistet.

Die entsprechenden Likelihood-Funktionen sind nachfolgend diskutiert.

- a) Sowohl der Zustandsparameter als auch die Beobachtung ist binär (wie in der obigen Illustration). In diesem Fall ist die Likelihood durch die 2x2 Konfusionsmatrix beschrieben (Tabelle 5). PoD ist die Probability of Detection, also die Wahrscheinlichkeit einen vorhandenen Schaden/Indikator auch zu entdecken. PFA ist die Probability of False Alarm, also die Wahrscheinlichkeit fälschlicherweise einen Schaden/Indikator anzuzeigen. Im obigen Beispiel, Fall 2, ist  $PoD = \Pr(Z = 1 | Y = 1) = 0.9$  und  $PFA = \Pr(Z = 1 | Y = 0) = 0.05$ . PFA hängt nicht von der

		Zustand $\theta$ /Indikator $Y$		
		binär	diskret	stetige Schadensgröße
Monitoring Resultat $Z$	binär	a	b	c
	diskret	b	b	(c)
	stetig	d	(d)	e

Tab. 4: Fallgruppen für das Format von Monitoringresultaten und Schädigungsparametern [eigene Darstellung]

		Zustand $\theta$ /Indikator $Y$	
		kein Schaden/Indikator $\vartheta_t = 0/Y = 0$	Schaden/Indikator $\vartheta_t = 1/Y = 1$
Monitoring Resultat $Z$	keine Indikation $Z = 0$	1 – PFA	1 – PoD
	Indikation $Z = 1$	PFA	PoD

Tab. 5: Falls sowohl Zustand als auch Beobachtung binär sind, ist die Likelihood durch eine 2x2 Konfusionsmatrix beschrieben [eigene Darstellung]

Defektgröße ab. Als Beispiel ist in Bild 20 die Verteilung des resultierenden Potentials  $Z = U$  einer Potenzialfeldmessung gezeigt, bedingt auf einen passiven Zustand  $\theta = \bar{A}$  (d. h. keine Korrosion) und einen aktiven Zustand  $\theta = A$  (d. h. Korrosion).

- b) Wenn der Zustandsparameter ( $\theta$  oder  $Y$ ) und/oder die Beobachtung ( $Z$ ) mehr als zwei Werte annehmen kann, dann ist die Likelihood Funktion eine allgemeine Konfusionsmatrix, in der jeweils die bedingten Wahrscheinlichkeiten von  $Z$  gegeben  $\theta$  oder  $Y$  aufgeführt sind (Tabelle 6). Beispiele für mehrere Zustandsparameter sind etwa die Verwendung von Zustandsnoten zur Beschreibung des Zustands, oder diskrete Schadenszustände im Bauwerk. Mehrere Beobachtungszustände ergeben sich, wenn das Monitoringssystem direkt Prognosen solcher diskreten Zustände macht. Das ist etwa der Fall bei einem System mit Strukturidentifikation [180].
- c) Wenn die Schadens- oder Indikatorengröße stetige Werte annimmt, aber das Monitoringssystem nur diskret Schäden anzeigt oder nicht, dann wird die Likelihood durch einen PoD in Funktion der Schadensgröße beschrieben [177], siehe Bild 21.
- d) Ist der Zustand durch eine binäre (oder diskrete) Größe beschrieben, aber das Monitoring resultiert in einer stetigen Größe  $Z$  (etwa eine Signalstärke), dann wird der Likelihood beschrieben durch die bedingten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen  $f_{Z|\theta}(z|\theta_i)$  für die diskreten Zustände  $\theta_i$ .
- e) Ist sowohl die Schadensgröße als auch das Monitoringresultat stetig, entspricht die Likelihood in der Regel einfach der Wahrscheinlichkeitsdichte des Messfehlers. Dabei handelt es sich um die bedingte Dichte von  $Z$  gegeben  $\theta$  oder  $y$ . Ein Beispiel ist in Bild 22 aufgezeigt.

Wird für die Interpretation des Resultates ein Grenzwert für  $\theta$  festgelegt, dann reduziert sich das Monitoringresultat wieder auf ein binäres (Anzeige einer Schädigung ja/nein) und das Modell reduziert sich auf Fall (a) oder (b). Ein solcher Grenzwert ist auch in Bild 20 eingezeichnet. Zur Methodik für die Bestimmung dieses Grenzwertes wird auf [39] verwiesen.

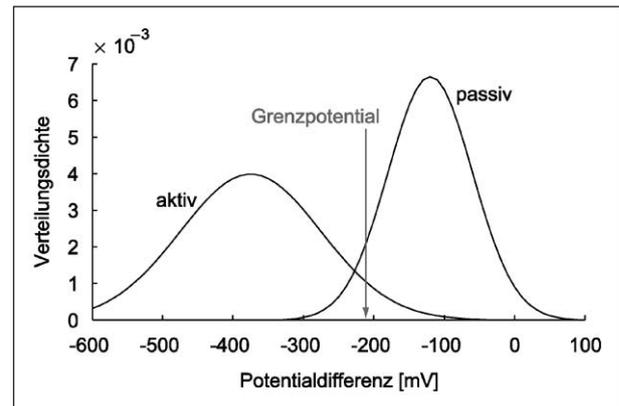


Bild 20: Die beiden Verteilungsdichtefunktionen  $f_{-}(U|A^{-})$  ( $\mu A^{-}$ ) und  $f_{-}(U|A)$  ( $\mu A$ ) für jeweils passive und aktive Be- wehrung, sowie das ermittelte Grenzpotential bei  $-210$  [mV] [39]

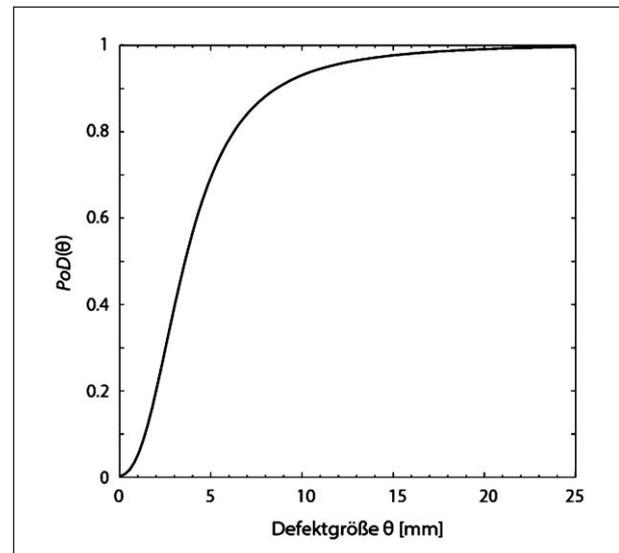


Bild 21: Beispiel PoD Kurve [177]

		Zustand $\theta$ /Indikator $Y$			
		$\vartheta_t = 1/Y = 1$	$\vartheta_t = 2/Y = 2$	$\vartheta_t = 3/Y = 3$	...
Monitoring Resultat $Z$	$Z = 1$	$\Pr(Z = 1   \vartheta_t = 1)$	$\Pr(Z = 1   \vartheta_t = 2)$	$\Pr(Z = 1   \vartheta_t = 3)$	...
	$Z = 2$	$\Pr(Z = 2   \vartheta_t = 1)$	$\Pr(Z = 2   \vartheta_t = 2)$	$\Pr(Z = 2   \vartheta_t = 3)$	...
	$Z = 3$	$\Pr(Z = 3   \vartheta_t = 1)$	$\Pr(Z = 3   \vartheta_t = 2)$	$\Pr(Z = 3   \vartheta_t = 3)$	...
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$

Tab. 6: Allgemeine Konfusionsmatrix [eigene Darstellung]

Durch Veränderung des Grenzwertes verändern sich gleichzeitig PoD und PFA. Im Beispiel von Bild 20 führt ein höherer Grenzwert zu einem höheren PoD und gleichzeitig einem höheren PFA. Auf diese Weise kann die sogenannte ROC (Receiver Operator Characteristics) Kurve generiert werden. Dieses Prinzip ist in Bild 23 dargestellt.

In dieser Studie wird von einem Schwellenwert-Monitoring ausgegangen, was dem Fall a) oder b) entspricht.

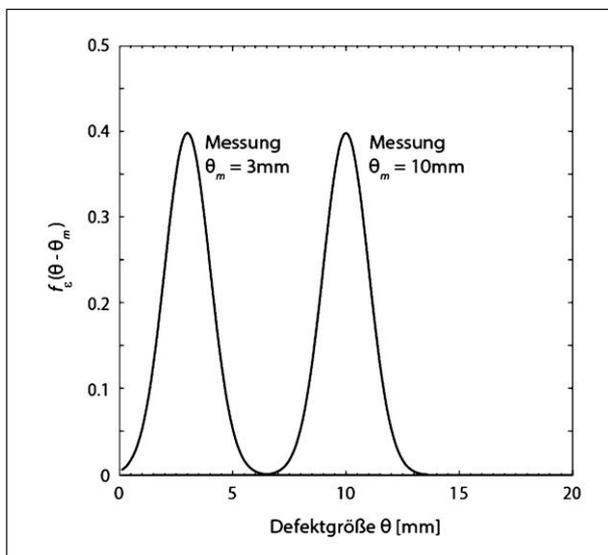


Bild 22: Probabilistische Modellierung des Messfehlers bei zwei unterschiedlichen Messresultaten [177]

## 4 Konzept zur Bestimmung des Nutzens von Monitoring

### 4.1 Einleitung

Ziel ist es, ein praxisnahes Konzept zur Bestimmung des Nutzens von Monitoringmaßnahmen zu entwickeln, das auf dem Deutschen Regelwerk zur Brückenzustandserfassung [2], [187] und etablierten Expertenwissen aufbaut. Das Konzept soll breit anwendbar sein (somit nicht schadensspezifisch, monitoringsystemspezifisch oder brückentypspezifisch), sowie in der Praxis ohne vertiefte Kenntnisse der probabilistischen Modellierung und der Zuverlässigkeitsrechnung anwendbar sein.

Die notwendigen Schritte und Modelle, die zur Umsetzung des Konzepts benötigt werden, werden in den nächsten Kapiteln beschrieben.

Nach der Einleitung wird in Kapitel 4.2 eine Übersicht über das Konzept gegeben. Im Kapitel 4.3 wird die Zustandserfassung, wie sie bereits heute stattfindet, thematisiert. Einen Überblick über die Modellierung des Schadenprozesses und der Zustandsentwicklung des überwachten Bauteils wird in Kapitel 4.4 gegeben. Im Kapitel 4.5 sind Monitoringmaßnahmen thematisiert, im Kapitel 4.6 die Modellierung der Zuverlässigkeit des Brückenbauwerkes. Details zur Formulierung von Unterhalts- und Instandsetzungsstrategien werden im Kapitel 4.7 gegeben. Kapitel 4.8 geht auf die Verkehrsbetriebs-

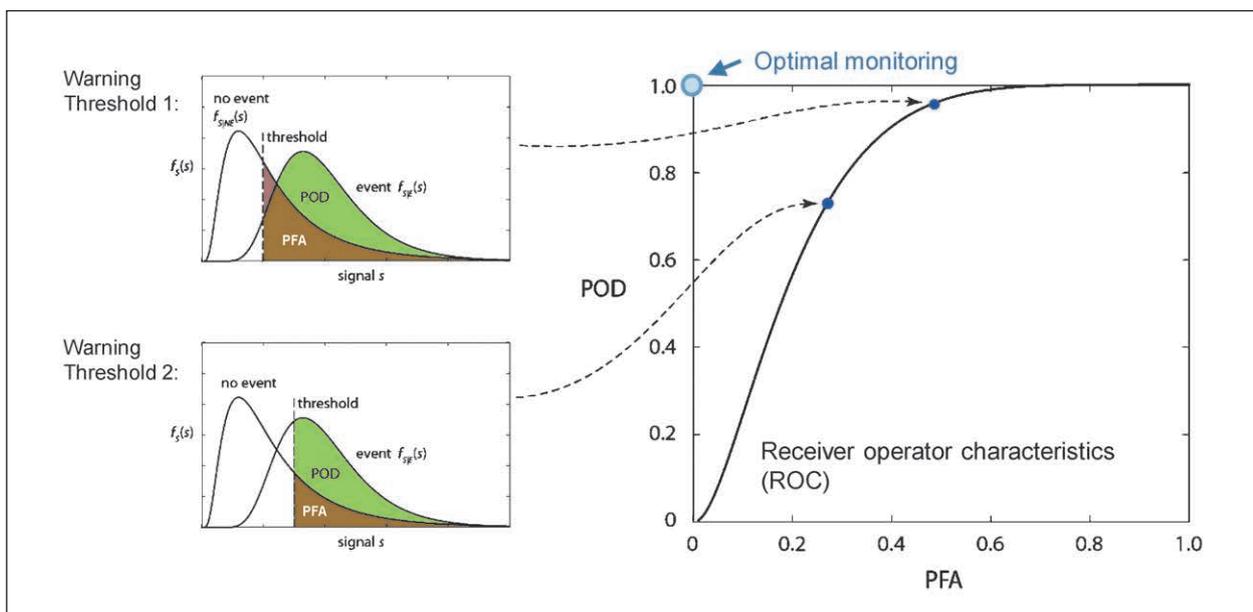


Bild 23: Prinzip der ROC (Receiver Operator Characteristics) Kurve. Durch Verschieben des Grenzwertes kann ein höherer PoD erreicht werden, dies führt aber immer auch zu einer höheren PFA [178]

szenarien ein. Die Ermittlung der Konsequenzen von Verkehrsbetriebsszenarien über sämtliche Wirkungsspektren ist in Kapitel 4.9 gegeben und letztlich in Kapitel 4.10 ist beschrieben, wie die erwarteten Kosten für die Fälle mit und ohne Monitoring bestimmt werden.

Die Ausführungen sind jeweils allgemein gehalten, mit dem Ziel, dass das Konzept auf alle Schädigungs- und Brückentypen anwendbar ist.

#### 4.1.1 Ausgangslage

Monitoring wird als Grundlage für Entscheidungen zum Betrieb, Unterhalt und Instandsetzung des Brückenbauwerks verwendet. Grundsätzlich können Monitoringsysteme zur Unterstützung im Hinblick auf zwei Entscheidungssituationen unterschieden werden:

- Sicherheitsrelevante Entscheidungen bei Schädigungen, die direkt die Sicherheit des Bauwerks und der Verkehrsteilnehmer beeinträchtigen können.
- Dauerhaftigkeitsrelevante Entscheidungen bei Schädigungen, die kurzfristig keine Implikationen für die Sicherheit haben, jedoch für die Dauerhaftigkeit des Bauwerks von Bedeutung sind.

In einigen Fällen können dauerhaftigkeitsrelevante Entscheidungen sicherheitsrelevant werden. Dies ist jedoch eine zeitliche Entwicklung und erstreckt sich über einen längeren Zeitraum. Mit dem hier vorgeschlagenen Konzept können beide Entscheidungstypen untersucht werden, und der Nutzen von Monitoring bestimmt werden. Nachfolgend wird ausschließlich auf sicherheitsrelevanten Entscheidungen eingegangen, das Konzept ist aber für alle Entscheidungen anwendbar.

Das entwickelte Konzept geht davon aus, dass die Entscheidung, ob ein Monitoringsystem installiert werden soll, mit Kenntnis des aktuellen Brückenzustands getroffen wird. Das heißt, es wird angenommen, dass kurz vor der Entscheidung eine Zustandserfassung durchgeführt wurde. Die Zustandsnote wird in diesem Konzept jedoch nicht verwendet, sondern eine ordinale Skala, die das Tragwerk bewertet. Die Einführung einer ordinalen Skala ist notwendig, da die Zustandsnote nicht uneingeschränkt auf den Schädigungsmechanismus zu übertragen ist und generell weiter gefasst ist. Zudem sind Schädigungsmodelle in der Praxis nicht immer verfügbar

und eine Modellierung mit den zur Verfügung stehenden Informationen zum Entscheidungszeitpunkt nicht immer möglich. Die ordinale Skala wird im Konzept als Schwellwertgruppe bezeichnet und repräsentiert den Zustand des Bauteils.

Weiter wird davon ausgegangen, dass nur ein einzelnes Brückenbauteil mit Monitoring überwacht werden soll und, dass es sich hierbei um lokales Monitoring handelt. Ein lokales Monitoring erlaubt es, den Zustand eines Bauteils direkt zu erfassen, ohne das komplexe Systemverhalten des Brückenbauwerks im Detail zu modellieren [193].

## 4.2 Übersicht über das Konzept

Um den Nutzen von Monitoring zu bestimmen, werden sämtliche direkten Kosten für den Brückenbetrieb und die indirekten Kosten, die durch einen beeinträchtigten Brückenbetrieb entstehen, berücksichtigt. Die direkten Kosten für den Brückenbetrieb umfassen die Kosten für Monitoringmaßnahmen, sowie Kosten für Unterhalt und Instandsetzungsmaßnahmen. Die indirekten Kosten umfassen sämtliche Konsequenzen, die ein beeinträchtigter Verkehrsbetrieb auf übergeordnete Systeme verursacht; das heißt, sämtliche Wirkungen einer Verkehrsbehinderung auf die Wirkungsspektren Gesellschaft, Wirtschaft, Umwelt.

Der Nutzen von Monitoring ergibt sich aus der Gegenüberstellung der erwarteten Kosten aus dem Brückenbetrieb für den „Fall 0: Brückenbetrieb ohne Monitoring“, mit den erwarteten Kosten für den „Fall 1: Brückenbetrieb mit Monitoring“. Das Konzept erlaubt es, die erwarteten Kosten in beiden Fällen zu bestimmen und gegenüberzustellen. Das Entscheidungsproblem – „Monitoring oder kein Monitoring“ – und die Formulierung des Nutzens von Monitoring wird nachfolgend in Kapitel 4.2.1 erläutert. Danach wird der Modellierungsansatz in Kapitel 4.2.2 beschrieben.

### 4.2.1 Formulierung des Entscheidungsproblems

Der Infrastrukturbetreiber muss Entscheidungen zu Betrieb, Unterhalt und Instandsetzung von Brückenbauwerken treffen. Zudem steht der Betreiber mitunter vor der Entscheidung, ob es sinnvoll ist das Brückenbauwerk mit einem Monitoringsystem zu überwachen.

Sämtliche Entscheidungen können mithilfe eines formalen Entscheidungsmodells, wie es im Kapitel 2.12 beschrieben ist, getroffen werden. In dieser Studie ist die Entscheidung von Interesse, ob ein Monitoringsystem installiert werden soll oder nicht. Es stehen folgende Entscheidungsalternativen zur Verfügung:

- $a_0$ : Es wird kein Monitoringsystem installiert; Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen werden nach heutiger Praxis durchgeführt.
- $a_1$ : Es wird ein Monitoringsystem installiert; Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen werden in Funktion der Zustandsentwicklung gewählt.

Dies ist eine verbreitete Entscheidungssituation und kann in der Bayes'sche Entscheidungsfindung mit einer prä-posterior Entscheidungsanalyse angegangen werden (siehe Kapitel 2.12). Für beide Entscheidungsalternativen werden die erwarteten Kosten ermittelt und diskontiert zu einem Gegenwartswert  $npv(\cdot)$  summiert, sodass der Nutzen des Monitorings Vol zu

$$\text{Vol} = npv(a_0) - npv(a_1), \quad \text{Gl. 50}$$

bestimmt werden kann.

Als Konsequenzen der beiden Entscheidungsalternativen werden nur Kosten betrachtet. Der eigentliche Nutzen des Brückenbauwerks bei unbehindertem Verkehrsbetrieb wird nicht berechnet, sondern als Referenzfall benutzt; die Kosten, die aus Verkehrsbehinderung entstehen, werden darauf bezogen.

Grundsätzlich sollte  $npv(\cdot)$  sämtliche direkte und indirekte Kosten beinhalten. Übersichtshalber können im Verfahren jedoch zusätzlich separate Gegenwartswerte für direkte und indirekte Kosten berechnet werden.

#### 4.2.2 Modellierungsansatz

Die Berechnung des Nutzens von Monitoring folgt der Logik des Value of Information Ansatzes (siehe Kapitel 3.2.7), jedoch mit einigen Vereinfachungen, insbesondere aus drei Gründen:

1. Das Konzept soll praxisnah und breit anwendbar sein. Das Know-how für komplexe probabilistische Modellierungen ist in der Praxis oft nicht vorhanden, weshalb es empfehlenswert ist, nur

jene Teilmodelle probabilistisch zu modellieren, für die es notwendig ist.

2. Das Konzept ist sehr umfassend und beinhaltet mehrere Teilmodelle: von der Schädigungsmodellierung, Zuverlässigkeit der Brücke, über das Verkehrssystem zu den Wirkungsspektren. Bei einigen Teilmodellen (insbesondere Wirkungsanalyse) ist eine probabilistische Modellierung aus rechnerischen Gründen nicht praktikabel. Zudem kann der Schädigungsmechanismus nicht immer in der Praxis modelliert werden.
3. Im Konzept geht es um eine Nutzenschätzung und nicht direkt um die Beurteilung der Sicherheit des Bauwerks. Für diese Zielsetzung ist es angebracht mit Vereinfachungen einen reduzierten Ressourceneinsatz bei der Modellierung zu ermöglichen, als dies bei Fragestellungen mit direkter Sicherheitsrelevanz notwendig wäre. Das hier entwickelte Konzept kann nicht zur Bestimmung der Sicherheit verwendet werden.

Das Konzept und – zum Vergleich – das typische Verfahren der Bayes'sche Entscheidungsfindung, ist in Bild 24 dargestellt.

Aus Bild 24 sind Vereinfachungen ersichtlich: erstens, wird die Unterhalts- und Instandsetzungsentcheidung nicht optimiert, sondern als direkte Funktion des Bauteilzustands  $Z$  zur Zeit der Entscheidung vorgeschrieben. Es wird angenommen, dass Experten bei gegebenem Bauteilzustand eine Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie empfehlen können, die den jederzeit sicheren Betrieb des Brückenbauwerks ermöglichen. Demgegenüber, wird in der Bayes'schen Entscheidungsfindung für einen gegebenen Bauteilzustand auch noch die zukünftige Zustandsentwicklung des Bauteils, sowie deren Konsequenzen, probabilistisch modelliert und die optimale Entscheidung davon abgeleitet. Die Vereinfachung ist aus den folgenden Gründen gerechtfertigt:

- Es wird im vorliegenden Konzept von einem Grenzwertmonitoring ausgegangen. Schwellwerte ergeben dann Sinn, wenn sie direkt mit Handlungen verknüpft sind: wird ein neuer Bauteilzustand erreicht, wird automatisch eine Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie ausgelöst.
- Das Vorgehen entspricht der heutigen Praxis, in dem Entscheidungen über Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie aufgrund vom beobach-

teten Zustand getroffen werden. Das vorhandene Expertenwissen kann so direkt übernommen und angewendet werden.

Für die Identifizierung einer optimalen Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie, die die Life-Cycle-Kosten minimiert ist die Fragestellung komplexer und es muss eine sehr große Anzahl von Entscheidungsalternativen formuliert und verglichen werden.

Die zweite in Bild 24 ersichtliche Vereinfachung ist, dass die Kosten deterministisch als Mittelwert bestimmt werden. Dies ist notwendig, weil umfassende Wirkungsanalyse allgemein zu komplex und rechenaufwendig ist, um probabilistisch berücksichtigt zu werden. Die Entscheidungen werden bezogen auf den Mittelwert der Kosten getroffen. Diese Annahme hat keinen Einfluss auf die Resultate, da die Kosten linear in das Modell eingehen. Es ist somit ausreichend mit dem Erwartungswert der Kosten zu rechnen – die Streuung der Kosten hat keinen Einfluss auf das Ergebnis und braucht deshalb nicht explizit berücksichtigt zu werden.

Eine dritte Vereinfachung ist in Bild 24 nicht ersichtlich und betrifft die Modellierung der Bauwerkszuverlässigkeit. In dem vorgeschlagenen Konzept wird davon ausgegangen, dass das überwachte Bauteil maßgebend für die Bauwerksicherheit und somit für die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie ist. Auf eine Modellierung des Brückenbauwerks kann trotzdem nicht verzichtet werden: die Zuverlässigkeit des Brückenwerks wird nur für den Fall modelliert, dass das überwachte Bauteil versagt. Dies impliziert, dass Versagen durch andere Bauteile vernachlässigbar ist und deshalb die getroffene Entscheidung nicht beeinflussen würde.

Durch diese Vereinfachungen reduziert sich die Komplexität und die Modellierung stark. Dies ermöglicht den direkten Einsatz in der Praxis. Die Vereinfachungen sind verhältnismäßig zur Fragenstellung.

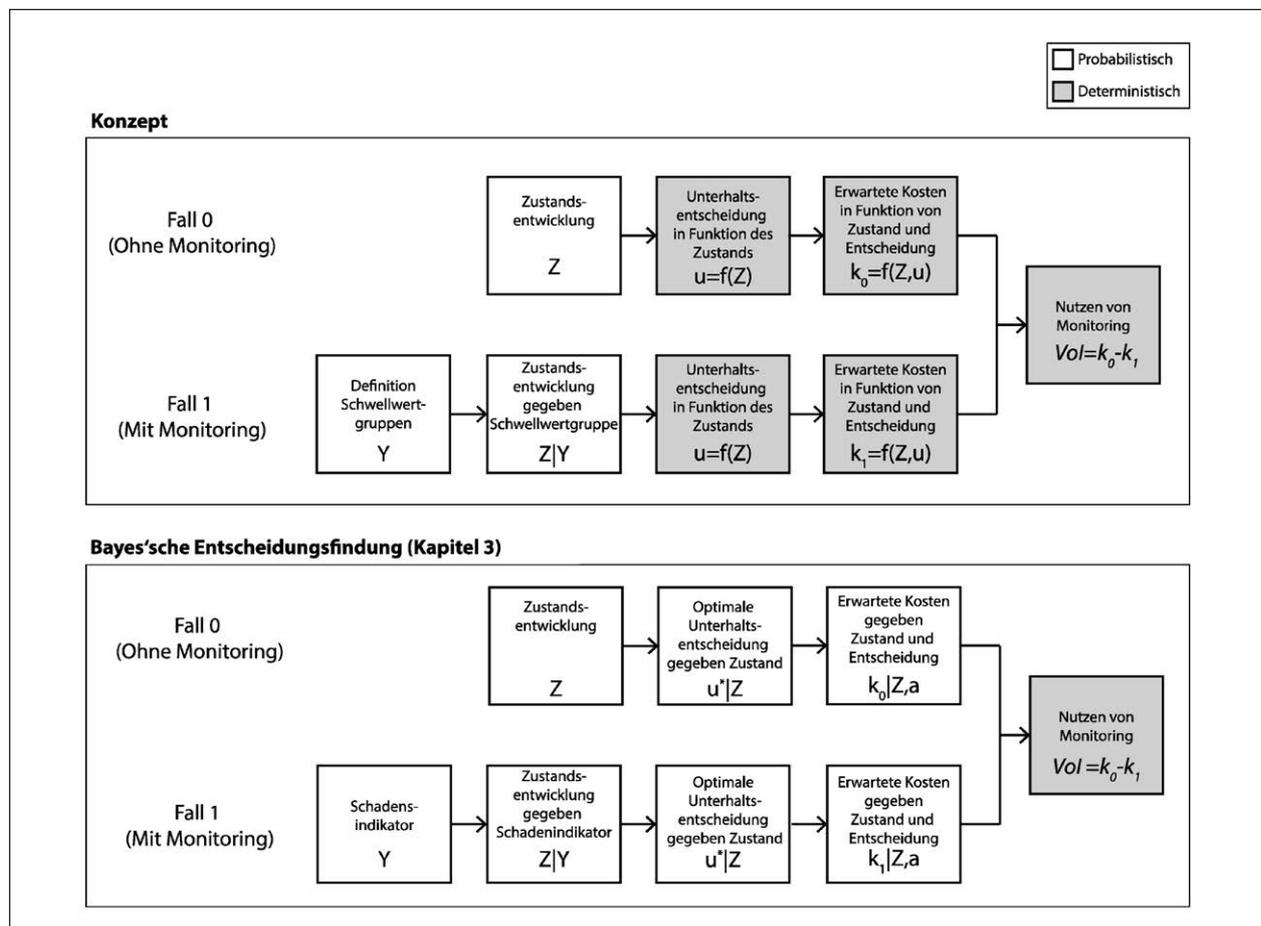


Bild 24: Vorgeschlagenes Konzept im Vergleich zu einer klassischen Bayes'schen Entscheidungsfindung wie sie in Kapitel 2.12 beschrieben ist [eigene Darstellung]

### 4.2.3 Systemebenen

Im Sinne der hierarchischen Modellbildung (siehe Kapitel 2.4), werden in diesem Konzept drei Systemebenen berücksichtigt, siehe Tabelle 7.

Teilmodelle werden jeweils auf einer einzelnen Ebene modelliert; es ist jedoch klar, dass Informationen zwischen den Systemebenen ausgetauscht werden müssen. Der Informationsaustausch zwischen den Systemebenen ist in Bild 25 dargestellt.

Es findet folgender Informationsaustausch zwischen den Ebenen statt:

- Auf der ersten Systemebene, dem Bauteil, wird das Monitoring und der Schadensprozess modelliert, um den Zustand  $Z$  des Bauteils, und dessen zukünftige Entwicklung, zu modellieren.
- Der Bauteilzustand  $Z$  wird auf der zweiten Systemebene, dem Brückenbauwerk, als Input be-

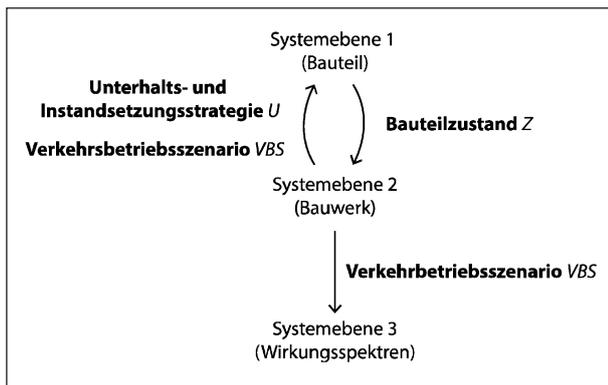


Bild 25: Der Bauteilzustand  $Z$  sowie das Verkehrsbetriebsszenario  $VBS$  stellen den Informationsaustausch zwischen Systemebenen sicher [eigene Darstellung]

rücksichtigt. Auf dieser Ebene wird die Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahme  $U$  definiert und das Verkehrsbetriebsszenario  $VBS$  festgelegt, die wiederum die Schadenentwicklung am Bauteil beeinflussen und deshalb zurück auf die erste Systemebene fließen.

- Auf der dritten Systemebene wird die Wirkungsanalyse aufgrund von Verkehrsbetriebsszenarien  $VBS$  durchgeführt.

### 4.2.4 Erwartete Kosten

Nachfolgend wird auf die Berechnung der erwarteten Kosten für die beiden Fälle mit und ohne Monitoring eingegangen. Die Kostenberechnungen sind in Bild 26 respektive Bild 27 schematisch dargestellt. Dabei wird folgende Notation verwendet: Variablen, die deterministisch berechnet werden sind mit Kleinbuchstaben bezeichnet, Variablen die probabilistisch berechnet werden sind mit Großbuchstaben bezeichnet.

#### Fall 0: Brückenbetrieb OHNE Monitoring

Die erwarteten Kosten für den Fall, dass kein Monitoring installiert ist, beinhalten Kosten  $k_u$  für Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen und die indirekten Kosten  $k_v$ , die über sämtliche Wirkungsspektren durch Verkehrsbehinderungen hervorgehen. Die Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen  $u$  werden aufgrund des aktuellen Bauteilzustands  $z_0$  (sowie unter Berücksichtigung des Bauwerkszustands) bestimmt: Gemäß heutiger Praxis werden nach der Brückenzustandserfassung, Un-

	Beschreibung	Modellierungen auf dieser Ebene
Systemebene 1: Beschädigte Bauteil/Bauteilgruppe	Das relevante Teilsystem ist das Bauteil/Bauteilgruppe welches beschädigt ist. Das Bauteil erfüllt innerhalb des Systems Brücke eine Funktion. Je nach Funktion wird das Bauteil/Bauteilgruppe als Hauptbauteil oder Nebenbauteil eingestuft. Das Versagen von Hauptbauteil/-gruppen kann zu einem Versagen der Brücke führen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoringsystem</li> <li>• Schadenindikator <math>Y</math></li> <li>• Schadenprozess/Schwellwertgruppe</li> <li>• Bauteilzustand <math>Z</math></li> </ul>
Systemebene 2: Brückenbauwerk	Das Hauptsystem, das hier betrachtet wird, ist eine Brücke im Deutschen Bundesstraßensystem. Die Funktionalität der Brücke ist durch den Verkehrsfluss definiert.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauwerkversagensereignis <math>F</math></li> <li>• Verkehrsbetriebsszenario <math>VBS</math></li> <li>• Unterhalts- und Instandsetzungsstrategien <math>U</math></li> </ul>
Systemebene 3: Verkehrssystem, Wirtschaft, Gesellschaft, Umwelt	Hier werden sämtliche Systeme berücksichtigt, die von dem einwandfreien Funktionieren der Brücke betroffen sind. Dazu gehören: das Verkehrssystem, die Wirtschaft, die Gesellschaft und die Umwelt.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wirkungen <math>K_v</math> über sämtliche Wirkungsspektren</li> </ul>

Tab. 7: Systemebenen die im Konzept berücksichtigt werden, deren Beschreibung und die Modelle die auf der jeweiligen Ebene modelliert werden [eigene Darstellung]

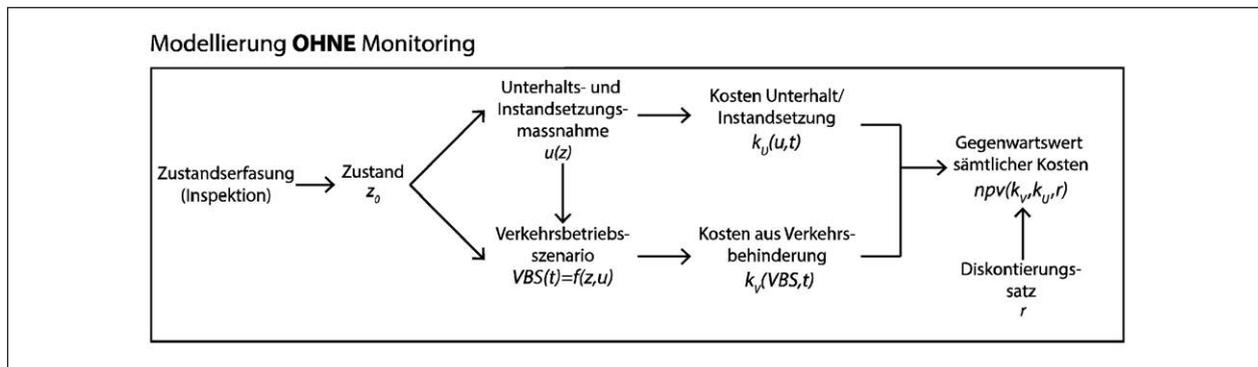


Bild 26: Schematische Modelldarstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten im Fall, dass kein Monitoringsystem installiert wird [eigene Darstellung]

terhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen empfohlen und davon eine Kostenschätzung abgeleitet (siehe z. B. [183], [202], [203]). Das Verkehrsbetriebsszenario  $VBS(t)$  wird unter Berücksichtigung des Bauteilzustands  $z_0$  und der Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahme  $u$  festgelegt. Die Kosten, welche durch ein Verkehrsbetriebsszenario für das Verkehrssystem, Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt entstehen, werden für sämtliche Wirkungsspektren pro Zeiteinheit mittels Wirkungsanalyse berechnet. Die Verkehrsbehinderungsszenarien  $vbs(t)$  und die Kosten  $k_u(t)$  und  $k_v(t)$  werden in Funktion der Zeit  $t$  modelliert, und dann mittels Diskontierung zu einem Gegenwartswert  $npv(a_0)$  summiert.

Der Gegenwartswert  $npv(a_0)$  der Erwartungswert aller Kosten ist:

$$npv(a_0) = \sum_{\tau=0}^T \left( (k_{u,\tau} + k_{v,\tau}) \cdot \frac{1}{(1+r)^\tau} \right) \quad \text{Gl. 51}$$

wobei  $r$  der Diskontierungssatz ist. In Bild 26 ist schematisch das zugrundeliegende Modell dargestellt.

Die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie ist hier deterministisch vorgegeben. Konsequenzen aus dem Versagen der Brücke können probabilistisch erfasst werden. Hierzu werden Unsicherheiten in der Zustandsentwicklung modelliert und im Modell propagiert. Im vorgeschlagenen Konzept ist es denkbar und vertretbar das Versagensrisiko im Fall ohne Monitoring nicht explizit zu berücksichtigen. Hierzu ist es allerdings unerlässlich, dass die gewählte Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie im Fall ohne Monitoring konservativ ausgelegt ist – um die Gefahr eines möglichen Versagens vor der Instandsetzung auch unter einer besonders ungünstigen Zustandsentwicklung weitestgehend auszuschließen. Hinter dem Verzicht steht die Annahme,

dass die Zustandsaufnahme gut ist und die empfohlene Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie konservativ ausgelegt ist und somit die Versagenswahrscheinlichkeit des Brückenbauwerks sehr klein ist.

### Erwartete Kosten für Fall 1: Brückenbetrieb MIT Monitoring

Die Berechnung der Kosten und Konsequenzen für den Fall, dass Monitoring installiert ist, folgt demselben Prinzip. Änderungen gegenüber der Betrachtung „ohne Monitoring“ sind:

- Die Kosten für Installation und Betrieb des Monitoringsystems und die Kosten für ein mögliches Versagen des Brückenbauwerks werden berücksichtigt.
- Die Unsicherheiten in der Zustandsentwicklung werden modelliert und im Modell propagiert.
- Darüber hinaus wird die zukünftige Zustandsentwicklung des Brückenbauwerks modelliert, und die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie dynamisch auf die Zustandsentwicklung abgestimmt.

Das Modell für die Zustandsentwicklung wird in der späteren Umsetzung Indikatormodell genannt (siehe Kapitel 6). Die generelle Modellierung ist in Bild 27 dargestellt.

Diese Zustandsentwicklung wird auch im Fall ohne Monitoring probabilistisch simuliert, um Versagen probabilistisch berechnen zu können. Die Unsicherheit in der Zustandsentwicklung wird probabilistisch durch das sogenannte Indikatormodell beschrieben. Das Indikatormodell deckt implizit auch die sich aus der Monitoringmessung ergebenden Unsicherheiten mit ab.

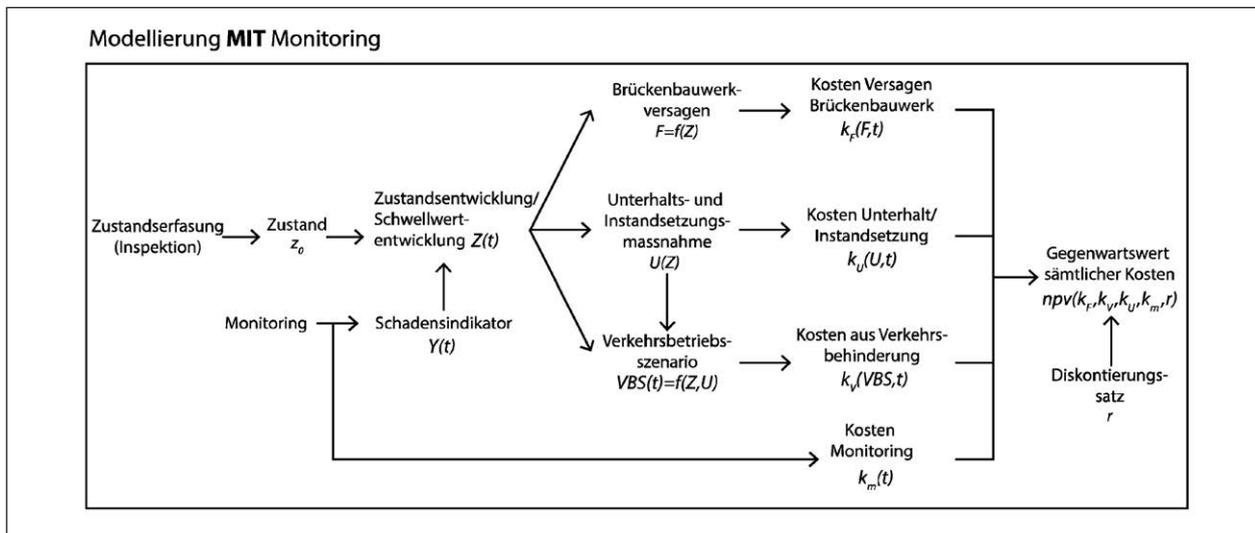


Bild 27: Schematische Modelldarstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten im Fall, dass ein Monitoringsystem installiert wird [eigene Darstellung]

Zusätzlich sind ein Zuverlässigkeitsmodell des Brückenbauwerks (sowohl mit als auch ohne Monitoring), und eine Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie, die dynamisch die Zustandsentwicklung berücksichtigen kann. Zudem müssen die einzelnen Modelle so formuliert werden, dass Unsicherheiten berücksichtigt und propagiert werden können.

Es wird eine physikalische Größe (Schadenindikator  $Y$ ) identifiziert, deren Überwachung Rückschlüsse über die Zustandsentwicklung  $Z(t)$  bzw. die Schwellwertgruppe des Bauteils zulässt. Der zukünftige Schädigungsprozess, und insbesondere die zeitliche Entwicklung des Schadenindikators, wird probabilistisch modelliert. Von dem Schadenindikator wird auf den Bauteilzustand  $Z(t)$  geschlossen: Die Zuordnung des Schadenindikators zu einem Bauteilzustand wird mittels Schwellenwert erreicht. Dabei werden Unsicherheiten in der Monitoringmessung und in der Aussagekraft des Schadenindikators zum Zustand berücksichtigt.

Im vorgeschlagenen Konzept wird der Bauteilzustand  $Z(t)$  durch diskrete Zustände klassifiziert. Das Monitoringresultat ist im Konzept entweder kritisch oder unkritisch. Die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie kann zeitlich flexibel an das Auftreten kritischer Monitoringergebnisse gekoppelt werden.

Die Modellierung des Zustands  $Z(t)$  hat eine zentrale Rolle im Modell:

- Die Wahl einer Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie  $U$  ist eine direkte Funktion des Bauteilzustands  $Z(t)$ .

- Die Verkehrsbetriebs-szenarios  $VBS(t)$  ergeben sich wiederum aus dem Zustand  $Z(t)$  und der gewählten Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie  $U$ .
- Die Wahrscheinlichkeit eines Brückenbauwerksversagens  $P[F|Z(t)]$  wird bedingt auf den Zustand  $Z(t)$  modelliert.

Da die Zustandsentwicklung probabilistisch berücksichtigt wird und die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie dynamisch darauf abgestimmt wird, ist auch der Verkehrsbetriebszustand probabilistisch berücksichtigt.

Sind  $U$ ,  $VBS(t)$  und  $P[F|Z(t)]$  bestimmt, können die jeweiligen Kosten berechnet werden. Die Kosten  $k_u(t)$  für Unterhalts und Instandsetzung, sowie die Kosten  $k_v(t)$  aus Verkehrsbehinderungen werden in der Logik so wie oben bereits beschrieben bestimmt. Die Kosten  $k_f(t)$  die durch ein Brückenversagen verursacht werden, berücksichtigen sowohl direkte Kosten für Aufräumarbeiten und Ersatzneubau sowie indirekte Kosten aus den Verkehrsbehinderungen die sich durch das Versagen ergeben. Die Kosten  $k_m(t)$  aus Monitoring werden deterministisch modelliert und beinhalten sowohl die Installationskosten wie auch die Betriebskosten.

Im letzten Schritt werden sämtliche Kosten summiert, und mittels Diskontierung auf einen Gegenwartswert  $npv(a_1)$  gebracht.

Der Gegenwartswert  $npv(a_1)$  der Erwartungswert aller Kosten ist:

$$\text{npv}(a_1) = \sum_{\tau=0}^T \left( (k_{\text{ut},\tau} + k_{\text{vt},\tau} + k_{\text{ut},\tau} + k_{\text{mt},\tau}) \cdot \frac{1}{(1+r)^\tau} \right) \quad \text{Gl. 52}$$

wobei  $r$  der Diskontierungssatz ist.

Der Zustand des Tragwerks ist hier im Konzept nicht direkt an die Zustandsnote gekoppelt. Diese Zustandsnote ist nicht für die Beschreibung der Schadensentwicklung geeignet und in der Praxis kann es vorkommen, dass die Zustandsnote des Bauteils nicht die tatsächliche Schädigung (wie beispielsweise Risse) berücksichtigt. Zudem sind die Schadensmodelle, die die Zustandsentwicklung gut repräsentieren in der Praxis nicht immer verfügbar und das Konzept lässt sich in diesen Fällen nicht anwenden.

Damit das Konzept angewendet werden kann, wird als Alternative zur Zustandsnote in diesem Projekt die Schwellwertgruppe eingeführt. Die Schwellwertgruppe hat keine direkte Verbindung zur Zustandsnote. Die Schwellwertgruppe ist eine ordinale nach oben offene Skala mit der der Zustand des Bauteils beschrieben werden kann. Das Konzept der Schwellwertgruppe wird in Kapitel 4.4 beschrieben.

#### 4.2.5 Abgrenzung

Die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen sind bereits thematisiert worden, sie werden hier der Übersicht halber noch einmal aufgenommen.

Die Zustandsentwicklung eines Brückenbauwerks und die Bedeutung des Brückenbauwerks für das Verkehrssystem und weitere übergeordnete System ist mit Unsicherheiten behaftet, die jedoch in den Berechnungen der erwarteten Kosten nicht berücksichtigt werden. In der Modellierung wird jedoch ausschließlich die Unsicherheiten in der Zustandsentwicklung der Brücke, in der Monitoringmessung, sowie im Zusammenhang zwischen Monitoringmessung und Brückenzustand berücksichtigt; alle anderen Unsicherheiten werden vernachlässigt.

Inspektionen und Monitoringmessungen können zur Optimierung von Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen, sowie zur Minimierung von Life Cycle-Kosten verwendet werden. Im entwickelten Konzept wird diese Möglichkeit nur begrenzt berücksichtigt. Es wird eine begrenzte Anzahl Unterhalts- und Instandsetzungsstrategien formuliert, deren Einsatz auf die Zustandsentwicklung abgestimmt wird, eine eigentliche Optimierung findet aber nicht statt.

Es wird davon ausgegangen, dass ohne außerordentliche Einwirkungen bei normalem Betrieb und Unterhalt die Versagenswahrscheinlichkeit der Brücke sehr klein ist. Die Zuverlässigkeit des Brückenbauwerks wird deshalb nur für den Fall modelliert, dass das überwachte Bauteil versagt.

Die Möglichkeit, mehrere Bauteile an einer Brücke zu überwachen ist im Konzept nicht vorgesehen. Die Interaktion zwischen Bauteil und Bauwerk wird nicht detailliert modelliert, außer, für den Fall, dass das Bauteil versagt. Das Konzept kann in Zukunft auf das Monitoring mehrerer Bauteile erweitert werden.

### 4.3 Zustandserfassung

Wie bereits im Kapitel 4.1 erläutert, wird in diesem Konzept davon ausgegangen, dass der Zustand des Brückenbauwerks vor der Entscheidungsfindung erfasst wurde und, dass diese Zustandserfassung die Grundlage für die Berechnung des Nutzens von Monitoring ist. Grundlage für die Zustandserfassung von Ingenieurbauwerke ist in [2] beschrieben. Das Verfahren ist in einigen BAST-Dokumenten [202], [203] und [204] ebenfalls beschrieben.

Sämtliche Bauteile und Schäden werden durch einen Experten aufgenommen und in den Kategorien Standsicherheit  $S$ , Verkehrssicherheit  $V$  und Dauerhaftigkeit  $D$  bewertet. Die Bewertung in den drei Kategorien wird gemäß Vorgaben mit einer Note von 0 (unbeschädigt) bis 4 (kritischen Schaden) beurteilt. Die Bedeutungen der Noten sind in [187] erklärt. Aus den Bauteilbewertungen  $S$ ,  $D$  und  $V$  wird gemäß dem Bewertungsschlüssel aus [202] eine Basiszustandszahl  $Z$  für das Bauteil ermittelt: Eine Zahl die den Zustand des Bauteils beschreibt. Zusätzlich zu den Basiszustandszahlen, die  $i$  [202] gegeben sind, wird eine fünfte definiert, um das komplette Versagen des Bauteils zu bewerten. Die Erfassung des Zustands ist notwendig, um die für die Entscheidung relevanten Informationen zu haben und die Unterhalts- und Monitoringstrategie festzulegen.

#### Identifizierung der relevanten Bauteile und Schädigungsprozesse

Bauteile haben unterschiedliche Rollen im Brückenbauwerk und folglich unterschiedliche Relevanz für die Sicherheit des Bauwerks. Nachdem der Zu-

stand sämtlicher Bauteile erfasst ist, werden mittels Experten-Triage die relevanten Bauteile und Schädigungsprozesses identifiziert, die für ein Monitoring infrage kommen. Dabei können folgende Punkte untersucht werden:

- Bauteilrolle: Ist das Bauteil ein Hauptbauteil (Bauteilgruppen Überbau, Unterbau, Spannglieder, Seile, Anker und Gründung) oder nicht (Bauteilgruppen Belag, Kappe, Lager, Fahrbahnübergang und Brückenausstattung, wie Geländer und Leitungen)?
- Konsequenzen bei  $Z = i$ : Was bedeutet es fürs Brückenbauwerk, wenn sich der Zustand des Bauteils zu  $Z = i$  verschlechtert? Ist die Standsicherheit gefährdet, falls  $Z = i$  eintritt?
- Einfluss auf Maßnahmenempfehlung: In einem späteren Schritt wird eine Unterhalt- und Instandsetzungsstrategie empfohlen. Es kann aber bereits jetzt die Frage gestellt werden, ob ein Bauteil und sein Schädigungsprozess maßgebend für die Formulierung der Maßnahmenempfehlung sein wird? Oder umgekehrt: werden Maßnahmen ganz unabhängig von der Schädigung dieses Bauteils notwendig werden?

Bauteile, bei denen bei allen drei Punkten die Fragen mit einem „JA“ beantwortet werden, sind relevante Bauteile und kommen für ein Monitoring infrage.

Das entwickelte Konzept zur Nutzenbestimmung von Monitoringsystemen geht jeweils von einem einzigen relevanten Bauteil und der sich ergebenden Schädigung pro Bauwerk aus. Werden an einem Brückenbauwerk mehrere relevante Bauteile und Schädigungen identifiziert, können der Nutzen des Monitorings für jedes relevante Bauteil unabhängig voneinander beurteilt werden, ohne jedoch den potenziellen zusätzlichen Nutzen der durch das gleichzeitige Überwachen von mehreren Schädigungen hervorgeht zu berücksichtigen.

Ist ein relevantes Bauteil und Schädigung identifiziert, muss ein Schadensindikator definiert werden, der Aufschluss über die Zustandsentwicklung geben kann.

#### 4.4 Zustandsentwicklung und Schwellwertmodellierung

Um den Nutzen des Monitorings zu bestimmen, ist es notwendig die Zustandsentwicklung probabilistisch zu modellieren, denn zum Zeitpunkt der Modellierung ist die zukünftige Zustandsentwicklung naturgemäß nicht bekannt und somit mit Unsicherheiten behaftet. In Bild 28 ist beispielhaft eine Zustandsentwicklung dargestellt.

Die Zustandsentwicklung des relevanten Bauteils zum Zeitpunkt  $t$  ist durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_z(z;\theta)$  beschrieben, wobei  $\theta$  der Parametervektor des Schadensmodells ist. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_{z_t}(z_t;\theta)$  des Zustands zum Zeitpunkt  $t$  ist eine Marginalisierung von  $f_z(z;\theta)$ . In der Bayes'schen Betrachtung handelt es sich hiermit um die a-priori Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zustandsentwicklung.

Es fragt sich nun wie  $f_z(z;\theta)$  modelliert werden kann. Dabei können zwei Ansätze unterschieden werden: Sind Daten zur Zustandsentwicklung vorhanden, zum Beispiel von anderen vergleichbaren Bauwerken, können diese als Grundlage für die probabilistische Modellierung der Zustandsentwicklung verwendet werden. Daten sind jedoch nur in Ausnahmefällen vorhanden, womit mehrheitlich der zweite Ansatz eingesetzt werden muss: die Modellierung der physikalischen Schadenprozesse. Für einige gängige Schadensprozesse sind Schadensmodelle in der Literatur vorhanden, z. B. für Korrosion [39] und für Risswachstum in Stahlstrukturen [39]. Die Modellierung ist jedoch oft komplex; z. B. ist es bei Risschädigungen in Stahltragwerken oft unumgänglich Ansätze aus der Bruchmechanik zu berücksichtigen. Die Komplexität ist zusätzlich erhöht, weil Unsicherheiten modelliert werden müssen. Ist in der Literatur kein angemessenes Modell

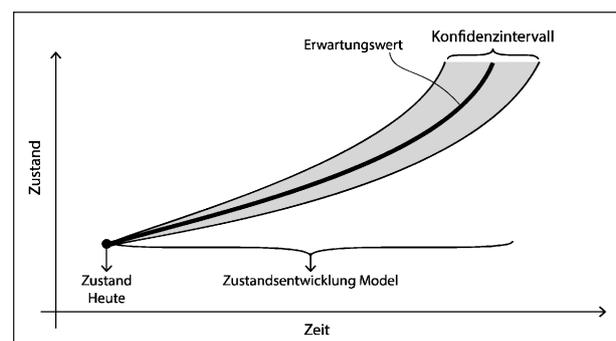


Bild 28: Schematische Darstellung einer Zustandsentwicklung [eigene Darstellung]

vorhanden, muss basierend auf Expertenwissen eines erstellt werden.

Eine Möglichkeit die Zustandsentwicklung zu modellieren ist das Markov-Kettensmodell in Kapitel 2.9.4. Um die Modellierung zu unterstützen, können während der Zustandserfassung bereits kurze Messreihen zum Brückenverhalten aufgenommen werden, die Auskunft über Tragwerksverhalten und Einwirkung geben.

Die Modellerstellung eines Schadensmodells ist in vielen Fällen in der Praxis für die vorliegende Fragestellung zu aufwändig. Daher wird hier das Konzept der Schwellwertgruppen eingeführt.

Die Schwellwertgruppen sind gekoppelt an das Schwellwertmonitoring. Wird ein Schwellwert im Monitoring überschritten, so wird die Strategie angepasst und Maßnahmen ausgelöst. Dies bedeutet, dass sich beim Erreichen des Schwellwerts des Monitorings der Zustand verschlechtert hat. Diese Schwellwertbetrachtung ist in Bild 29 dargestellt.

Der tatsächliche Zustand ist unbekannt. Das Monitoring überwacht den tatsächlichen Zustand und bei einer Überschreitung eines definierten Schwellwertes kann davon ausgegangen werden, dass sich der Zustand verschlechtert hat bzw. der tatsächliche Zustand bereits kritischer ist als angenommen. Der Zustand (bzw. das Wissen über den Zustand) des Bauteils ist von einer Schwellwertgruppe in die nächste übergegangen (siehe Bild 29).

Es besteht ein ordinaler Zusammenhang zwischen dem Zustand des Bauteils und der Schwellwert-

gruppe. Damit können alle möglichen Zustände des Bauteils in Schwellwertgruppen eingeordnet werden. Die Anzahl der Schwellwertgruppen ist dabei nicht beschränkt. Ein unbeschädigtes, neues Bauteil kann beispielsweise in eine Schwellwertgruppe 1 eingeordnet werden. Liegt eine Schädigung vor, die überwacht wird, so kann dieses in Schwellwertgruppe 2 eingeordnet werden. Für den Fall, dass das Bauteil überwacht wird und das Monitoringergebnis kritisch ist, so geht das Bauteil über in Schwellwertgruppe 3, ansonsten verbleibt es in Schwellwertgruppe 2. Die Schwellwertgruppen können den verschiedenen möglichen Ereignissen zugeordnet werden und so die Kritikalität des Zustands ordinal bewertet werden. Wird ein Bauteil verstärkt oder erneuert, so wird es in eine niedrige Schwellwertgruppe gesetzt. Je nach Problemstellung und möglichen Zuständen ist eine unterschiedliche Anzahl von Schwellwertgruppen zu definieren. Die Anzahl der Schwellwertgruppen ist dabei nicht beschränkt. Zur Festlegung der Schwellwertgruppen und zur Definition des Entscheidungsproblems ist eine Was-Wäre-Wenn-Analyse von hypothetischen Bauteilzuständen zu entwickeln und so die Schwellwertgruppen zuzuweisen.

Aus Bild 29 wird deutlich, dass das kontinuierliche Problem durch die Schwellwertbetrachtung in ein binäres Problem überführt werden kann. Die Betrachtung eines binären Problems vereinfacht auch die Bestimmung und Modellierung der Wahrscheinlichkeit des Übergangs von unkritisch zu kritisch. Dies wird in Kapitel 4.4.2 erläutert und später in den Beispielen in Kapitel 7 und 8 angewendet.

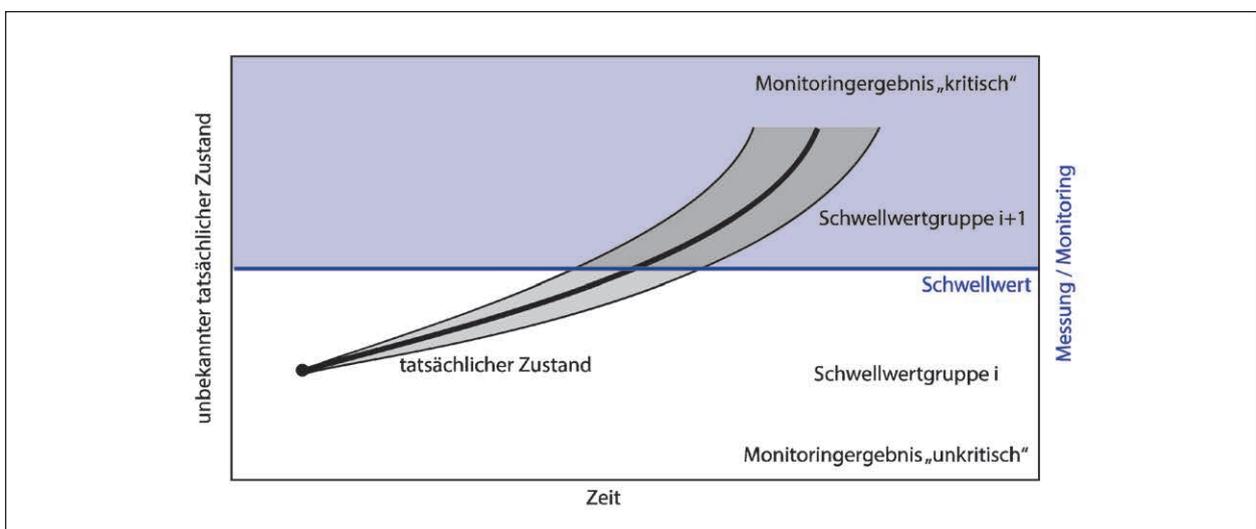


Bild 29: Schematische Darstellung des Schwellwertmonitorings und der Schwellwertgruppen [eigene Darstellung]

Die Übergangswahrscheinlichkeit wird in jedem Zeitschritt konstant angenommen und entspricht damit der mittleren Wahrscheinlichkeit über die Zeit. Dies kann es je nach tatsächlichem Zustand und Zustandsentwicklung dazu führen, dass die Übergangswahrscheinlichkeit zu Beginn der Betrachtung überschätzt wird und am Ende der Betrachtungsdauer unterschätzt wird.

**4.4.1 Schadenindikator**

Ist der Zustand erfasst, muss festgelegt, wie die Zustandsentwicklung mit Monitoringmaßnahmen in der Praxis am besten überwacht werden kann. Allgemein kann der Zustand nicht direkt beobachtet werden. Aus diesem Grund wird ein Schadenindikator  $Y$  gewählt, eine physikalische Eigenschaft die überwacht werden kann, welche möglichst gute Rückschlüsse zum Zustand und der Schadenentwicklung erlaubt. Beispiele von Schadenindikatoren sind:

- Bei einer Risschädigung kann die Risslänge oder Rissbreite als Indikator dienen.
- Bei Bewehrungskorrosion kann die Chloridkonzentration auf Höhe der Bewehrung oder die Eindringtiefe des Chlorids als Indikator dienen.

Wird von einer Grenzwertüberwachung ausgegangen, wird das Messergebnis direkt auf einen diskreten Schadenindikator  $Y = 0,1,2,3...$  abgebildet der angibt ob das Messergebnis unter oder über dem Grenzwert liegt (bei mehreren Grenzwerten, zeigt der Schadenindikator an, zwischen welchen Grenzwerten sich das Messergebnis befindet). Dazu müssen Grenzwerte definiert werden. Je nach Bauteil und Schädigungsmechanismus können Grenzwerte auch vom Hersteller des Monitoringsystems bereits definiert sein, bzw. der Ingenieur, der mit dem Monitoring beauftragt wird, legt die Grenzwerte fest.

**4.4.2 Likelihood Funktion**

Bei einer Grenzwertüberwachung, kann vereinfacht davon ausgegangen werden, dass sich ein neuer Zustand einstellt, wenn ein Grenzwert überschritten wird. Jedoch ist der Zusammenhang zwischen Zustand und Schadenindikator keinesfalls deterministisch, sondern meist mit großen Unsicherheiten behaftet: einerseits gibt der Schadenindikator immer nur ein Teilbild der Schadenentwicklung und des Zustands wieder, andererseits ist ein Monitoringsystem jeweils mit Messungenauigkeiten behaftet, die zur Unsicherheit beiträgt. Die Unsicherheiten können wie folgt mit bedingten Wahrscheinlichkeiten beschrieben werden:

- Die Messfehler können mit  $P[Y^*|Y]$  beschrieben werden, wobei  $Y$  der wirkliche Schadenindikator ist und  $Y^*$  der mittels Monitorings beobachteten Schadenindikator.  $P[Y^*|Y]$  ist von der gewählten Monitoringmaßnahme abhängig.
- Der Zusammenhang zwischen Schadenindikator und Zustand kann mit  $P[Y|Z]$  beschrieben werden.

Die Kettenregel kann die bedingte Wahrscheinlichkeit des beobachteten Schadenindikators  $Y^*$  und dem Zustand  $Z$  bestimmt werden:  $P[Y^*|Z] = P[Y^*|Y] \cdot P[Y|Z]$ , womit die Likelihood-Funktion definiert ist.

Im hier relevanten Fall des Grenzwertmonitorings kann die Likelihood Funktion mit der Konfusionsmatrix in Tabelle 8 modelliert werden.

Im Wahrscheinlichkeitsterm  $P[Y|Z]$  muss die Wahrscheinlichkeit berücksichtigt werden, dass das Monitoringsystem ausgefallen ist, ohne dass der Infrastrukturbetreiber es bemerkt.

In Spezialfällen kann auf die Modellierung der Unsicherheit im Zusammenhang Zustand-Schadenindikator verzichtet werden. Dadurch vereinfacht sich die Nutzenbestimmung stark: einem Monitoringergebnis keine eindeutige Basiszustandszahl zuge-

		Zustand Z			
		Z = 1	Z = 2	Z = 3	...
Schadenindikator Y	$Y^* = 1$	$P(Y^* = 1   Z = 1)$	$P(Y^* = 1   Z = 2)$	$P(Y^* = 1   Z = 3)$	...
	$Y^* = 2$	$P(Y^* = 2   Z = 1)$	$P(Y^* = 2   Z = 2)$	$P(Y^* = 2   Z = 3)$	...
	$Y^* = 3$	$P(Y^* = 3   Z = 1)$	$P(Y^* = 3   Z = 2)$	$P(Y^* = 3   Z = 3)$	...
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$

Tab. 8: Allgemeine Konfusionsmatrix [eigene Darstellung]

ordnet werden (siehe die schematische Darstellung in Bild 30) und es kann auf die Aktualisierung der Wahrscheinlichkeiten verzichtet werden<sup>14</sup>.

Die Konfusions-Matrix kann auf eine Identitäts-Matrix reduziert werden (siehe Tabelle 9).

Durch diese Vereinfachung kann es sein, dass in einzelnen Fällen die Value of Information Vol von einer Monitoringmaßnahme negativ ausfällt, die bei Berücksichtigung der Unsicherheit positiv ausgefallen wäre. In der Regel kann man jedoch davon ausgehen, dass  $Vol \gg 0$  oder  $Vol \ll 0$  bei denen die vorgeschlagene Vereinfachung keinen maßgebenden Einfluss auf die Entscheidung hat, ob ein Monitoring installiert wird. Zudem muss festgehalten werden, dass ein positiven Vol vor allem bei Monitoringmaßnahmen zu erwarten ist, die viel Information

über den Zustand des Bauteils vermitteln, somit kleine Unsicherheiten in der Likelihood-Funktion beinhalten und eine probabilistische Modellierung automatisch weniger relevant wird. Es ist hier wichtig festzuhalten, dass die Sicherheit auch gewährleistet ist, wenn durch die Vereinfachung eine suboptimale Monitoringentscheidung getroffen wird, jedoch wird dann nicht wirtschaftlich optimal gehandelt.

Das a-prior Wahrscheinlichkeitsmodell der Zustandsentwicklung ist  $f_z(z; \theta)$ . Das Ziel von Monitoring ist es, Informationen zu gewinnen, welche die Unsicherheit über den Zustand des Bauwerkes reduzieren. Diese Information ist durch die Likelihood Funktion  $L(Z) = P[Y^*|Z]$  definiert und in der Konfusions-Matrix in Tabelle 8 angegeben.

Die a-posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zustandsentwicklung wird dann mittels einer Bayes'schen Analyse quantifiziert [176], [179]:

$$f_{z|y^*}(z|y^*) \propto L(Z) \cdot f_z(z) = P[Y^*|Z] \cdot f_z(z) \quad \text{Gl. 53}$$

Die Aktualisierung wird in jedem Zeitschritt mit neu gemessenen Monitoringergebnissen durchgeführt, um so zu jeder Zeit eine bestmögliche Charakterisierung der Zustandsentwicklung zu erreichen.

Das zuvor dargestellte Verfahren ist theoretisch korrekt, in der Praxis ist die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Zustandsentwicklung eine Herausforderung. Der Likelihood (und die Konfusionsmatrix) ist häufig nicht bekannt und kann auch von den Herstellern nicht immer angegeben werden kann.

Für ein praxistaugliches Verfahren in Verbindung mit der binären Betrachtung des Monitoringergebnisses (Monitoring ist kritisch, bzw. unkritisch) muss diese Wahrscheinlichkeit jedoch bekannt sein.

Eine Möglichkeit ist es, diese Wahrscheinlichkeit als unbekanntem Parameter zu definieren. Dieser unbe-

<sup>14</sup> Es ist wichtig festzuhalten, dass dies nicht eine Abkehr von der Bayes'sche Vorgehen in Kapitel 3 ist, jedoch nimmt die deterministische Betrachtung eine sehr starke Likelihood-Funktion im Sinne von Bild 17. Die Likelihood-Funktion ist so stark, dass bei gegebenem Monitoringereignis nur ein Zustand möglich ist.

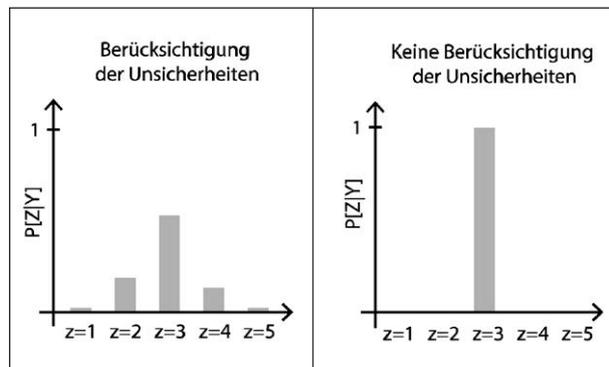


Bild 30: Ist ein Monitoringergebnis  $Y^*$  gegeben kann davon die Basiszustandszahl  $Z$  bzw. die Schwellwertgruppe abgeleitet werden: links bei Berücksichtigung der Unsicherheiten, rechts ohne deren Berücksichtigung [eigene Darstellung]

		Zustand Z			
		Z = 1	Z = 2	Z = 3	...
Schadenindikator Y	$Y^* = 1$	$P(Y^* = 1   Z = 1) = 1$	0	0	0
	$Y^* = 2$	0	$P(Y^* = 2   Z = 2) = 1$	0	0
	$Y^* = 3$	0	0	$P(Y^* = 3   Z = 3) = 1$	0
	$\vdots$	0	0	0	$\ddots$

Tab. 9: Konfusionsmatrix [eigene Darstellung]

kannte Parameter kann als Grenzwahrscheinlichkeit bestimmt werden. Die Grenzwahrscheinlichkeit entspricht der Wahrscheinlichkeit ein kritisches Monitoringergebnis zu erhalten, bei der das Monitoring gerade noch wirtschaftlich wäre. Es entspricht nicht der Wahrscheinlichkeit eines kritischen Monitoringergebnisses. Diese Wahrscheinlichkeit ist unbekannt.

Der Entscheidungsträger kann auf der anderen Seite abschätzen, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Monitoring ein kritisches Ergebnis liefert wird. Diese Abschätzung ist eine subjektive Abschätzung der Wahrscheinlichkeit und entspricht einem Integral über alle vorhandenen Informationen und Unsicherheiten.

Ist sich der Entscheidungsträger unsicher, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Monitoring pro Zeitschritt (in der Regel pro Monat) ein kritisches Ergebnis liefert, so sollte er eine konservative Schätzung vornehmen; d. h. er sollte die Wahrscheinlichkeit vergleichsweise groß wählen. Zum Beispiel sollte es in den meisten Fällen möglich sein die Frage „Wird die Wahrscheinlichkeit ein kritisches Monitoringresultats pro Zeitschritt zu erhalten kleiner als  $p = 90\%$  sein?“ mit „ja“ zu beantworten – andernfalls würde man vermutlich nicht über die Sinnhaftigkeit von Monitoring nachdenken. Durch schrittweise Reduktion von  $p$  (z. B.  $90\%$ ,  $80\%$ ,  $70\%$ , ...) lässt sich der Wert von  $p$  finden, für den der Experte die obenstehende Frage nicht mehr sicher mit „ja“ beantworten kann. Dieser Wert ist als konservativer Schätzwert zu wählen.

Alternativ kann die Grenzwahrscheinlichkeit auch zuerst bestimmt werden und dann abgeschätzt werden, ob die Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoring einen kritischen Schwellwert anzeigt kleiner oder grösser ist als die Grenzwahrscheinlichkeit. Ist die Grenzwahrscheinlichkeit nahe bei null oder eins lässt sich leicht abschätzen, ob das Monitoring wirtschaftlich ist oder nicht. Bei diesem Vorgehen kann jedoch nicht der monetäre Vorteil des Monitorings bestimmt werden. Es kann nur abgeschätzt werden, ob das Monitoring wirtschaftlich ist oder nicht.

Die Messunsicherheiten im Monitoring werden im Konzept nicht vernachlässigt, sondern sind implizit im Indikatormodell berücksichtigt. Folgendes exemplarische Beispiel verdeutlicht, wie die unterschiedlichen Unsicherheiten aus Zustandsentwicklung und Monitoringmessung ins Indikatormodell eingehen: Die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Zustand eines betrachteten Bauteils innerhalb eines Zeitschritts von unkritisch zu kritisch verändert (Übergangswahrscheinlichkeit), sei  $3\%$ .

- Fall a) perfektes Monitoring – d. h., der Zustand kann durch Monitoring direkt gemessen werden: Die Übergangswahrscheinlichkeit von unkritisch zu kritisch im Indikatormodell ist hier  $3\%$ .
- Fall b) geringe Fehler in Monitoringmessung – geringe Unsicherheit zwischen Monitoringmessung und tatsächlichem Zustand: Die Übergangswahrscheinlichkeit von unkritisch zu kritisch im Indikatormodell ist geringfügig erhöht im Vergleich zum vorherigen Fall. Beispielsweise ist diese nun  $4\%$ .
- Fall c) große Fehler in Monitoringmessung – große Unsicherheit zwischen Monitoringmessung und tatsächlichem Zustand: Die Übergangswahrscheinlichkeit von unkritisch zu kritisch im Indikatormodell ist deutlich erhöht im Vergleich zum Fall a. Beispielsweise liegt diese nun bei  $6\%$ .

Da Informationen über die Qualität der Messgenauigkeit nicht immer vorliegen, kann je nach System so eine Abschätzung notwendig sein. Kann der Hersteller hierzu genauere Angaben machen, sollten diese verwendet werden und in der Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden.

### 4.5 Monitoringmaßnahmen

Die Wahl einer Monitoringmaßnahme muss auf den gewählten Schadensindikator abgestimmt sein. Es ist vorteilhaft, wenn der Schadensindikator mit einer möglichst hohen Detektions-Wahrscheinlichkeit und einem kleinen Messfehler bestimmt werden können.

Ist eine Monitoringmaßnahme identifiziert, müssen dessen praktischen, wirtschaftlichen und technischen Aspekten definiert und parametrisiert werden, damit sie im Model berücksichtigt werden können. Insbesondere sind die Parameter in Tabelle 10 zu definieren.

	Beschreibung
$k_{M,i}$	Investitionskosten (Einmalkosten) für die Monitoringmaßnahme
$k_{M,b}$	Betriebskosten für die Monitoringmaßnahme (pro Zeitschritt)

Tab. 10: Parameter zur Beschreibung einer Monitoringmaßnahme [eigene Darstellung]

#### 4.6 Versagenswahrscheinlichkeit des Brückenbauwerks

Weltweit sind in den letzten Jahrzehnten nur wenige Fälle von Brückenversagen ohne außerordentliche Einwirkungen bekannt. Die meisten dieser Fälle sind auf mangelnden Unterhalt oder Fehler im Entwurf (systematische Fehler) zurückzuführen. Das Versagen von Brückenbauwerken infolge einer bestehenden und bekannten Schädigung ist ein außerordentlich seltenes Ereignis. In der Regel kann ein Versagen ohne außerordentliche Einwirkung durch einen angemessenen Betrieb und Unterhaltstrategie des Brückenbetreibers vermieden werden, dennoch nie ganz ausgeschlossen werden. Die regelmäßige Zustandserfassung ist eine Maßnahme, die die Versagenswahrscheinlichkeit reduziert, da Schäden frühzeitig erkannt und gemanagt werden.

Das Versagensereignis des Brückenbauwerks wird mit  $F$  bezeichnet, dessen bedingte Wahrscheinlichkeit, gegeben dass das überwachte Bauteil versagt wird mit  $P_f$  bezeichnet.  $P_f$  kann nach den Grundsätzen der Zuverlässigkeitstheorie ermittelt werden, siehe Kapitel 2.9.1. Dabei werden relevante Grenzzustandsfunktionen  $g(x)$  für das Brückenbauwerk bzw. das Bauteil formuliert und ein probabilistisches Modell für den Brückenwiderstand und die Einwirkung erstellt. Bei der Modellierung der Einwirkung müssen eventuelle Verkehrseinschränkungen im Brückenbetrieb berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.8); die Einwirkung in Berücksichtigung von eventuellen Verkehrseinschränkungen wird als  $S'$  bezeichnet. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird wie folgt bestimmt:

$$P_f = P[g(r' - s' < 0)] \quad \text{Gl. 54}$$

Zur Berechnung von  $P_f$  kann eine Monte-Carlo-Simulation [7] oder eine FORM-Analyse [31] eingesetzt werden.

In der Praxis ist es nicht immer verhältnismäßig und möglich eine Zuverlässigkeitsanalyse an dem vorgeschädigten Bauwerk durchzuführen. Insbesondere, da die Schädigungsprozesse zum Entscheidungszeitpunkt nicht explizit bekannt sind.

Da es in diesem Projekt um die Abschätzung der Kostenfolgen nach einem Versagen geht, ist es möglich, die Größenordnung der Versagenswahrscheinlichkeit abzuschätzen.

Als Ankerpunkt kann die Zielversagenswahrscheinlichkeit eines Bauteils, welches nach den heutigen

Normen bemessen ist verwendet werden (siehe Tabelle 11).

Bei Brückenbauwerken ist mit großen Konsequenzen zu rechnen, da es zum einen zu Todesfällen kommen kann und zum anderen die indirekten Konsequenzen (ökonomisch, gesellschaftlich und der Umwelt) sehr groß sind (siehe [181]). Damit kann angenommen werden, dass die jährliche Zielzuverlässigkeit für ein neues bzw. nicht-geschädigtes Bauteil bei etwa  $1.0E-7$  pro Jahr liegt.

Es kann angenommen werden, dass wenn eine signifikante Schädigung vorliegt, die Brücke sicher sofort gesperrt werden würde, bzw. Kompensationsmaßnahmen eingeleitet werden. Es kann damit angenommen werden, dass die Versagenswahrscheinlichkeit in diesem Fall für geschädigte Bauteile nicht grösser ist als  $1.0E-3$  pro Jahr.

Die Versagenswahrscheinlichkeit für ein geschädigtes Bauteil liegt damit zwischen  $1.0E-7$  und  $1.0E-3$  pro Jahr. Zwischen diesen beiden Werten kann eine Abschätzung für die geschädigten Bauteile gemacht werden. Diese Abschätzung kann als Approximation für die Versagenswahrscheinlichkeit der Brücke verwendet werden. Die Approximation ist in Bild 31 dargestellt.

Konsequenzen	Zuverlässigkeitsindex	Jährliche Zielversagenswahrscheinlichkeit
Große Konsequenzen	5.2	$1.0E-07$
Mittlere Konsequenzen	4.7	$1.30E-06$
Kleine Konsequenzen	4.2	$1.33E-05$

Tab. 11: Zielzuverlässigkeiten in Abhängigkeit der zu erwartenden Konsequenzen für Bauteile [181]

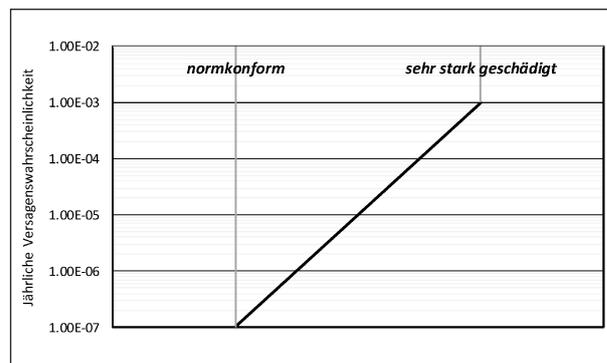


Bild 31: Bild zur Abschätzung der jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Schädigung eines Bauteils [eigene Darstellung]

Die Abschätzung der Größenordnung der Versagenswahrscheinlichkeit ist für die vorliegende Fragestellung ausreichend. Die Versagenskosten sind objektspezifisch, sie liegen aber in der Größenordnung von 200 – 500 Mio. €. Bei 500 Mio. € und einer Normkonformen Bemessung liegen die erwarteten Versagenskosten bei 50 € pro Jahr. Ist die Versagenswahrscheinlichkeit 2 Größenordnungen größer und liegt bei  $10E-5$  pro Jahr, so sind jährliche Versagenskosten von 5.000 € zu erwarten. Diese Werte werden zur Entscheidungsfindung keinen großen Beitrag leisten. Bei Versagenswahrscheinlichkeiten von  $10E-4$  sind 50.000 € jährlich zu erwarten. Bei starken Schädigungen kann die Entscheidung beeinflusst werden, die Abschätzungen auf diesem Niveau sind jedoch ausreichend und eine detaillierte und explizite Modellierung der Versagenswahrscheinlichkeit nur in Spezialfällen sinnvoll.

#### 4.7 Unterhalts- und Instandsetzungsstrategien

Eine Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie setzt sich aus einer oder mehrerer Maßnahmen zusammen, wobei jede Maßnahme in die folgenden Maßnahmenkategorien gemäß [203] fallen kann:

- **Neubau**

Als Neubau bezeichnet man die Errichtung eines Teilbauwerkes in bestehenden oder neuen Straßen, ohne dass ein Vorläuferbauwerk existiert. Der Ersatzneubau (Bauwerkserneuerung), der zur Verbesserung der Trassierung der Strecke nicht unmittelbar am gleichen Standort erfolgt, ist, obwohl kein Vorläuferbauwerk an exakt dieser Stelle stand, kein Neubau, sondern ein Ersatzneubau (Bauwerkserneuerung) und damit eine Erhaltungsmaßnahme.

- **Erhaltung**

Die Bauwerkserhaltung beinhaltet Maßnahmen zur Wiederherstellung bzw. Sicherstellung der Standsicherheit, Verkehrssicherheit bzw. der Dauerhaftigkeit eines Teilbauwerks bzw. einzelner Bauwerksteile. Sie umfasst alle Maßnahmen der Erneuerung, Instandsetzung und Unterhaltung eines Ingenieurbauwerks:

- **Bauwerkserneuerung/Ersatzneubau (ohne kapazitive Erweiterung)**  
Ist die Errichtung eines Bauwerkes in bestehenden Straßen zum Ersatz eines Vorläufer-

bauwerkes ohne Wiederverwendung von Bauteilen des Vorläuferbauwerkes.

- **Verbreiterung (ohne kapazitive Erweiterung)**  
Beinhaltet alle baulichen Maßnahmen zur geringfügigen Bauwerksverbreiterung aus Gründen der Anpassung des Bauwerks an geänderte Standards z. B. auch Kappenverbreiterung.
- **Überbauerneuerung (ohne kapazitive Erweiterung)**  
Abbruch und Erneuerung des gesamten Überbaus.
- **Verstärkung (ohne kapazitive Erweiterung)**  
Beinhaltet bauliche Maßnahmen zur Wiederherstellung der Standsicherheit.
- **Instandsetzung**  
Beinhaltet bauliche Maßnahmen größeren Umfangs, die der Wiederherstellung des planmäßigen Zustandes eines Bauwerks oder seiner Bauteile dienen.
- **Bauwerksunterhaltung**  
Beinhaltet bauliche und betriebliche Maßnahmen zur Sicherung der Substanz, Funktion und Verkehrssicherheit ohne nennenswerte Wiederanhebung des Gebrauchswerts.
- **Betriebliche Unterhaltung**  
Die betriebliche Unterhaltung beinhaltet kleinere Maßnahmen, die zur Sicherung der Substanz, Funktion und Verkehrssicherheit erforderlich sind und vorwiegend in Eigenregie der Straßenbauverwaltung ausgeführt werden.
- **Bauliche Unterhaltung**  
Die bauliche Unterhaltung umfasst bauliche Maßnahmen kleineren Umfangs ohne nennenswerte Anhebung des Gebrauchswertes.

Im entwickelten Konzept wird für jeden Zustand eine Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie formuliert. Beim Erreichen eines bestimmten Zustands (d. h. Schwellwert), der dank Monitoringüberwachung jeweils bekannt ist, wird die entsprechende Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie ausgelöst, siehe Tabelle 12.

Die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategien werden analog zur heutigen Praxis bestimmt: Nach der Zustandsbewertung des Brückenbauwerks, werden

Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen identifiziert um eine angemessene Sicherheit des Brückenbauwerks gewährleisten zu können. In der Formulierung der Strategie können sämtliche oben erwähnte Maßnahmenkategorien kombiniert werden, sowie der Ausführungszeitpunkte der Maßnahmen festgelegt werden.

Die genaue Auslegung der Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie kann für die Fälle mit Monitoring respektive ohne Monitoring unterschiedlich ausfallen:

- Die Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen für den Fall, dass kein Monitoring installiert ist, müssen konservativ ausgelegt werden, denn sie müssen die Sicherheit auch dann gewährleisten, wenn der Worst-Case-Szenario der Zustandsentwicklung eintritt. Die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie für den Fall, dass kein Monitoringsystem installiert ist wird als  $u_0$  bezeichnet.
- Wird ein Monitoringsystem installiert können unterschiedliche Unterhalts- und Instandsetzungs-

Bezeichnung	Beschreibung
$u_0$	Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie OHNE Monitoring
$u_i$	Unterhalts- und Instandsetzungsstrategien MIT Monitoring

Tab. 12: Bezeichnung der Unterhalts- und Instandsetzungsmaßstrategie [eigene Darstellung]

strategien berücksichtigt werden, die sich in zwei Aspekten von  $u_0$  unterscheiden:

- Das Monitoring erlaubt es, dynamisch auf die Zustandsentwicklung zu reagieren. Die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie müssen somit nicht immer die Worst-Case-Zustandsentwicklung berücksichtigen.
- Weil die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie dynamisch auf die Zustandsentwicklung angepasst werden kann, werden mehrere Unterhalts- und Instandsetzungsstrategien formuliert und zwar jeweils in Funktion der Basiszustandszahl des Bauteils, siehe Tabelle 12.

Sind die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategien definiert, müssen deren praktische, wirtschaftliche und technische Aspekte parametrisiert werden, damit sie in der Modellierung berücksichtigt werden können. Dabei werden drei unterschiedlichen Maßnahmentypen unterschieden:

- Verkehrseinschränkung  
Darin ist keine Baumaßnahme enthalten, sondern nur eine der Verkehrsregelung und somit der Einwirkung auf das Brückenbauwerk.
- Unterhaltsmaßnahme  
Dabei handelt es sich um eine bauliche Maßnahme, die die Schadenentwicklung verlangsamt, den Schaden jedoch nicht komplett aufhebt.

	Beschreibung	Verkehrseinschränkung	Unterhaltsmaßnahme	Instandsetzungsmaßnahme	Kommentar, Referenz
$k_u$	Direkte Kosten der Maßnahme	Nein	Ja	Ja	
$t_u$	Zeit zwischen Entscheidung zur Ausführung und Beginn der Umsetzung	Ja	Ja	Ja	
$\Delta t_u$	Dauer der Maßnahmenumsetzung (in Tage)	Ja	Ja	Ja	
$VBS_u$	Verkehrsbetrieb während der Maßnahmenumsetzung	Ja	Ja	Ja	Gemäß den Definitionen der Verkehrsbetriebs-szenarien in Kapitel 4.8.
$z_u$	Basiszustandszahl des Bauteils nach der Maßnahmenumsetzung	Nein	Nein	Ja	
$\theta_{u1}$	Parameter des Schadenmodells während der Umsetzung der Maßnahme	Ja	Nein	Nein	
$\theta_{u2}$	Parameter des Schadenmodells nach Umsetzung der Maßnahme	Nein	Ja	Ja	

Tab. 13: Definition der Parameter zur Beschreibung einer Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahme [eigene Darstellung]

- Instandsetzungsmaßnahme  
Dabei handelt es sich um eine bauliche Maßnahme die Schädigung des Bauwerks ganz aufhebt.

Für jede Maßnahme, die Teil einer Strategie ist, müssen die Parameter in Tabelle 13 bestimmt werden. Je nach Maßnahmentyp werden unterschiedliche Parameter benötigt.

## 4.8 Verkehrsbetriebsszenarien

Bei beschädigtem Brückenbauwerk kann es zu Verkehrsbehinderungen kommen, aufgrund der Schädigung selbst oder bei der Ausführung von Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen. Es werden sich gegenseitig ausschließend Verkehrsbetriebsszenarien VBS definiert, z. B. wie folgt:

- VBS<sub>0</sub>: Keine Beeinträchtigung,
- VBS<sub>0</sub>: Teilschließung (Spurenweise Schließung),
- VBS<sub>0</sub>: Tempobegrenzung,
- VBS<sub>0</sub>: Schließung für Lkw,
- VBS<sub>0</sub>: Tempobegrenzung und Schließung für Lkw,
- VBS<sub>0</sub>: Tempobegrenzung, Schließung für Lkw und Spurenschließung,
- VBS<sub>0</sub>: Schließung.

In der Modellierung werden die Verkehrsbetriebsszenario des Brückenbauwerks zeitabhängig in Funktion des Bauteilzustands und von eventuellen Maßnahmen, die zu einem Zeitpunkt durchgeführt werden, festgelegt. Dies ist nachfolgend an einem fiktiven Beispiel dargestellt.

### 4.8.1 Verknüpfung Verkehrsbetriebsszenario mit Bauteilzustand und Maßnahmen

Nachfolgend wird in Bild 32 beispielhaft dargestellt, wie das Verkehrsbetriebsszenario zeitabhängig in Funktion der Zustandsentwicklung und der Maßnahmenausführung angepasst werden kann. Es wird von einem fiktiven Bauteil in einer Schwellwertgruppe 2 ausgegangen, was eine Tempobegrenzung mit sich bringt (VBS<sub>2</sub>) und die Installation eines Monitoringsystems veranlasst. Verschlechtert sich der Zustand zur Schwellwertgruppe 3 muss sofort zusätzlich zur Temporeduktion eine Schließung der Brücke für Lkw veranlasst werden (VBS<sub>4</sub>) und eine Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahme ausgelöst werden. Während der Maßnahmenumsetzung kommt es zusätzlich zur Temporeduktion und Schließung für Lkw zu einer Spurenschließung (VBS<sub>5</sub>).

Es ist wichtig festzuhalten, dass zum Zeitpunkt der Berechnung des Nutzens von Monitoring, die zukünftige Zustandsentwicklung nicht bekannt ist, und probabilistisch bestimmt wird. Da das Verkehrsbetriebsszenario eine Funktion des Zustands ist, werden die zukünftigen Verkehrsbetriebszustände auch probabilistisch erfasst.

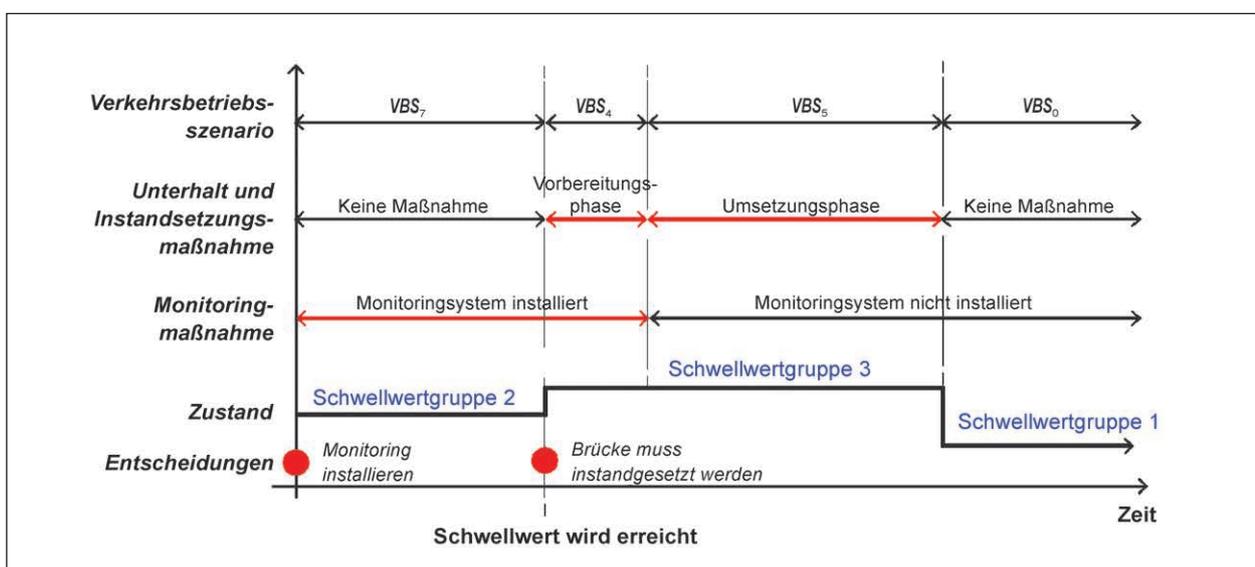


Bild 32: Beispielhafte Verknüpfung zwischen Verkehrsbetriebsszenario und Bauteilzustand [eigene Darstellung]

Die Festlegung der Verkehrsbetriebsszenarien ist eine wichtige Voraussetzung, um die Wirkungen und somit die Kosten einer jeder Entscheidung im Brückenmanagement zu berechnen.

#### **4.9 Konsequenzen für sämtliche Wirkungsspektren/sozio-ökonomische Wirkungen zur Messung gesamtwirtschaftlicher Kosten**

Ist bekannt welche Verkehrsbetriebsszenarien eintreten, müssen deren Auswirkungen auf die übergeordnete Systemebenen bestimmt werden: namentliche die verursachten Kosten über sämtliche Wirkungsspektren.

Nach eingehender Literaturrecherche und -analyse hinsichtlich nationaler und internationaler Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei Verkehrsprojekten sowie der Berücksichtigung sozio-ökonomischer Wirkungen, werden die gesamtwirtschaftlichen Kosten bzw. Nutzen über folgende sieben Kategorien ermittelt:

1. Betriebskosten (Kapitel 4.9.1)
2. Reisezeiten (Kapitel 4.9.2)
3. Verkehrssicherheit (Kapitel 4.9.3)
4. Lärm (Kapitel 4.9.4)
5. Luftverschmutzung (Kapitel 4.9.5)
6. Klimaschutz (Kapitel 4.9.5)
7. Erreichbarkeit (Kapitel 4.9.6)

Die ersten sechs Messgrößen bzw. Indikatoren können monetarisiert werden und somit einer Nutzen-Kosten-Analyse zugeführt werden. Die Erreichbarkeit illustriert ergänzend, aber unmittelbar die Effekte reduzierter Infrastrukturkapazitäten. Sie wird dem Nutzen-Kosten-Verhältnis als Potenzialgröße zur Seite gestellt.

Zur Ermittlung der Indikatoren wird die Methodik des BVWP-Verfahrens [126] gewählt, da es das in Deutschland gängige Verfahren zur Bewertung von Verkehrsprojekten und -maßnahmen darstellt und eine Reihe von Bewertungsansätzen zur Verfügung stellt (siehe Anhang 1 und 2).

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung können die Bewertungsrechnungen nur exemplarisch durchgeführt werden. D. h. beispielsweise, dass die

Reisezeiten mit mittleren Geschwindigkeiten und nicht über Ganglinienauflösungen der DTV berechnet werden und die Betriebskosten fahrleistungsgerichtet über verschiedene Kfz-Typen.

Die Bestimmung der erwarteten Kosten für ein gegebenes Verkehrsbetriebsszenario wird in Kapitel 4.9.7 beschrieben.

##### **4.9.1 Betriebskosten**

Die mit den Verkehrsprojekten verbundenen Fahrzeitänderungen und Änderungen der Fahr- bzw. Transportleistung führen zu Änderungen bei den fahrzeugbezogenen Betriebskosten und können somit zusätzliche Aufwendungen der Reisenden oder Frachtführenden bei der Nutzung von Alternativrouten im Zuge von Baustellen darstellen. Die Betriebskosten setzen sich aus den folgenden Veränderungen der Nutzen zusammen:

- Vorhaltungskosten
  - basierend auf den Fahrleistungen je Antriebsart für die unterschiedlichen Fahrzeuggruppen,
  - im Pkw-Verkehr nur für geschäftliche Zwecke,
  - Veränderung der Vorhaltungskosten wird durch Multiplikation der Fahrleistungsdifferenz und Fahrzeitdifferenzen zwischen Bezugs- und Planfall mit den entsprechenden Wertansätzen ermittelt.
- Personalkosten
  - Personalkosten für die Fahrer im Lkw-Verkehr,
  - Fahrzeiten des geschäftlichen Pkw-Verkehrs und damit auch die Personalkosten werden mit dem Indikator zur Reisezeit berücksichtigt.
- Betriebsgrundkosten
 

Differenzen der Fahrleistung je Fahrzeuggruppe in Bezugs- und Planfall werden mit den spezifischen Betriebskostengrundwerten multipliziert.
- Energie- und Kraftstoffkosten
 

Multiplikation der Fahrleistungsdifferenzen zwischen Bezugs- und Planfall mit den spezifischen Energie- bzw. Kraftstoffverbrauchsfaktoren in den verschiedenen Verkehrssituationen und den korrespondierenden Energie- und Kraftstoffpreisen.

Für die Berechnungen sind folgende Werte pro Strecke und Stunde bzw. Stundengruppe für den Bezugs- und Planfall aus dem verwendeten Verkehrsmodell zu ziehen: Fahrleistungen je Fahrzeuggruppe, Verkehrszustand, zulässige Höchstgeschwindigkeit, BVWP- bzw. HBEFA-Streckentyp, Fahrzeiten je Fahrzeuggruppe insgesamt.

### Monetarisierung

Betriebsgrundkostenwerte und Vorhaltungskosten<sup>15</sup>

- Pkw mit Ottomotor (PO): 14,65 €/100 Fz-km und 0,71 €/Fz-Std Vorhaltungskosten.
- Pkw mit Dieselmotor (PD): 14,60 €/100 Fz-km und 0,99 €/Fz-Std Vorhaltungskosten.
- Pkw mit sonstigen Motoren (PE und PG): 15,11 €/100 Fz-km und 0,89 €/Fz-Std Vorhaltungskosten.
- Leichte Nutzfahrzeuge (LN): 12,21 €/100 Fz-km und 3,50 €/Fz-Std Vorhaltungskosten.
- Lastkraftwagen ohne Anhänger (LS): 24,37 €/100 Fz-km und 5,46 €/Fz-Std Vorhaltungskosten.
- Lastkraftwagen mit Anhänger (ZL): 23,06 €/100 Fz-km und 7,94 €/Fz-Std Vorhaltungskosten.
- Sattelzug mit Auflieger (ZS): 25,61 €/100 Fz-km und 9,38 €/Fz-Std Vorhaltungskosten.

Personalkosten Lkw-Fahrer

- Lkw bis 3,5 t zGG (LN) und Lkw mit mehr als 3,5 t zGG ohne Anhänger (LS): 17,64 €/Einsatzstunde.
- Lkw über 3,5 t zGG mit Anhänger (ZL) und Sattelkraftfahrzeugen mit Anhängern (ZS): 20,14 €/Einsatzstunde.
- Die Veränderung der Personalkosten wird durch Multiplikation der Differenz der einzelnen Fahrzeiten in Bezugs- und Planfall mit den genannten mittleren zeitbezogenen Personalkosten ermittelt.

Energiekosten<sup>16</sup>

- Ottokraftstoff: 0,76 €/l.
- Dieselmotorkraftstoff: 0,76 €/l.

- Gas: 0,61 €/l.
- Elektrischer Strom 0,19 €/l.

### 4.9.2 Reisezeit

Die Reisezeiten im Personenverkehr können von den Reisenden nicht oder nur teilweise für andere, ggf. produktive Zwecke genutzt werden. Sie sind daher aus gesamtwirtschaftlicher Sicht mit Kosten verbunden. Verkehrsprojekte und Erhaltungsmaßnahmen können auf unterschiedliche Art und Weise zur Veränderung der Reisezeiten und damit einhergehenden Nutzen im Verkehrsnetz beitragen. Zusätzlich kann festgestellt werden, dass bei Erhöhung der Reisezeit die Lebensqualität der Reisenden beeinträchtigt wird, wofür jedoch keine messbaren Teilindikatoren vorliegen.

Für die Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr gilt, dass Güter gebundenes Kapital darstellen, welches, solange der Transport währt, nicht der Produktion nachgelagerter Güter zugeführt werden kann. Die Transportzeiten sind daher ebenfalls mit Kosten verbunden.

Bewertungsfaktoren sind die distanzabhängigen Zeitwerte differenziert nach geschäftlichen und nicht geschäftlichen Fahrtzwecken.

In die Berechnung gehen sämtliche Strecken mit Belastungsänderungen zwischen Bezugs- und Planfall ein. Je Strecke müssen für den geschäftlichen und nicht geschäftlichen Anteil der Pkw-Fahrten die Fahrzeitunterschiede, Besetzungsgrade und die Anteile an den Distanzklassen aufgrund der distanzabhängigen Reisezeitkosten (s. u.) vorliegen.

Zur Ermittlung der Mehrreisezeit wird die Summe der Pkw (gewerblich/nicht gewerblich) – und Lkw-Fahrzeugstunden über alle Strecken im Netz ermittelt. Die bezugs- und planfallspezifische Verkehrsbeteiligungsdauer ergibt sich aus der Division der Fahrleistung mit der streckenbezogenen aktuellen oder mittleren Geschwindigkeit. Die Mehr-/Minderreisezeit lässt sich durch die absolute Veränderung der Reisezeiten zwischen den Netzzuständen des Bezugsfalls und der Planfälle ermitteln. Um die

<sup>15</sup> Siehe auch Tabellen im Anhang 2.

<sup>16</sup> Siehe auch Tabellen im Anhang 2.

von der Sperrung indirekt betroffenen Verkehrsteilnehmer auch betrachten zu können und somit eine vollständige Reisezeitberechnung zu gewährleisten, wird auch die erhöhte Reisezeit auf den Ausweichrouten erfasst.

### Monetarisierung

Für die Berechnung der Veränderung der Reisezeit muss differenziert werden zwischen dem Pkw- und dem Lkw-Verkehr. Beim Pkw-Verkehr wird darüber hinaus unterschieden zwischen gewerblichem und nicht-gewerblichem Verkehr.

Für den nicht-gewerblichen Pkw-Verkehr werden Werte verwendet, die in der aktuellen Bundesverkehrswegeplanung (2030) angegeben sind. Pro betrachtetes Bauwerk bzw. dessen Sperrung und den dazugehörigen Strecken wird ein fahrleistungs- und entfernungsabhängiger, aggregierter Wert ermittelt. Die distanzabhängigen Zeitwerte ausgedrückt in €/Personen-Std (€/P-Std) sind in Tabelle 14 dargestellt.

So wie im BVWP 2030 vorgegeben, wird mangels detaillierter empirischer Grundlagen für Distanzklassen oberhalb von 500 km auf den Zeitwert der Verkehrsprognose 2030 [128] im Fahrtzweck Geschäft in Höhe von 75 €/P-Std zurückgegriffen. Im Distanzbereich bis 50 km wird von dem für den Personenwirtschaftsverkehr maßgebenden Zeitwert in Höhe von 24,21 €/P-Std ausgegangen. Für den Distanzbereich zwischen 50 km und 500 km erfolgt eine lineare Interpolation.

Beim Güterverkehr wird je Strecke für die Lkw-Fahrten  $\geq 12$  t zGG von einem mittleren Zeitwert der Ladung von 6,88 €/Fz-Std ausgegangen. Für Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht  $< 12$  Tonnen werden keine Zeitwerte der Ladung berücksichtigt.

### 4.9.3 Verkehrssicherheit

Unfälle haben besonderen Einfluss auf das Leben des Menschen und auf ihr Verkehrsverhalten. Unfälle verursachen erhebliches persönliches Leid, ökonomischen Schaden und Kosten für die Gemeinschaft bspw. im Gesundheitssystem oder im Zusammenhang mit der Reparatur der Fahrzeuge. Obgleich die Unfallzahlen auf Deutschlands Verkehrswegen in den vergangenen Jahrzehnten in der Regel sanken, ereignen sich weiterhin Unfälle. Im Jahr 2017 starben in Deutschland mehr als 3.000 Personen und es gab rund 388.000 Verletzte bei etwa 2,6 Millionen registrierten Unfällen [127]. Verkehrsprojekte und Sperrungen von Bauwerken können Routenverlagerungen bedingen, die zu kürzeren oder längeren Fahrten auf unfallrisikoreicheren oder -ärmeren Streckentypen führen und somit das Unfallgeschehen beeinflussen. Ausgangsgröße für die Berechnungen zum Unfallgeschehen sind deswegen die Fahrleistungen auf unterschiedlichen Streckentypen.

Das Unfallgeschehen lässt sich nach Unfällen mit Personenschäden und Sachschäden unterteilen. Hierfür werden fahrleistungsbezogene Unfallkostenraten benötigt, die unter Berücksichtigung des Streckentyps (planfrei, plangleich oder Tunnelstrecke mit/ohne Fahrtrichtungstrennung; Kennziffer 1), der räumlichen Lage der Strecke (innerhalb von bebauten Gebieten oder außerhalb; Kfz-Straße) und dem Vorhandensein eines Seitenstreifens (Kennziffer 2), der Anzahl der Fahrspuren je Richtung (Kennziffer 3) und der Streckenqualität (Kennziffer 4 – siehe Bild 34) ermittelt werden. Die fahrleistungsbezogenen Unfallkostenraten werden für Personen- und Sachschäden unterschieden. Die Unfallkosten werden im BVWP 2030 [126] durch Multiplikation dieser Unfallkostenraten mit den Fahrleistungen je Streckenabschnitt ermittelt.

Entfernung [km]	Zeitwert [€/P-Std]						
5	4,27	65	9,18	162,5	11,82	425	14,07
15	4,81	75	9,56	187,5	12,24	475	14,42
25	6,41	85	9,94	212,5	12,53	600	14,77
35	7,35	95	10,20	275	12,79	> 600	15,54
45	8,17	112,5	10,66	325	13,17		
55	8,70	137,5	11,18	375	13,71		

Tab. 14: Distanzabhängige Zeitwerte für die nicht geschäftlichen Fahrtzwecke nach Entfernungsstufen [126]

### Monetarisierung

Die Wertansätze für unfallbedingte Personenschäden umfassen

1. den Ressourcenverzehr, die Kosten für die Bewältigung der Unfallfolgen und den Produktionsausfall der geschädigten Personen und
2. die Risk-Value-Komponente zur Erfassung des menschlichen Leids, die durchschnittliche Zahlungsbereitschaft der Bevölkerung für die Senkung des Risikos, selbst bei einem Unfall zu sterben oder verletzt zu werden oder dass dies Freunden und Verwandten geschieht.

Die Wertansätze für Sachschäden umfassen die entsprechenden Schadenskosten.

Die BVWP-Streckentypen und die jeweiligen Unfallkostenraten sind in Bild 33 und Bild 34 dargestellt.

Streckentyp	1. Ziffer	2. Ziffer	3. Ziffer	4. Ziffer	5. Ziffer
1	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
2	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
3	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
4	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5

Bild 34: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values differenziert nach der vierten Kennziffer (Qualität) [€/Tsd. Fz-km] [126]

Streckentyp	1. Ziffer	2. Ziffer	3. Ziffer	4. Ziffer	5. Ziffer
1	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
2	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
3	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
4	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
5	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
6	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5

Bild 33: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values in €/Tsd. Fz-km [126]

#### 4.9.4 Lärm

In vielen europäischen Städten trat in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts eine erhöhte Sensibilisierung der Öffentlichkeit gegenüber Lärm auf, die zu einem großen Teil von den erheblichen Verkehrszunahmen im Zusammenhang mit der Industrialisierung der Städte herrührte. Die Nebeneffekte des städtischen Lärms wurden von den medizinischen Abteilungen behandelt und stellten ein wichtiges gesundheitliches Problem bereits in den 1880er Jahren dar. Ohne Zweifel wurde dem Lärm aus physiologischen Gründen eine besondere Stellung unter städtischen Belastungen eingeräumt. Viele argumentierten, dass die Ohren im Gegensatz zu anderen Sinnesorganen nicht versiegelt werden könnten und daher gegen alle möglichen Durchdringungsgeräusche ungeschützt seien.

Lärm wird zwar oft als ein Ärgernis angesehen, das mit dem heutigen Leben in der Stadt verbunden ist, aber das Problem wird auch allgemein als eine erhebliche Belastung für die öffentliche Gesundheit angesehen, insbesondere in Zusammenhang mit Schlafentzug, kognitiven Beeinträchtigungen (bei Kindern), Bluthochdruck, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Herzinfarkten. Die verkehrsbedingte Lärmbelastung korreliert auch mit einer geringeren gesundheitsbezogenen Lebensqualität [140].

Aus diesen Gründen sollen auch die Lärmwirkungen in diesem Projekt analysiert werden, auch wenn zu zeigen ist, wo und in welchem Umfang (Teil-) Sperrungen von Bauwerken im Zuge von Bundesautobahnen Veränderungen der Lärmsituation von betroffenen Anwohnern herbeiführen können. Hierfür sollen Berechnungsterme aus der EU-Umgebungsrichtlinie und der 16. BImSchV Anwendung finden, die jedoch entsprechende Datenanforderungen mit sich bringen (s. u.).

Das Ziel der EU-Umgebungslärmrichtlinie ist der Lärmschutz, der durch die Verhinderung, Vorbeugung oder Minderung schädlicher Auswirkungen, einschließlich Belästigung durch Umgebungslärm erreicht werden soll. Laut der Richtlinie hat die Kommission im „Grünbuch über die künftige Lärmschutzpolitik (...) den Umgebungslärm als eines der größten Umweltprobleme in Europa bezeichnet“ [132].

Es wird ein Mittelungspegel ( $L_{DEN}$ ) aus den Lärmemissionen für die Tages-, Abend- und Nachtstunden abgeleitet. Die Lärmemissionen sind abhängig von dem durchschnittlichen täglichen Verkehr werk-

tags in Fzg/24Std sowie von dem Lkw-Anteil der betrachteten Strecke in der jeweiligen Stundengruppe, wobei  $L_{Day}$  12 Stunden beginnend um 6.00 Uhr,  $L_{Evening}$  4 Stunden beginnend um 18.00 Uhr und  $L_{Night}$  8 Stunden beginnend um 22.00 Uhr, umfasst.

Um den Abstand zur Straße zu berücksichtigen, wird ergänzend ein Faktor zur Messung der Pegeländerung durch unterschiedliche Abstände aus der 16. Verordnung des Bundes-Immissionsschutzgesetz BImSchG herangezogen [123].

Der Faktor  $DS_{\perp}$  dient der Korrektur der Pegeländerung durch unterschiedliche Abstände  $S_{\perp}$  zwischen dem Emissionsort (0,5 m über der Mitte des betrachteten Fahrstreifens) und dem maßgebenden Immissionsort ohne Boden- und Meteorologiedämpfung und muss dem Mittelungspegel  $L_{DEN}$  zuzaddiert werden.

Im BVWP 2030 [126] wird die Veränderung der Lärmbelastung in innerorts und außerorts unterschieden und differenziert bewertet. Für die Bewertung innerorts werden Wirkungen nur dann berücksichtigt, wenn im Planfall der Lärmindex  $L_{DEN}$  den Wert von 45 dB(A) überschreitet und zudem die Differenz der Lärmbelastung zwischen Bezugsfall und Planfall 2 dB(A) größer ist. Letztere beschreibt die Wahrnehmungsschwelle des menschlichen Gehörs, ist also physiologisch begründet.

#### Monetarisierung

Die Anzahl der dem jeweils ermittelten Lärmpegel innerorts ausgesetzten Personen wird mithilfe der Stadtmodellbausteininformation „Anwohner je 100 m Streckenlänge“ für jede Straßenseite ermittelt. Die Monetarisierung erfolgt über lärmexpositionsabhängige Wertansätze aus dem BVWP 2030. Je höher die Lärmbelastung ist, desto höher sind die anzusetzenden Kosten je exponierte Person. Eine Aufstellung der Wertansätze ist in Tabelle 15 dargestellt.

Bei der Lärmbelastung außerorts wird die Veränderung der Geräuschbelastung tagsüber in 100 m Entfernung vom Trassenrand errechnet und die Monetarisierung erfolgt unter Ansatz der spezifischen Vermeidungskosten in Form von Baukosten für Lärmschutzwände, die zur Einhaltung eines Zielpegels von 55 dB(A) in 100 m Abstand von dem betreffenden Verkehrsweg erforderlich wären. Sie sind in Tabelle 16 beschrieben. Außerorts soll insbesondere die Störung von Aufenthalts- und Erholungsräumen in der Natur bewertet werden.

Lärmexposition [dB(A)]	Wertansatz [€/exponierter Person und Jahr]	Lärmexposition [dB(A)]	Wertansatz [€/exponierter Person und Jahr]	Lärmexposition [dB(A)]	Wertansatz [€/exponierter Person und Jahr]
45	0	57	74	69	202
46	2	58	85	70	213
47	4	59	95	71	241
48	6	60	106	72	269
49	8	61	117	73	297
50	10	62	127	74	325
51	19	63	138	75	353
52	27	64	148	76	371
53	36	65	159	77	389
54	44	66	170	78	406
55	53	67	181	79	424
56	64	68	191	80	442

Tab. 15: Wertansätze je exponierter Person in Abhängigkeit von der Lärmexposition [126]

Pegeldifferenz [dB(A)]	Höhe der Lärmschutzwände [m]	Spezifische Investitionskosten [€/m]		Spezifischer Kapitaldienst [T€/km und Jahr]	
		Straße	Schiene	Straße	Schiene
2,0	1,5	595	1.259	17,8	62,2
2,7	2,0	790	1.350	23,6	66,7
6,9	3,0	1.190	1.650	35,5	81,6
8,8	4,0	1.590	1.975	47,5	97,6
10,7	5,0	1.980	2.600	59,1	128,5
12,2	6,0	2.370	2.900	70,7	143,3
13,3	7,0	2.780	3.447	83,0	170,4
14,1	8,0	3.160	4.140	94,3	204,6
14,7	9,0	3.570	4.972	106,6	245,8
15,2	10,0	3.970	5.971	118,5	295,1
15,6	11,0	4.350	7.171	129,8	354,5
15,9	12,0	4.750	8.612	141,8	425,7

Tab. 16: Wertansätze für spezifische Vermeidungskosten bei Einsatz von Lärmschutzwänden in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz [126]

#### 4.9.5 Luftverschmutzung und Klimaschutz

Verkehrsbedingte Luftverschmutzung ist eine weitere zentrale sozio-ökonomische Auswirkung von Verkehr mit häufig schwerwiegenden negativen Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung wie Asthma, Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen bis hin zu einer verkürzten Lebenserwartung. Neben den allgemein anerkannten gesundheitlichen Auswirkungen kann die verkehrsbedingte Luftverschmutzung auch die Lebensqualität in städtischen Gebieten beeinträchtigen und das Image,

den Ruf und die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit negativ beeinflussen [140].

Bei der Verbrennung von Kraftstoffen werden neben den Abgasemissionen auch Treibhausgase freigesetzt. Der Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre gilt als mitverantwortlich für die anthropogen verursachte Erwärmung der Erdoberfläche und die damit verbundenen negativen Auswirkungen auf das Klimasystem. Sowohl Luftschadstoff- als auch Klimagasemissionen führen zu gesamtwirtschaftlichen Kosten beispielsweise im

Gesundheitssystem oder durch reduzierte Ernteträger.

Im BVWP 2030 [126] erfolgt die Berechnung der Veränderung der Abgasbelastungen getrennt für die sechs Schadstoffarten  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ , HC, Partikel (PM) und  $\text{SO}_2$ . Neben den Abgasemissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren werden auch die Emissionen der Energiebereitstellung bei Elektrofahrzeugen berücksichtigt. Es werden die Emissionen aus den Antriebsarten Diesel, Otto und Gas unter Verwendung des HBEFA-Ansatzes ermittelt.

In dieser Studie werden repräsentativ die Emissionen der Luftschadstoffe  $\text{NO}_x$ , PM und des Klimagas  $\text{CO}_2$  berücksichtigt und separat für die Fahrzeugschichten des motorisierten Individualverkehrs sowie für den Schwerverkehr ausgewertet.

Die Emissionen aus Verbrennungsmotoren werden in Abhängigkeit von Fahrleistung und Verkehrssituation berechnet. Die Schadstoff- und Klimagasemissionen der Elektrofahrzeuge sind ausschließlich fahrleistungsabhängig. Alle Berechnungen werden für Bezugs- und Planfall durchgeführt. Folgende Aspekte werden bei der Berechnung der Emissionskennwerte berücksichtigt:

- Streckenklasse (z. B. Autobahn oder Landstraße) mit Geschwindigkeitsprofil,
- Lage (städtisch oder ländlich),
- Streckenauslastung (Level of Service/Verkehrssituation) mit vordefinierten Klassengrenzen,
- nachfragesegmentspezifische Belastung,
- Verkehrszusammensetzung für die Nachfragesegmente Schwer- bzw. Leichtverkehr mit Bezug zur Kraftstoffart, Größenklasse, Emissionsstufe.

Aus dem aktuellen Level of Service (Auslastung), der Lage (städtisch oder ländlich) und der im Vorfeld definierten, den Strecken zugeordneten HBEFA-Streckenklasse (bzw. die aus dem eingestellten Streckenattribut ermittelte Geschwindigkeitsklasse), ergibt sich für jede angewendete Fahrzeugkombination ein Emissionsfaktor. Dieser Faktor entspricht der spezifischen Verkehrssituation und wird mit der aktuellen nachfragespezifischen Streckenbelastung und der Länge der Strecke multipliziert und als relevante Schadstoffemission für jede Strecke ausgegeben.

Als Ergebnis werden die absoluten Emissionskennwerte in Tonnen über alle Straßen summiert.

### Monetarisierung

Die Wertansätze für Schadstoffemissionen gemäß BVWP 2030 [126]<sup>17</sup> sind:

- $\text{NO}_x$ 
  - Stromerzeugung: 15.400 €/t,
  - beim Betrieb von Verbrennungsmotoren innerorts: 15.400 €/t,
  - beim Betrieb von Verbrennungsmotoren außerorts: 15.400 €/t.
- Partikel PM
  - Stromerzeugung: 55.400 €/t,
  - beim Betrieb von Verbrennungsmotoren innerorts: 364.100 €/t,
  - beim Betrieb von Verbrennungsmotoren außerorts: 122.800 €/t.
- $\text{CO}_2$ 
  - Stromerzeugung: 145 €/t,
  - beim Betrieb von Verbrennungsmotoren innerorts: 145 €/t,
  - beim Betrieb von Verbrennungsmotoren außerorts: 145 €/t.

Bei den Wertansätzen der beiden Luftschadstoffe ist darauf hinzuweisen, dass der BVWP hier zu Größenordnungen gekommen ist, die immissionsseitige Belastungen mit umfassen. Dies ist bei außerörtlichen Bundesautobahnen nicht vollkommen korrekt.

#### 4.9.6 Erreichbarkeit

Der Begriff der Erreichbarkeit hat heute zahlreiche Bedeutungen. Es existieren in der Literatur vielfältige Begriffsausprägungen. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Erreichbarkeit zumeist als Messgröße für die Lagegunst verstanden. Im Kern wird eine Beschreibung von Potenzialen zu räumlichen Interaktionen durch den Begriff der Erreichbarkeit ausgedrückt [135], d. h. die Anzahl der Möglichkeiten für das ökonomische oder soziale Leben, welche mit vertretbarem, dem Zweck entsprechenden Auf-

<sup>17</sup> Siehe auch Tabellen im Anhang 2.

wand zugänglich sind. Erreichbarkeit bezeichnet die Qualität eines Raumpunktes, die sich aus seinen verkehrlichen Beziehungen zu attraktiven anderen Raumpunkten ergibt. Sie ist demnach „das eigentliche Hauptprodukt von Transportsystemen“ [142] und spiegelt die „Ausstattung an Infrastruktur, Entfernung und Zentralität der Orte oder Frequenz der zwischen den Regionen verkehrenden Verkehrsmittel wider“ [135]. Die Auswirkungen geplanter Infrastrukturmaßnahmen auf diese Regionen können mithilfe eines Vorher-Nachher-Vergleichs der Erreichbarkeitsindikatoren veranschaulicht werden [135].

Grundsätzlich wird bei der Beurteilung der Erreichbarkeit zwischen sog. outbound accessibility (nach außen) und inbound accessibility (nach innen gerichteter Erreichbarkeit) unterschieden. Erstere untersucht, wie gut von einer Region alle anderen betrachteten Regionen erreicht werden können, während letztere analysiert, wie gut der Ursprungsort von den übrigen Zentren aus erreichbar ist [135].

Als ein (sehr einfaches) Erreichbarkeitsmaß gilt der mittlere Aufwand, der benötigt wird, um von einem Standort aus allen anderen relevanten Standorten zu erreichen oder von verschiedenen Standorten zu einem zentralen Ort zu gelangen. Eine aussagefähigere gewichtete mittlere Aufwandskenngröße entsteht, wenn ein mit den maßgebenden (aktivitätsbezogen) Strukturgrößen gewichteter mittlerer Aufwand (Zeit, Entfernung, Kosten) ermittelt wird, der benötigt wird, um von einem Standort aus alle anderen relevanten Standorte zu erreichen oder umgekehrt [150]. Für die Erreichbarkeitsanalysen nach dem Konzept der einfachen Erreichbarkeit<sup>18</sup> ist die Erschließungs- und Verbindungsqualität von Verkehrssystemen ausschlaggebend [151]. Der Zeitbedarf stellt eine der wesentlichen Größen zur Beurteilung von Qualität und Leistungsfähigkeit dieses Verkehrssystems dar.

In diesem Projekt wird daher die Erreichbarkeit als Potenzialgröße bzgl. des Zeitaufwands zu diesem Ort zu gelangen eingeführt und als sozio-ökonomische Wirkung unabhängig von der monetären Nutzen-Kosten-Betrachtung gemäß der untenstehenden Formel berechnet.

## Berechnungsvorschrift

Aus dem Verkehrsmodell wird die personen- und tonnengewichtete Reisezeit von zehn Beispielstädten zu einer untersuchten Stadt  $x$  ermittelt (inbound accessibility). Zunächst muss die Entfernung der Beispielstädte zur untersuchten Stadt identifiziert und die mittlere Reisezeit berechnet werden. Anschließend wird die mittlere Reisezeit von jeder Beispielstadt zu der untersuchten Stadt einerseits mit der Anzahl der Personen sowie andererseits mit der Anzahl der Tonnen der Güter gewichtet, die zum zu untersuchenden Standort  $x$  reisen möchten bzw. transportiert werden müssen. Die Summe der gewichteten Reisezeiten (Personen und Güter getrennt) wird anschließend durch die Summe der Personen bzw. Tonnen geteilt.

Um eine Aussage zur veränderten Erreichbarkeit zu treffen, wird die Berechnung für den Bezugs- und Planfall durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Es werden also getrennte Erreichbarkeiten für den Personen- und Güterverkehr ausgewiesen, da unterschiedliche Geschwindigkeitsgrenzen und Gewichte vorliegen.

Im Folgenden das formale Beispiel für den Inbound-Indikator im Personenverkehr:

$$er_i = \frac{\sum_{j=1}^{10} t_{ij} * EW_j}{\sum_{j=1}^{10} EW_j} \quad \text{Gl. 55}$$

mit

$er_i$  Erreichbarkeit

$EW$  Einwohner

$t$  Reisezeit

$i$  Index der untersuchten Stadt

$j$  Index der zu erreichenden Städte

### 4.9.7 Kosten für ein gegebenes Verkehrsbetriebsszenario

Für sämtliche relevante Verkehrsbetriebsszenarien wird zuerst der Einfluss der maßnahmenbedingten Verkehrseinschränkung auf das gesamte Verkehrssystem bestimmt. Danach werden mit den Modellen in den Kapiteln 4.9.1 bis 4.9.6 die Konsequenzen über sämtliche Wirkungsspektren bestimmt.

Die monetarisierten Konsequenzen aus den verschiedenen Wirkungsspektren können summiert

<sup>18</sup> Auf das Konzept der integrierten Erreichbarkeit soll hier nicht weiter eingegangen werden.

werden, um die Kosten für das Verkehrsbetriebsszenario zu erhalten.

Die Kosten eines Verkehrsbetriebsszenarios werden aus dem Vergleich sämtlicher Konsequenzen eines Verkehrsbetriebsszenarios mit sämtlichen Konsequenzen des Referenzszenarios (keine Verkehrsbehinderung) gezogen.

#### 4.10 Erwartete Kosten

Im letzten Schritt werden sämtliche beschriebenen Modelle zur Berechnung der erwarteten Kosten für die Fälle mit bzw. ohne Monitoring verwendet. Aus den beschriebenen Modellen werden sämtliche Kosten in Funktion der Zeit bestimmt: für den Fall ohne Monitoring werden die Kosten für Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen und für die Verkehrsbehinderung berücksichtigt. Für den Fall „mit Monitoring“ kommen Kosten für Monitoring und Bauwerksversagen dazu. Kosten sind im Fall „ohne Monitoring“ deterministisch bestimmt, im Fall mit Monitoring probabilistisch und werden dann zu einem Erwartungswert pro Zeitschritt gezogen. Zum Schluss werden die Kosten diskontiert und zu einem Gegenwartswert npv summiert, siehe Bild 35.

Grundsätzlich sollte die Entscheidung aufgrund des Gegenwartswerts  $npv(\cdot)$  fallen, der sämtliche direkte und indirekte Kosten beinhaltet. Der übersichtshalber können im Verfahren jedoch zusätzlich separate Gegenwartswerte für direkte und indirekte Kosten berechnet werden.

### 5 Konzept zur Ermittlung gesamtwirtschaftlicher Effekte ohne automatisierte Berechnung im Verkehrsmodell

Zur Ermittlung verkehrlicher Kennzahlen werden Verkehrsmodelle verwendet. Verkehrsmodelle geben Auskunft über (Veränderungen in den) Belastungen der Strecken des Bezugsfalls und der unterschiedlichen Planfälle.

Steht keine automatisierte Berechnung im Verkehrsmodell zur Verfügung, so können Abschätzungen durchgeführt werden. Hierfür wird im folgenden Kapitel beschrieben, wie man mit den grundlegenden Angaben eines Verkehrsmodells den Input für die Ermittlung der in dieser Studie berücksichtigten

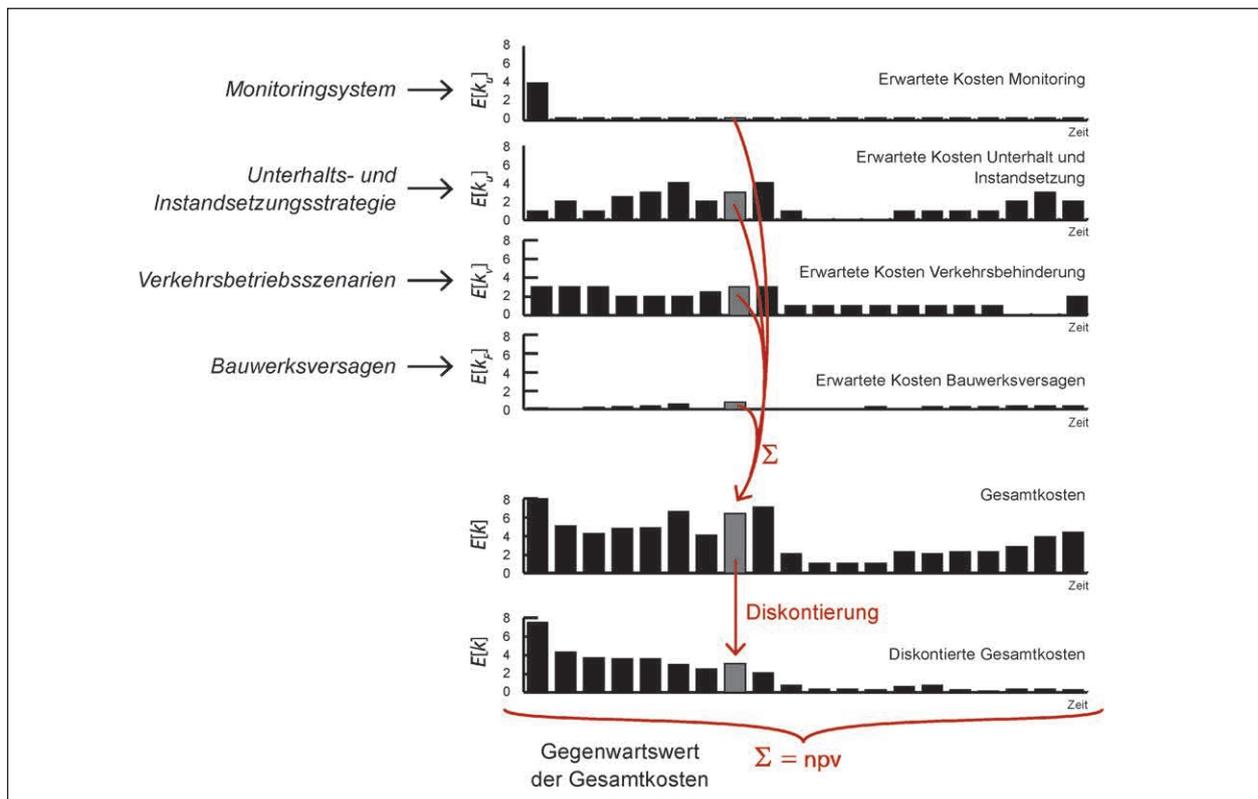


Bild 35: Berechnung des Gegenwartswerts der Gesamtkosten für den Fall, dass ein Monitoringsystem installiert ist [eigene Darstellung]

gesamtwirtschaftlichen Effekte herleitet. Dies hilft nicht nur zu verstehen, wie aggregierte Verkehrsmengen berechnet werden, sondern auch, wie ein Verkehrsmodell arbeitet. In den Beispielen in dieser Studie wurde jedoch das Verkehrsmodell angewendet.

## 5.1 Ermittlung der Pkw- und Schwerverkehrfahrleistungen sowie der Fahrzeuganteile

Für die nachfolgende Erläuterung wird davon ausgegangen, dass das Verkehrsmodell einen richtungsbezogenen durchschnittlichen werktäglichen Verkehr (DTVw) über alle Fahrzeugarten bereitstellt.

Insbesondere für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der Luftschadstoffemissionen werden die Fahrleistungen und Geschwindigkeiten im untersuchungsrelevanten Netzausschnitt, differenziert nach Kfz-Arten (Pkw und Lkw), Straßentypen (z. B. Autobahnen) und Fahrsituationen (flüssiger Verkehr, Stop&Go etc.) benötigt.

Für die Aufteilung der Fahrleistung auf die Kfz-Arten gibt es im Methodenhandbuch des Bundesverkehrswegeplans Werte für die gewichtete mittlere Jahresfahrleistung, mithilfe derer die Anteile der Kfz-Arten ermittelt werden können [126]. Mit den Angaben in [126] können außerdem die prozentualen Anteile der Antriebsarten im Pkw-Verkehr berechnet werden. So ergibt sich zum Beispiel, dass 57 % der Pkw mit Ottomotor ausgestattet sind, 41 % mit Dieselmotor und nur 2 % andere Antriebsarten wie u. a. elektrische Batterien und Gas aus-

weisen. Die Aufteilung der Jahresfahrleistung nach Fahrzeuggruppen ist in Tabelle 17 dargestellt.

Auch die Angaben des Kraftfahrt-Bundesamts des Jahres 2017 identifizieren ähnliche Werte zur Verteilung der Verkehrsarten. Die jährliche Gesamtfahrleistung für Pkw (alle Antriebsarten) betrug in diesem Fall 630,5 Milliarden Kilometer (km), und damit 86 % der Gesamtfahrleistung, gefolgt von den Lkw bis 3,5 Tonnen, die 6,4 % ausmachen, sowie den Lkw ab 3,5 t mit 7,6 % der Fahrleistung [210].

Liegen dem Planer die Streckenkilometer und die dazugehörigen Belastungen für das betrachtete Netz vor, so kann er mit den oben dargestellten Kenngrößen die Jahresfahrleistungen nach Personen- und Güterverkehr und den zum Einsatz kommenden Antriebsarten richtungsbezogen differenzieren.

## 5.2 BVWP- und HBEFA-Streckentypen

Der BVWP 2030 [126] differenziert 120 verschiedene Streckentypen und bestimmt Zuordnungsschlüssel, mit denen diese 120 Streckentypen den Straßentypen des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) zugeordnet werden können. Im HBEFA werden 10 Straßentypen unterschieden: Autobahn, Semi-Autobahn, Stadtautobahn, Fern-/Bundesstraßen, Hauptverkehrsstraße (kurvig), Sammelstraße (kurvig), städtische Magistrale/Ringstraße und Erschließungsstraße, differenziert nach der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Außerdem gibt es eine Unterteilung in ländlich geprägte Regionen und Agglomeration. Die HBEFA-

Fahrzeuggruppe	Jahresfahrleistung (Mio. Fz-km)	Anteil Antriebsart [%]	Anteil an Fahrleistung [%]
Pkw mit Ottomotor (gewichtetes Mittel)	349,301	57	50
Pkw mit Dieselmotor (gewichtetes Mittel)	246,580	41	35,5
Pkw mit sonstigen Motoren (gewichtetes Mittel)	12,8888	2	1,9
LN Leichte Nutzfahrzeuge > 3,5 t	35,873		5,1
LS (Lastkraftwagen ohne Anhänger)	26,664		3,8
ZL (Lastkraftwagen mit Anhänger)	5,125		0,7
ZS (Sattelzüge mit Auflieger)	17,472		2,5

Tab. 17: Anteile der Fahrzeuggruppen an Jahresfahrleistung nach BVWP 2030 [126]

Straßentypen sind in Bild 36 dargestellt sowie die jeweiligen Merkmale in Bild 37 erläutert.

sind insbesondere die ersten vier Ziffern des BVWP-Streckentyps [126].

Die Typisierung der Streckentypen des BVWPs wird nach relevanten Streckenattributen vorgenommen. Bild 38 verdeutlicht die Klassifizierung. Relevant

Zur Vereinfachung wird vorgeschlagen, dass der Verkehrsplaner sich für seine vorliegenden Strecken jeweilige BVWP-Streckentypen exemplarisch

Übersicht ueber die Verkehrssituationen

Gebiet	Strassentyp	Verkehrszustand	Tempo-Limit [km/h]													
			30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	>130		
laendlich gepraegt	Autobahn	4 VZustaende														
	Semi-Autobahn	4 VZustaende														
	Fern-, Bundesstrasse	4 VZustaende														
	Hauptverkehrsstrasse	4 VZustaende														
	Hauptverkehrsstrasse, kurvig	4 VZustaende														
	Sammelstrasse	4 VZustaende														
	Sammelstrasse, kurvig	4 VZustaende														
	Erschliessungsstrasse	4 VZustaende														
Agglo- meration	Autobahn	4 VZustaende														
	Stadt-Autobahn	4 VZustaende														
	Fern-, Bundesstrasse	4 VZustaende														
	Stadt, Magistrale / Ringstr.	4 VZustaende														
	Hauptverkehrsstrasse	4 VZustaende														
	Sammelstrasse	4 VZustaende														
Erschliessungsstrasse	4 VZustaende															

Zugeordneter Flottenmix-Typ:  
 = Autobahn  
 = Land  
 = Agglo.

Schliessen

Bild 36: HBEFA-Straßentypen [211]

Definition 'Strassentyp'

ShortName	Comment	ID	Schliessen
Autobahn	>= 2x2 Fahrstreifen, kreuzungsfrei	10	
Stadt-Autobahn	>= 2x2 Fahrstreifen; kreuzungsfrei; Magistrale / Ringstrasse mit hoher Kapazität	11	
Semi-Autobahn	variable Anzahl Fahrstreifen (gebraeuchlich zB in Sweden, laendlicher Raum)	12	
Fern-, Bundesstrasse	kreuzungsfrei, >= 2x1 Fahrstreifen, Tempolimit 80-100 kmh	20	
Stadt, Magistrale / Ringstr.	>= 2x1 Fahrstreifen; kann kreuzungsfrei sein, aber keine Autobahn	21	
Hauptverkehrsstrasse	>= 2x1 or >= 1x2 Fahrstreifen, mittlere Kapazität; Landesstrasse, mit überregionalem Verkehr	30	
Hauptverkehrsstrasse, kurvig	>= 2x1 or >= 1x2 Fahrstreifen, mittlere Kapazität; Landesstrasse, mit überregionalem Verkehr; mit Kurven	31	
Sammelstrasse	Verbindungsstrasse zwischen Ortschaften; <= 2x1 Fahrstreifen	40	
Sammelstrasse, kurvig	Verbindungsstrasse zwischen Ortschaften, <= 2x1 Fahrstreifen; mit Kurven	41	
Erschliessungsstrasse	städtische resp. Dörfliche Erschliessungsstrassen, <= 2x1 Fahrstreifen	50	

Bild 37: Merkmale der HBEFA-Straßentypen [211]

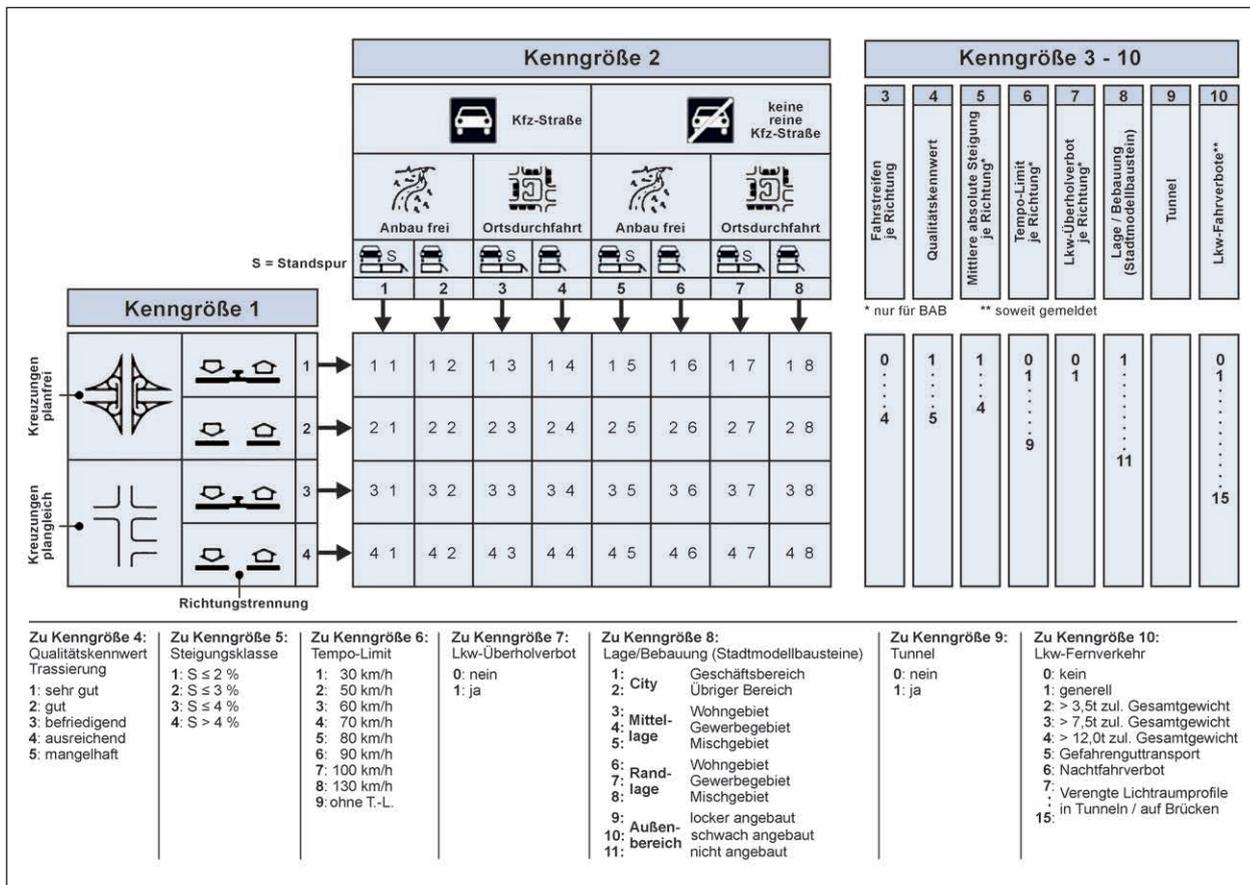


Bild 38: Typisierung Netzmodell Bundesfernstraßen [126]

heraussucht (z. B. ein Streckentyp für Autobahnstrecken außerorts und innerorts, Fern- und Bundesstraßen, Hauptverkehrsstraßen etc.), um mittels des zugehörigen Funktionstyps nicht nur die (Höchst-)Geschwindigkeit zu ermitteln, sondern ebenfalls die Kapazitätsgrenze und die Zuordnung zum HBEFA-Straßentyp. An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass eine stark reduzierte Anzahl an Streckentypen, d. h. eine starke Generalisierung zu Ungenauigkeiten z. B. bei der Bestimmung der Auslastung führen kann. Der Grad der Vereinfachung der Straßentypen liegt letztendlich im Ermessen des Verkehrsplaners.

Exemplarisch wird hier als Beispiel der BVWP-Streckentyp 2.1.2.4 (Autobahn) vorgeschlagen, dem im BVWP 2030 [126] der Funktionstyp 2 zugeordnet wird sowie der Funktionsschlüssel A1 des HBEFA-Straßentyps.

Ein Funktionstyp im BVWP 2030 [126] ist mit einer Geschwindigkeitsformel hinterlegt, die den empirischen Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke  $q$  und der mittleren Pkw-Geschwindigkeit  $v$  herstellt. Eine solche  $q$ - $v$ -Funktion ist in Bild 39 bei-

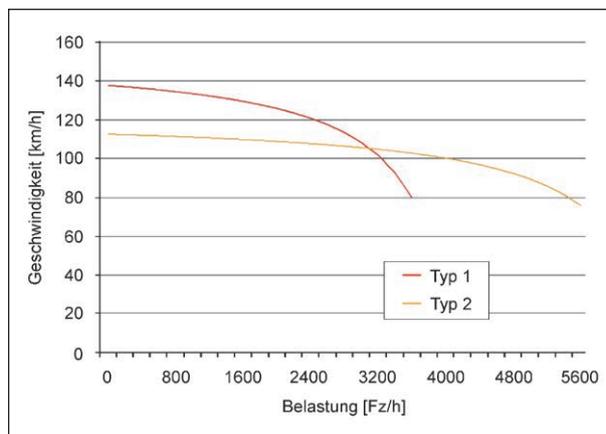


Bild 39: Zwei q-v-Beziehungen (2 FS) [125]

spielhaft dargestellt. Mit den zu den Funktionstypen zugehörigen  $q$ - $v$ -Beziehungen kann der Verkehrsplaner seinen (exemplarischen) Strecken mittlere Geschwindigkeiten zuordnen.

Die Zuordnungsschlüssel von HBEFA-Straßentypen zu BVWP-Streckentypen, BVWP-Streckentypen zu Funktionstypen, Funktionstypen zu  $q$ - $v$ -Beziehungen und Kapazitätsgrenzen befinden sich in den Anhängen A und B des BVWP 2030 [126].

### 5.3 Ermittlung des Verkehrszustands und Auslastungsgrad

Die Zuordnung z. B. eines Emissionsfaktors erfolgt abhängig vom Verkehrszustand. Im HBEFA 3.2 [211] (und BVWP 2030 [126]) werden die in Tabelle 18 aufgelisteten Verkehrszustände unterschieden.

Die Verkehrszustände werden anhand der Belastung auf den Strecken und der Kapazität bestimmt. Die Kenngröße Auslastungsgrad  $ag$  dient zur Darstellung der Qualität im Verkehrsablauf. Sie ist das Verhältnis zwischen der Verkehrsstärke  $Q_B$  (Pkw-E/h) und der Kapazität  $C$  (Pkw-E<sub>max</sub>/h). Der Auslastungsgrad  $ag$  charakterisiert die Bewegungsfreiheit des Kraftfahrers im Verkehrsfluss. Er ist dimensionslos und wird folgendermaßen ermittelt:

$$\text{Auslastungsgrad } ag = \frac{Q_B}{C} \quad \text{Gl. 56}$$

flüssig	Freifließender Verkehr; konstante und hohe Geschwindigkeit	$ag \leq 0,65$
dicht	Freifließender Verkehr bei hoher Verkehrsbelastung; nahezu konstante Geschwindigkeit	$0,65 < ag \leq 0,85$
gesättigt	Unsteter Verkehrsfluss, Kapazitätsgrenze nahezu erreicht; variierende Geschwindigkeit	$0,85 < ag \leq 1,0$
Stop and go	Stop+go-Verkehr, Kapazitätsgrenze überschritten; variierende, tiefe Geschwindigkeit	$> 1,0$

Tab. 18: Verkehrszustände nach HBEFA 3.2 und BVWP 2030 [126], [211]

### 5.4 Bestimmung der DTV-Anteile nach Tagesstunden

Die Verkehrsbelastung ändert sich i. d. R. im Verlaufe eines Tages, was von verschiedenen Faktoren abhängig ist (Funktion der Straße, Wochentag, Jahreszeit etc.). Eine typische Werktagsganglinie mit einem hohen Anteil an Berufsverkehr weist häufig zwei Peaks am Tag auf, einmal eine Morgenspitze und einmal eine Nachmittagspitze, wo der Verkehr je nach dem frei, teilgebunden, gebunden oder Stop+go sein kann. In den Randzeiten ist die Belastung deutlich geringer und der Verkehr kann frei fließen. Nichtsdestotrotz gibt es verschiedenste Arten von Tagesganglinien, in denen sich die Spitzenstunden unterschiedlich darstellen können. Daher ist es ratsam, verschiedene Tagesganglinien für die vorliegenden Straßentypen anzuwenden und anzunehmen.

Als Datengrundlagen wird i. d. R. der DTV herangezogen und typisierte Verkehrsstärkeganglinien darauf angewendet. Eine Typisierung von Tagesganglinien wurde zum Beispiel in der Studie von [207] vorgenommen. Es geht um eine Typisierung von Straßenabschnitten anhand der Jahres-, Wochen- und Tagesganglinien der Verkehrsstärke, auf Basis der bundeseigenen automatischen Dauerzählstellen. Die Typisierung erfolgt u. a. in Tagesganglinien mit stark ausgeprägter Morgenspitze, mit geringer Nachmittagspitze, tagsüber ausgeglichen, Doppelspitze und nur Nachmittagspitze.

Bild 40 zeigt beispielhaft eine Typisierung der Tagesganglinien (Di-Do). Die Studie gibt außerdem



Bild 40: Tagesganglinientypen für die Werktage Di-Do [207]

Typ	Merkmal	Straßentyp
A	Stark ausgeprägte Morgenspitze	Von erwerbsbedingtem Verkehr geprägte Strecken. Korrespondieren in der Gegenrichtung regelmäßig mit Typ E und F
B	Morgenspitze, geringe Nachmittagsspitze	
C	Tagsüber relativ ausgeglichene Verkehrsverteilung	Fast ausschließlich auf Autobahnabschnitten, insbesondere hochbelastete Straßenabschnitte
D	Doppelspitze (morgens/nachmittags)	Überproportional im nachrangigen Netz, Bundesstraßen
E	Nachmittagsspitze, geringe Morgenspitze	insbesondere an Freitagen, geprägt von Wochenendpendlern oder Ausflügler, Landes- bzw. Staatsstraßen, Bundesstraßen
F	Stark ausgeprägte Nachmittagsspitze	Von erwerbsbedingtem Verkehr geprägte Abschnitte; korrespondiert in Gegenrichtung regelmäßig mit den Typen A und B; wesentlich häufiger im nachrangigen Netz, Landes- bzw. Staatsstraßen
G	Überdurchschnittliche Anteilswerte frühmorgens, nach Morgenspitze stetig fallend (nur Tagesgruppe Montag)	Die Typen der Tagesgruppen Montag und Dienstag bis Donnerstag mit Ausnahme von Typ G nahezu identisch. Typ G deutet auf vom Wochenendpendlerverkehr geprägte Abschnitte hin.

Tab. 19: Zuordnung Tagesganglinientyp und Straßentyp [207]

Information darüber, welche Tagesganglinien vornehmlich an welchen Straßentypen vorkommen, wie in Tabelle 19 aufgeführt.

Die Studie bildet eine gute Grundlage für den Verkehrsplaner, sich für seine Straßentypen (und Querschnitte) für Tagesganglinientypen zu entscheiden, auf die er den DTV verteilen kann. Dabei ist nicht nur die Betrachtung der (häufigsten) Tagesganglinientypen je Straßentyp wichtig, sondern auch die Typisierung nach Werktagen sowie der Vergleich Richtung/Gegenrichtung.

Straßentyp	Tagesganglinientyp	
	Querschnitt 1	Querschnitt 2
Autobahn	Typ C	Typ C
Stadt-Autobahn	Typ A	Typ F
Fern-/Bundesstraße	Typ D	Typ D
Hauptverkehrsstraße	Typ F	Typ A
Sammelstraße	Typ F	TYP B

Tab. 20: Beispielhafte Zuordnung von Tagesganglinientypen zu Straßentypen je Richtung [eigene Darstellung]

### Typisierung nach Werktagen

Aus der Studie lässt sich entnehmen, dass sich der Typenvergleich nach Straßenklassen für die Tagesgruppen Montag, Dienstag bis Donnerstag und Freitag jeweils ähnlich darstellt. Bei einem Vergleich der relativen Häufigkeiten aller Tagesganglinien, treten die Typen D und E (44 %) am häufigsten auf.

### Vergleich Richtung/Gegenrichtung

In Bezug auf den Vergleich Richtung/Gegenrichtung lässt sich feststellen, dass zum Beispiel für die Tagesgruppe Montag Abschnitte mit einer Morgenspitze in der einen Richtung in der Gegenrichtung tendenziell eine Nachmittagsspitze aufweisen. Dieser Zusammenhang tritt umgekehrt nur für Abschnitte mit einer ausgeprägten Nachmittagsspitze (Typ F) in ähnlicher Deutlichkeit auf. Diese Beobachtungen gelten ebenfalls für die Tagesgruppen Dienstag bis Donnerstag sowie Freitag.

### Exemplarische Zuordnung der typisierten Tagesganglinie zu (aggregierten) Straßentypen

Exemplarisch soll an dieser Stelle eine Zuteilung auf mögliche Straßentypen erfolgen (siehe Tabelle 20).

#### 5.4.1 Beispielhafte Erstellung von Tagesganglinien und Berechnung des Auslastungsgrads *ag*

Sofern der Verkehrsplaner für sein Netz entsprechende Tagesganglinien erstellen möchte, ist es möglich, die Daten der bundeseigenen Zählstellen zu verwenden, die Werte für die Erstellung eigener DTVs für verschiedene Wochentage ermöglichen, richtungsgetreunt sowie differenziert nach Lkw- und Pkw. Aus verschiedenen Zählstellen im Netz kann der Planer so Mittelwerte bilden und durchschnittliche DTV annehmen und auf dieser Basis Tagesganglinien für seine Straßentypen bilden. Mit den Werten können daraufhin die Auslastungsgrade *ag* berechnet und die Verkehrszustände (Belastungen je Stunde) ermittelt werden.

Beispielhaft werden im Folgenden anhand von fiktiven Daten zu Pkw-Einheiten pro Stunde auf einer fiktiven Strecke des BVWP-Streckentyps 2.1.2.4 (HBEFA A1) richtungsfeine Tagesganglinien erstellt sowie der Auslastungsgrad  $ag$  berechnet.

Im ersten Schritt muss die Anzahl der Pkw-E/h gemäß der Tagesganglinien je Fahrtrichtung verteilt werden. Dies wurde in Tabelle 21 mit fiktiven Werten für den Streckentyp mit 2x2 Fahrstreifen durchgeführt. Im BVWP 2030 hat der ausgewählte Funktionstyp eine Kapazität von 3.900 Pkw-E/h je Richtung und es ergeben sich die in Tabelle 21 dargestellten Werte für den Auslastungsgrad  $ag$ .

Die Tabelle verdeutlicht, an wie vielen Stunden am Tag welcher Auslastungsgrad erreicht wird. Stop&Go-Verkehr wird bei dieser exemplarischen Strecke und Tag bei Richtung 1 vier Stunden erreicht und bei Richtung 2 sechs Stunden.

In Bild 41 werden die absoluten Tagesganglinien mithilfe der Verteilung der Pkw-Einheiten beider Richtungen über den Tag dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Richtungen einmal eine Morgenspitze und einmal eine Nachmittagsspitze aufweisen und

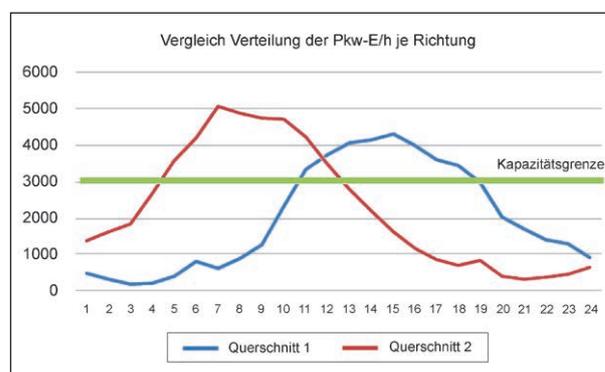


Bild 41: Vergleich absolute Tagesganglinien je Richtung [eigene Darstellung]

Stunde	Richtung 1			Richtung 2		
	Pkw-E/h	Anteil	$ag$	Pkw-E/h	Anteil	$ag$
1	480	1,0 %	0,12	1.390	2,54 %	0,36
2	316	0,7 %	0,08	1.614	2,95 %	0,41
3	184	0,4 %	0,05	1.842	3,36 %	0,47
4	218	0,4 %	0,06	2.694	4,92 %	0,69
5	398	0,8 %	0,10	3.582	6,54 %	0,92
6	818	1,7 %	0,21	4.196	7,67 %	1,08
7	628	1,3 %	0,16	5.063	9,25 %	1,30
8	890	1,8 %	0,23	4.878	8,91 %	1,25
9	1.271	2,6 %	0,33	4.738	8,66 %	1,21
10	2.330	4,8 %	0,60	4.715	8,61 %	1,21
11	3.327	6,9 %	0,85	4.219	7,71 %	1,08
12	3.730	7,7 %	0,96	3.473	6,34 %	0,89
13	4.068	8,4 %	1,04	2.785	5,09 %	0,71
14	4.156	8,6 %	1,07	2.187	4,00 %	0,56
15	4.324	8,9 %	1,11	1.616	2,95 %	0,41
16	3.978	8,2 %	1,02	1.154	2,11 %	0,30
17	3.614	7,5 %	0,93	857	1,57 %	0,22
18	3.440	7,1 %	0,88	696	1,27 %	0,18
19	2.978	6,1 %	0,76	830	1,52 %	0,21
20	2.023	4,2 %	0,52	407	0,74 %	0,10
21	1.704	3,5 %	0,44	329	0,60 %	0,08
22	1.404	2,9 %	0,36	373	0,68 %	0,10
23	1.288	2,7 %	0,33	458	0,84 %	0,12
24	912	1,9 %	0,23	646	1,18 %	0,17

Tab. 21: Verteilung des DTV und Auslastungsgrad auf einer Autobahn 2x2 Fahrspuren mit Kapazität von 3.900 Pkw-E je Querschnitt [eigene Darstellung]

die Kapazitätsgrenze überschritten wird (wie auch der Auslastungsgrad verdeutlicht).

**5.4.2 Umrechnungsfaktoren von DTVw auf DTV**

Da sich auch die Verkehrszusammensetzung je Wochentag unterscheidet, insbesondere durch das Fahrverbot für bestimmte Lkw an Wochenenden oder eine erhöhte Anzahl von Pendlerfahrten an Werktagen, gibt es Faktoren, die den  $DTV_{\text{Werktag}}$  auf den DTV umrechnen. Die hier dargestellten Werte dienen lediglich als Richtlinie, denn es gibt regional unterschiedliche Werte, die gegebenenfalls im Detail betrachtet werden sollten:

Kfz DTVw --> DTV Faktor 0,90,

Lkw > 3,5 t zul. GG DTVw --> DTV Faktor 0,80.

**5.5 Zuordnung der Emissions- und Kraftstoffverbrauchsfaktoren je Straßentyp, Verkehrszustand und Fahrzeugart**

Der BVWP 2030 hat für jeden Straßentyp, Verkehrszustand und jede Fahrzeugart Emissions- sowie Kraftstoffverbrauchsfaktoren, die für die Berechnung des Emissions- und Kraftstoffverbrauchs notwendig sind. Die Energie- bzw. Kraftstoffverbrauchsfaktoren liegen für die Kraftstoffe Diesel, Otto und Gas getrennt nach Fahrzeugtypen, Antriebsart, Straßentyp und Verkehrszustand vor. Beispielfhaft ist in Tabelle 22 der Kraftstoffverbrauch an Pkw-Diesel abgebildet.

Die Emissionsfaktoren der einzelnen Schadstoffe in Abhängigkeit der Fahrzeuggruppe, des HBEFA-Straßentyps, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und des Verkehrszustands sind dem BVWP-Methodenhandbuch zu entnehmen [126]. Beispiel-

Straßentyp A1	Verkehrszustand			
	zul. H.-Geschw. [km/h]	flüssig	dicht	gesättigt
80	3,997	3,837	4,468	7,472
100	4,046	4,025	4,180	7,472
120	4,742	4,508	4,180	7,472
130	5,066	4,801	4,180	7,472
> 130	5,650	5,151	4,180	7,472

Tab. 22: Kraftstoffverbrauch Pkw-Diesel (in l/100 Fz-km) bei Straßentyp A1 [126]

haft ist hier die Tabelle 23 aufgeführt, welche die CO-Emissionen der Lkw ohne Anhänger zeigt.

Um für seine exemplarischen Streckentypen nach BVWP den Emissions- bzw. Kraftstoffverbrauchs-faktor zu erhalten, muss der Verkehrsplaner eine Zuordnung seiner Strecken zu den HBEFA-Straßentypen durchführen, was er mittels des Zuordnungsschlüssel BVWP-Streckentyp zu HBEFA-Straßentyp im Anhang des BVWP 2030 umsetzen kann [126].

**5.6 Berechnung verschiedener gesamtwirtschaftlicher Indikatoren**

Im Folgenden wird die Berechnung unterschiedlicher gesamtwirtschaftlicher Indikatoren dargestellt. Es soll hier darauf hingewiesen werden, dass aus Gründen der besseren Lesbarkeit und des einfacheren Verständnisses an dieser Stelle mitunter Informationen aus dem Kapitel 4.9 wiederholt werden.

**5.6.1 Betriebskosten**

Die Betriebskosten setzen sich zusammen aus den Betriebsgrundkosten, Vorhaltungskosten, Personalkosten sowie Energiekosten. Zur Berechnung werden die Fahrleistung je Antriebsart für die unterschiedlichen Fahrzeuggruppen (im Pkw-Verkehr nur für geschäftliche Zwecke) mit den Vorhaltungskosten sowie Betriebsgrundkosten multipliziert. Die Fahrzeugstunden, getrennt nach Pkw und Lkw, werden mit den jeweiligen Personalkosten für Lkw-Fahrer multipliziert. Fahrzeiten des geschäftlichen Pkw-Verkehrs und damit auch die Personalkosten werden mit dem Indikator Reisezeit berücksichtigt. Zur Ermittlung des Energie- und Kraftstoffver-

Straßentyp A1	Verkehrszustand			
	zul. H.-Geschw. [km/h]	flüssig	dicht	gesättigt
80	0,480	0,503	0,510	1,288
100	0,463	0,491	0,510	1,288
120	0,463	0,491	0,510	1,288
130	0,463	0,491	0,510	1,288
> 130	0,463	0,488	0,510	1,288

Tab. 23: CO-Emissionen (g/km) Lkw ohne Anhänger (ab 7,5 t) [212]

brauchs ist die Auslastung, Lage (städtisch oder ländlich) und die im Vorfeld definierte, den Strecken zugeordneten HBEFA-Streckenklasse (bzw. die aus dem eingestellten Streckenattribut ermittelte Geschwindigkeitsklasse) heranzuziehen. Aus diesen Merkmalen ergibt sich für jede angewendete Fahrzeugkombination ein Energie- bzw. Kraftstoffverbrauchs faktor, der auf die Fahrleistung einer Stunde eines Fahrzeugtyps eines Streckenabschnitts anzuwenden ist. Für das bewertungsrelevante Ergebnis ist über alle Fahrzeugarten, Stunden und Streckenabschnitte aufzusummieren. Die Berechnungsvorschriften zur Monetarisierung sind im Methodenhandbuch des BVWP 2030 zu finden [126].

### 5.6.2 Reisezeit

Die Verkehrsbeteiligungsdauer ergibt sich aus der Division der Fahrleistung mit der streckenbezogenen aktuellen oder mittleren Geschwindigkeit je Stunde der Ganglinie. Die Geschwindigkeiten  $V$  lassen sich durch die von gewissen Randbedingungen (z. B. Straßentyp) abhängigen  $q$ - $V$ -Beziehungen ermitteln. Wie bereits erwähnt, gibt das Methodenhandbuch des BVWP 2030 für jeden Funktionstyp eine Zuordnung der  $q$ - $V$ -Beziehungen an. Die Fahrzeugstunden je Verkehrsart werden mit den jeweiligen Kostensätzen multipliziert. Die Berechnungsvorschriften und Wertangaben finden sich im Methodenhandbuch des BVWP 2030 [126].

### 5.6.3 Unfallkosten

Zu Berechnung der Unfallkosten werden die fahrleistungsbezogenen Unfallkostenraten herangezogen und mit den Fahrleistungen in km je Straßentyp multipliziert. Dafür muss eine Zuordnung der Unfallkostentypen zu den Straßentypen erfolgen. Die Berechnungsvorschrift sowie die Merkmale der Unfallkostentypen befinden sich im BVWP 2030 [126].

### 5.6.4 Luftverschmutzungs- und Klimakosten

Die Emissionen aus Verbrennungsmotoren werden in Abhängigkeit von Fahrleistung und Verkehrssituation berechnet. Aus der Auslastung, der Lage (städtisch oder ländlich) und der im Vorfeld definierten, den Strecken zugeordneten HBEFA-Streckenklasse (bzw. die aus dem eingestellten Streckenattribut ermittelte Geschwindigkeitsklasse), ergibt sich für jede angewendete Fahrzeugkombination

ein Emissionsfaktor, der auf die Fahrleistung einer Stunde eines Fahrzeugtyps eines Streckenabschnitts anzuwenden ist. Für das bewertungsrelevante Ergebnis ist über alle Fahrzeugarten, Stunden und Streckenabschnitte aufzusummieren. Als Ergebnis werden die absoluten Emissionen in Tonnen über alle Streckenabschnitte des Netzes angegeben. Die Berechnungsvorschriften sind im BVWP 2030 [126] dokumentiert.

### 5.6.5 Lärm

Es gibt unterschiedlichste Methoden, Lärm bzw. Lärmveränderungen zu ermitteln. Es können z. B. Berechnungsterme aus der EU-Umgebungsrichtlinie (EU-Richtlinie 2002, [152]) und der 16. BImSchV Anwendung finden [123]. Hierbei ist der Mittelungspegel ( $L_{DEN}$ ) aus den Lärmemissionen für die Tages-, Abend- und Nachtstunden abzuleiten. Die Lärmemissionen sind abhängig von dem durchschnittlichen täglichen Verkehr werktags in Fzg/24Std sowie von dem Lkw-Anteil der betrachteten Strecke in der Verkehrsbelastung, wobei  $L_{Day}$  12 Stunden beginnend um 6.00 Uhr,  $L_{Evening}$  4 Stunden beginnend um 18.00 Uhr und  $L_{Night}$  8 Stunden beginnend um 22.00 Uhr, umfasst. Um den Abstand zur Straße zu berücksichtigen, wird ein Faktor zur Messung der Pegeländerung durch unterschiedliche Abstände aus der 16. Verordnung des Bundes-Immissionsschutzgesetz BImSchG herangezogen (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV [146]). Der Faktor  $DS_{\perp}$  dient der Korrektur der Pegeländerung durch unterschiedliche Abstände  $S_{\perp}$  zwischen dem Emissionsort (0,5 m über der Mitte des betrachteten Fahrstreifens) und dem maßgebenden Immissionsort ohne Boden- und Meteorologiedämpfung und muss dem Mittelungspegel  $L_{DEN}$  zuaddiert werden.

Im BVWP 2030 [125] wird die Veränderung der Lärmbelastung in innerorts und außerorts unterschieden und differenziert bewertet. Für die Bewertung innerorts werden Wirkungen nur dann berücksichtigt, wenn im Planfall der Lärmindex  $L_{DEN}$  den Wert von 45 dB(A) überschreitet und zudem die Differenz der Lärmbelastung zwischen Bezugs- und Planfall 2 dB(A) größer ist. Die Berechnungsvorschriften für Lärm innerorts und außerorts sind im BVWP 2030 dargestellt. Die Monetarisierung erfolgt nach Kostensätzen je exponierter Person in Abhängigkeit von der Lärmexposition (innerorts) oder Wertansätze für spezifische Vermeidungskosten bei Einsatz von Lärmschutzwänden in Abhängigkeit

der Pegeldifferenz (außerorts). Die Anzahl der dem jeweils ermittelten Lärmpegel ausgesetzten Personen wird mithilfe der Stadtmodellbausteininformation „Anwohner je 100 m Streckenlänge“ für jede Straßenseite und Baureihe benötigt. Dies kann unter Umständen viel Arbeit für den Verkehrsplaner bedeuten.

Auch aufgrund des umfangreichen Datenbedarfs für die soweit vorgestellte Berechnungsmethode soll hier eine weitere Methode zur Berechnung des Lärms aufgeführt werden, die sich am „Update of the Handbook on External Costs of Transport“ [206] orientiert und in der vorliegenden Studie zur Berechnung der Lärmkosten angewendet wurde. In diesem Handbuch werden aggregierte Kostensätze für Lärmkostenberechnungen von größeren Netzen vorgeschlagen, mit deren Hilfe es möglich ist, mit den vorliegenden Daten aus dem Verkehrsnetz eine vereinfachte, aber dennoch verlässliche Berechnung durchzuführen.

Die Kostensätze sind abhängig von folgenden Größen:

- Fahrzeugklassen: z. B. Pkw und Lkw,
- Tageszeit: Tag oder Nacht,
- Verkehrsfluss: Dicht oder dünn,
- Raumtyp: urban, suburban, rural.

Sowohl Raumtyp als auch Fahrzeugklassen sind statisch, die Zuordnung ändert sich während der Berechnung nicht, während der Verkehrsfluss sehr von der Tageszeit abhängt, wie in den vorangegangenen Kapiteln zu den Tagesganglinien dargestellt (Kapitel 5.3). Durch die Zuordnung des Verkehrsplaners von Tagesganglinien zu seinen Strecken, erhält dieser Informationen über den Verkehrszustand am Tag und in der Nacht, sowie zu Spitzenstunden. Eine Kategorisierung der Raumtypen erfolgt auf Basis der Straßendichte (Einwohner pro Straßenkilometer), hierfür lassen sich entsprechende Grenzwerte im Handbuch finden. Falls keine Einwohnerdaten zur Verfügung stehen, kann die Zuordnung zu den Raumtypen auch auf Basis von anderen, nachvollziehbaren Kriterien durchgeführt werden, wobei alle Straßen außerhalb bebauter Gebiete grundsätzlich als rural eingestuft werden sollten.

Im Rahmen der Berechnung der Kosten wird empfohlen, aggregierte Kostensätze anzuwenden. Der Verkehrsplaner muss zur anschließenden Moneta-

risierung die Anzahl der Fahrzeug-km getrennt nach Pkw und Lkw abhängig von Verkehrszustand, Tageszeit und Raumtyp mit den jeweiligen Kostensätzen multiplizieren.

## 6 Umsetzung des Konzepts zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen in einem Excel-Tool

Um die Anwendbarkeit in der Praxis einfach und schnell zu ermöglichen wurde das Konzept in ein Microsoft Excel-Tool mit VBA-Makros umgesetzt. Dieses Tool ist in der PDF-Version des Berichts enthalten. Input sind die Szenarien und die Kostenberechnungen aus der Verkehrssimulation.

Das Tool ist keine fertige Softwarelösung, die in jedem Projekt uneingeschränkt eingesetzt werden kann. Bei dem Tool handelt sich um ein Expertenwerkzeug, welches die Grundfälle abdeckt. Es dient auch der Berechnung der in diesem Projekt bearbeiteten Beispiele.

Das Tool simuliert den Fall „mit Monitoring“ und den Fall „ohne Monitoring“ und berechnet die erwarteten Kosten beider Entscheidungsmöglichkeiten. Durch Vergleich dieser erwarteten Kosten kann eine Entscheidung für oder gegen den Einsatz eines konkreten Monitoringsystems getroffen werden.

Die erwarteten Kosten werden aufgeschlüsselt in direkte Kosten, indirekte Kosten und Risiko aus Versagen.

Die direkten Kosten sind u. a. die Kosten der geplanten Baumaßnahmen, die Kosten aus dem Betrieb und der Einrichtung des Monitoringsystems; d. h. die direkten Kosten fassen alle Geldbeträge zusammen, welche tatsächlich monetär zu bezahlen sind. Indirekte Kosten entstehen durch die mit den Baumaßnahmen verbundenen Verkehrsbeeinträchtigungen. Indirekte Kosten können als der durch diese Verkehrsbeeinträchtigungen entstehende volkswirtschaftliche Schaden aufgefasst werden. Das durch Versagen des Systems entstehende Risiko berechnet sich als die Wahrscheinlichkeit, dass das System versagen würde, multipliziert mit den Kosten im Fall eines Systemversagens. In die Kosten im Fall eines Systemversagens können auch indirekte Kosten (z. B. Vertrauensver-

lust in Behörden und die mit dem Versagen verbundenen Verkehrsbeeinträchtigungen) mit einbezogen werden.

In dem Tool werden einige Begriffe verwendet, die im Folgenden erläutert werden:

- Zeitschritt

Die Berechnung im Tool (Simulation) erfolgt in Zeitschritten. I. d. R. entspricht ein Zeitschritt einem Monat. Es können aber auch andere Zeitschritte gewählt werden. Es wird empfohlen den Zeitschritt bei einem Monat zu belassen. Die Änderung der Länge eines Zeitschrittes macht unter anderem Anpassungen am Indikatormodell erforderlich.

- Indikator

Der Begriff Indikator wird im Tool verwendet, um den Zustand des Bauwerks/Bauteils zu quantifizieren. Diese Größe ist nicht direkt an die Zustandsnote des Bauwerks/Bauteils gekoppelt. Der Grund hierfür ist, dass nicht immer von der Zustandsnote auf den Schaden und Schadensverlauf geschlossen werden kann. Diese Größe kann entweder stetig (mögliche Werte sind z. B. 1.2, 3.4, 5.6) oder diskret (mögliche Werte sind z. B. 1, 2, 3, 4) modelliert werden. Bei den Beispielen in diesem Forschungsbericht wird der Indikator als diskrete Größe modelliert. Die möglichen Werte des Indikators sind so zu wählen, dass basierend auf dem Indikator eine Einstufung in Schwellenwertgruppen möglich ist. Die Indikatoren entsprechen einer ordinalen Skala.

Falls der Indikator diskret modelliert wird, empfehlen wir die möglichen Indikatorwerte mit den ID-Nummern der Schwellenwertgruppen gleichzusetzen. Dies vereinfacht die Eingabe und die Interpretation.

- Indikatormodell

Das Indikatormodell ist ein probabilistisches Modell, welches die Entwicklung des Indikatorwertes von einem Zeitschritt zum nächsten beschreibt.

- Verkehrsbetriebsszenario

Instandsetzungen, Sanierungen oder der Neubau sind i. d. R. mit Verkehrseinschränkungen verbunden. Diese Einschränkungen sind in sogenannten Verkehrsbetriebsszenarien (VBS) zusammenzufassen. Für jedes definierte VBS werden:

- (i) die einmaligen Kosten (z. B. Einrichten der Baustellenbeschilderung),
- (ii) die direkten monatlichen Kosten (z. B. Wartung der Baustellenbeschilderung), sowie
- (iii) die indirekten monatlichen Kosten (z. B. der sich aus der Verkehrseinschränkung ergebende monatliche volkswirtschaftliche Schaden)

definiert.

- Maßnahmen

Hierunter sind alle zur Instandsetzung, Sanierung oder Neubau getroffenen Maßnahmen gemeint.

- Schwellenwertgruppen

Basierend auf dem Indikatorwert werden Schwellenwertgruppen gebildet. Bei einer Einstufung in diese Gruppen können ausgewählte Maßnahmen gestartet werden. Dies ist notwendig, um Sanierungskonzepte basierend auf Monitoringstrategien zu definieren.

- Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoringergebnis kritisch ist

Angenommen, das Monitoringergebnis wird als diskrete Größe beschrieben, welche nur zwei mögliche Zustände annehmen kann (d. h., das Monitoringergebnis ist binär). Dies bedeutet konkret, dass das Monitoring entweder einen unkritischen oder kritischen Zustand erkennt. Falls das Monitoringergebnis unkritisch ist, kann die bestehende Strategie weitergeführt werden. Mit kritisch ist gemeint, dass basierend auf dem Monitoringergebnis die bestehende Strategie aufgegeben werden muss, und eine Instandsetzung (Sperrung) oder ein Neubau eingeleitet werden sollte.

Das Ergebnis des Monitoringsystems in einem Zeitschritt kann dann durch eine Wahrscheinlichkeit abgebildet werden. Beispielsweise durch die Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoringergebnis im jeweiligen Zeitschritt als kritisch einzustufen ist.

- Expertenschätzung

Die Expertenschätzung ist relevant für den Fall, dass das Monitoringergebnis als binäre Größe abgebildet wird.

Ein unabhängiger Experte schätzt mit welcher Wahrscheinlichkeit das Monitoringergebnis kri-

tisch sein könnte (je Zeitschritt). Basierend auf der vom Experten geschätzter Wahrscheinlichkeit können die erwarteten Kosten für die Fälle mit und ohne Monitoring berechnet werden. Durch Vergleich der erwarteten Kosten beider Fälle kann eine Empfehlung für eine Entscheidung für oder gegen das Monitoringsystem ausgesprochen werden.

- **Grenzwahrscheinlichkeit**  
Die Grenzwahrscheinlichkeit ist relevant für den Fall, dass das Monitoringergebnis als binäre Größe abgebildet wird.  
Die Grenzwahrscheinlichkeit ist derjenige Wert der Wahrscheinlichkeit der Expertenschätzung, bei der die erwarteten Kosten der Fälle „mit Monitoring“ und „ohne Monitoring“ gleich sind.  
Falls die Expertenschätzung unter der Grenzwahrscheinlichkeit liegt, so ist es eine wirtschaftlich sinnvolle Entscheidung ein Monitoringsystem zu installieren.

In den folgenden Kapiteln werden die Registerkarten im Excel-Tool dargestellt und einen Überblick gegeben.

## 6.2 Beschreibung der Eingaben und Registerkarten im Excel-Tool

### 6.2.1 Registerkarten im Excel-Tool

Das entwickelte Excel-Tool ist in folgende Registerkarten unterteilt:

- **Allgemeines**  
Diese Registerkarte umfasst allgemeine Informationen des zu berechnenden Problems. Außerdem wird die eigentliche Berechnung auf dieser Registerkarte gestartet.
- **Ergebnisse**  
Hier werden die Ergebnisse der Berechnung in aufbereiteter Form numerisch und in Diagrammen dargestellt.
- **Schwellenwertgruppen**  
In dieser Registerkarte werden die Schwellenwertgruppen definiert und evtl. mit bestimmten Maßnahmen verknüpft. Die verknüpften Maßnahmen werden ausgeführt, wenn die jeweilige Schwellenwertgruppe aktiviert wird.

- **Maßnahmenkatalog**  
Alle Maßnahmen werden auf dieser Registerkarte definiert. Für jede Maßnahme wird u. a. eine Dauer festgelegt. Auch kann eine mögliche Planungsphase für jede Maßnahme definiert werden.
- **Verkehrsbetriebsszenario**  
Die Verkehrsbetriebsszenarien (VBS) werden mit den zugehörigen Kosten auf dieser Registerkarte gelistet.
- **Indikatormodell**  
Für die jeweilige Problemstellung können auf dieser Registerkarte ein oder mehrere Indikatormodelle definiert werden.
- **Parameter**  
Zufallsvariablen und fixe Parameter können auf dieser Registerkarte definiert werden. Mögliche Zellen, welche die Eingabe eines Parameters zulassen, sind im Excel-Tool farblich hervorgehoben.
- **Einstellungen**  
Allgemeine Einstellungen/Optionen, welche nicht direkt eine spezifische Problemstellung betreffen, werden auf dieser Registerkarte vorgenommen.
- **Daten-Log**  
Eine Hilfs-Registerkarte welche für das Zwischenspeichern der Simulationsergebnisse genutzt wird. Diese Registerkarte wird i. d. R. nicht benötigt. Die Registerkarte kann unter Umständen beim Debuggen einer Problemstellung hilfreich sein.

Die Eingabe einer Problemstellung erfolgt am besten, indem die einzelnen Registerkarten rückwärts durchlaufen werden: Also beginnend mit Einstellungen und abschließend mit Allgemeines. Aus diesem Grund sind die Registerkarten im Folgenden in der Reihenfolge beschrieben, in der das Projekt eingegeben wird.

### 6.2.2 Registerkarte „Einstellungen“

In der Registerkarte „Einstellungen“ werden Grundeinstellungen vorgenommen (Bild 42).

Wesentlich ist der Seed. Für den Seed im Zufalls-generator kann ein integer Wert eingegeben wer-

den, um reproduzierbare Ergebnisse zu generieren. Es wird empfohlen pro Projekt diesen festzulegen und zu dokumentieren.

Zufallsgeneratoren in Software erzeugen eine Zahlenfolge, die zufällig aussieht und Charakteristiken von Zufallswerten hat. Die Zahlenfolge ist jedoch deterministisch und basiert auf einem Algorithmus. Die Zahlenfolge wird von einem Startwert aus berechnet. Dieser Startwert wird als Seed bezeichnet. Bei gleichem Seed ist die generierte Zahlenfolge immer gleich und somit die Ergebnisse aus der Simulation identisch und reproduzierbar. Echte Zufallszahlen können nicht von Computern generiert werden, sind aber in Datenbanken im Internet verfügbar.

Die erweiterte Ausgabe wird i. d. R. nicht benötigt.

- **Erweiterte Ausgabe**

Bei einem Wert von 1: Es wird die Datei „BAST\_Moni.eout“ im Verzeichnis der Excel-Datei erstellt. In diese Datei wird der Simulationsverlauf der Berechnung geschrieben. Diese Ausgabe sollte nur für eine kleine Zahl an Simulationswiederholungen aktiviert werden:

- Die Größe der Datei „BAST\_Moni.eout“ steigt mit zunehmender Zahl an Simulationswiederholungen stark an.
- Die erweiterte Ausgabe verlangsamt die Durchführung der Berechnung erheblich.

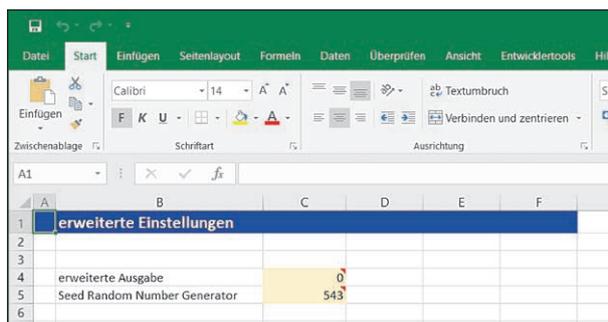


Bild 42: Darstellung der Registerkarte „Einstellungen“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]

Bei einem Wert von 0 wird die erweiterte Ausgabe deaktiviert (Standardeinstellung).

- **Seed Random Number Generator**

Falls das Feld leer bleibt, wird der Zufallszahlengenerator über die Systemzeit initialisiert. Falls ein Integer-Wert in dieses Feld eingetragen wird, wird der Zufallszahlengenerator mit diesem Wert initialisiert. In diesem Fall liefert die Simulation bei gleichbleibender Eingabe stets das gleiche Resultat.

### 6.2.3 Registerkarte „Parameter“

Auf dieser Registerkarte können Parameter/Zufallsvariablen definiert werden (Bild 43).

Die Eingabe eines Parameters/einer Zufallsvariablen umfasst folgende Spalten:

- **ID**

Der Name der jeweiligen Zufallsvariablen/des Parameters.

- **Bezeichnung**

Eine kurze Beschreibung des Parameters. Dies ist ein Kommentar ohne Funktionalität und dient der Verständlichkeit.

- **Verteilung**

Handelt es sich um einen Parameter, so muss hier „fix“ eingetragen werden. Bei einer Zufallsvariable können vordefinierte Verteilungstypen gewählt werden. Die vordefinierten Verteilungstypen sind auf der Registerkarte gelistet. Eine Auswahl anderer Verteilungstypen sind derzeit nicht möglich.

- **Mittelwert**

Der Mittelwert der jeweiligen Zufallsvariablen. Auch bei Wahl der Lognormalverteilung wird hier der tatsächliche Mittelwert (d. h. das erste Mo-

Bild 43: Darstellung der Registerkarte „Parameter“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]

ment) angegeben. Bei einem Parameter steht hier der Parameterwert.

- Standardabweichung
  - Die Standardabweichung der Zufallsvariable (d. h. das zweite zentrales Moment).
  - Bei einem Parameter sollte eine 0.00 eingetragen werden. Das Feld darf nicht leer bleiben. Eine Eingabe hat allerdings in diesem Fall keinen Einfluss.

#### 6.2.4 Registerkarte „Indikatormodell“

Auf dieser Registerkarte können Indikatormodelle definiert werden (siehe Bild 44).

Das Indikatormodell beschreibt probabilistisch, wie sich der Indikatorwert ausgehend von einem Zeitschritt zum nächsten entwickelt. Es muss mindestens ein Indikatormodell definiert sein. Die Eingabe umfasst folgende Spalten:

- ID  
Dieses Feld darf nicht verändert werden. Das erste Indikatormodell hat ID 1. Die Indikatormodelle werden über ihre ID referenziert.
- Bezeichnung  
Eine kurze Beschreibung des Indikatormodells, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten.
- Modell  
Die ID des Modelltyps. Erlaubte Modelltypen (A, B, C) sind auf der Registerkarte mit kurzer Beschreibung gelistet.
- Parameter  
Abhängig vom gewählten Modelltyp, werden hier die Parameter des Modells festgelegt.

In den in diesem Dokument behandelten Beispielen (siehe Kapitel 7 und 8) wurde Modelltyp ‚C‘ verwendet. Dieses Modell ist geeignet, falls die Betrachtung

der Indikatorwerte als ein binäres Problem dargestellt werden kann. Dieses binäre Modell erwartet drei Parameter:

- Parameter 1  
Wahrscheinlichkeit, dass sich der (binäre) Indikatorwert von einem Zeitschritt zum nächsten ändert. Also beispielsweise die Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoringergebnis im nächsten Zeitschritt als kritisch einzustufen ist.
- Parameter 2  
Anzusetzender Indikatorwert, falls sich der Wert des Indikators zum nächsten Zeitschritt ändern soll. Wird benötigt, um die zugehörige Schwellenwertgruppe zu identifizieren.
- Parameter 3  
Initiales VBS, wenn dieses Indikatormodell aktiviert wird. Ignoriert einen Wert von 0.

Falls sich die Fragestellung nicht als binäres Problem betrachten lässt, muss der Anwender in VBA ein benutzerdefiniertes Modell erzeugen, das die Indikatorentwicklung der Problemstellung wiedergibt.

#### 6.2.5 Registerkarte „Verkehrsbetriebsszenario“

In der Registerkarte „Verkehrsbetriebsszenario“ werden die für die Durchführung der Maßnahmen benötigten Verkehrsbetriebsszenarien (VBS) definiert (Bild 45).

Die Eingabe umfasst folgende Spalten:

- ID  
Dieses Feld darf nicht verändert werden. Das erste VBS hat ID 1. Die definierten Szenarien werden über ihre ID referenziert. Die ID für das VBS sind unabhängig von der ID für die Indikatormodelle, d. h. ID 1 im VBS ist nicht direkt mit ID 1 im Indikatormodell verbunden.

ID	Bezeichnung	Modelltyp	Parameter
1	Monitoring von T82 und T83	C	prmon 5,00 1,00
2	Monitoring von T82	C	prmon 4,00 2,00
3	kein Monitoring	C	0,00 20,00 0,00

erlaubte Modelltypen

Modell	Beschreibung
A	Test-Modell
B	diskretes Modell (4 Zustände)
C	binäres Modell (2 Zustände)

Bild 44: Darstellung der Registerkarte „Indikatormodell“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]

- **Bezeichnung**  
Enthält eine kurze Beschreibung für die Nachvollziehbarkeit in der Analyse.
  - **Einmalige Kosten**  
Einmalig anfallende direkte Kosten bei der Aktivierung des VBS. Diese sind z. B. das Einrichten der Baustellenbeschilderung.
  - **Laufende direkte Kosten**  
Direkte monatliche Kosten (z. B. Unterhalt der Baustellenbeschilderung).
  - **Laufende indirekte Kosten**  
Indirekte monatliche Kosten (z. B. der sich aus der Verkehrseinschränkung ergebende monatliche volkswirtschaftliche Schaden).
  - **Ausführliche Beschreibung**  
Enthält eine ausführliche Beschreibung für die Nachvollziehbarkeit in der Analyse.
- Beim Einplanen einer Maßnahme wird zwischen zwei Typen unterschieden:
- Maßnahmen mit fest vorgegebenem Starttermin und
  - Maßnahmen, welche flexibel und abhängig vom Monitoringresultat gestartet werden. Die Eingabe umfasst folgende Spalten:
- **ID**  
Dieses Feld darf nicht verändert werden. Die erste Maßnahme hat ID 1. Die definierten Maßnahmen werden über ihre ID referenziert. Die ID ist unabhängig von der ID des VBS und der ID des Indikatormodells.
  - **Bezeichnung**  
In diesem Feld kann der Anwender eine kurze Beschreibung angeben.
  - **Kosten**  
Die Kosten entsprechen den direkten Gesamtkosten der jeweiligen Maßnahme.
  - **Dauer**  
Dieses Feld enthält die Dauer (in Monaten), welche für die Durchführung der Maßnahme erforderlich ist. Eine möglicherweise erforderliche Planungsphase ist hierin nicht zu berücksichtigen, sondern wird separat erfasst.

### 6.2.6 Registerkarte „Maßnahmenkatalog“

Alle zur Instandsetzung, Sanierung oder Neubau erforderlichen Maßnahmen werden auf dieser Registerkarte definiert (siehe Bild 46).

ID	Bezeichnung	einmalige Kosten [€]	laufende Kosten [€/Monat]	ausführliche Beschreibung
		direkt	indirekt	
1	Szenario 1: LKW-Schließung TB2 und TB3	0.00E+00	2.00E+03	6.61E+05 Alle Spuren für PKW normal befahrbar; TB2 und TB3 für LKW gesperrt; direkte Kosten aus laufendem Monitoring: 2000€/Monat (Monitoringkosten sind zeitlich variabel)
2	Szenario 1: LKW-Schließung TB2 und TB3	0.00E+00	1.40E+03	6.61E+05 Alle Spuren für PKW normal befahrbar; TB2 und TB3 für LKW gesperrt; direkte Kosten aus laufendem Monitoring: 1400€/Monat (Monitoringkosten sind zeitlich variabel)
3	Szenario 3 & 4: Sperrung TB2 & TB3	0.00E+00	0.00E+00	4.28E+06 Vollsperrung von TB2 & TB3
4	Szenario 3: Neubau TB2, PKW auf TB3	0.00E+00	0.00E+00	1.68E+06 Vollsperrung von TB2; TB3 ist für PKW geöffnet
5	Szenario 5: Neubau TB3	0.00E+00	0.00E+00	1.83E+06 Vollsperrung von TB3; TB2 ist für LKW und PKW geöffnet
6	Szenario 6: Normalbetrieb	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00 Normaler Verkehrsbetrieb ohne Einschränkungen

Bild 45: Darstellung der Registerkarte „Verkehrsbetriebsszenario“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]

ID	Bezeichnung der Maßnahme	Kosten [€]	Dauer [Monate]	ID des VBS bei Ausführung	ID des VBS nach Abschluss	Indikator-Wert nach Abschluss	Indikatormodell nach Abschluss	ID Indikatormodell während Ausführung	ohne Monitoring Beginn von Start [Monate]	mit Monitoring Beginn von Start [Monate]	Verzögerung [Monate]	max. zulässige ID Schwelldauer Wiederholung	max. zulässige ID Schwelldauer Wiederholung	Ende Monitoring
1	Notinstandsetzung TB3	3.50E+06	12	2	2	2	2	2		42		4		
2	Neubau TB2	1.40E+07	24	4	5	1	3			78		4		2
3	Neubau TB3	1.40E+07	24	5	6	1	3			102		4		
4	gleichzeitiger Neubau TB2 & TB3	2.80E+07	24	3	6	1	3		24		24			1

Bild 46: Darstellung der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]

- ID des VBS bei Ausführung  
Die ID des VBS, welches während der Durchführung der Maßnahme aktiv ist.
- ID des VBS nach Abschluss  
Das nach Durchführung der Maßnahme zu aktivierende VBS. Dieses Feld ist vor allem für den Fall „ohne Monitoring“ relevant.  
Im Fall „mit Monitoring“ hat eine Eingabe in diesem Feld i. d. R. keinen Einfluss. Grund hierfür: Falls gerade keine Maßnahme läuft, wird im Fall „mit Monitoring“ das VBS i. d. R. flexibel über die Einstufung in die jeweiligen Schwellenwertgruppen definiert. Nach Beendigung einer Maßnahme ist das zu aktivierende VBS deshalb i. d. R. über die Schwellenwertgruppe definiert. Eine Eingabe in das aktuell beschriebene Feld wird in diesem Fall nur berücksichtigt, falls die gerade aktive Schwellenwertgruppe nicht explizit mit einem VBS verknüpft ist.
- Indikator-Wert nach Abschluss  
Eine Eingabe in diesem Feld legt fest, ob und wie der Indikatorwert nach Durchführung einer Maßnahme modifiziert wird. Falls das Feld leer bleibt, wird der aktuelle Indikatorwert nicht verändert. Bei einem positiven Wert wird der Indikator auf eben diesen Wert gesetzt. Bei Eingabe eines negativen Wertes wird der aktuelle Indikatorwert um den Betrag dieses Wertes reduziert.
- Indikatormodell nach Abschluss  
Die ID des nach Durchführung der Maßnahme zu aktivierenden Indikatormodells. Falls das Feld leer bleibt, wird das aktuell aktive Indikatormodell weitergeführt.
- ID Indikatormodell während der Ausführung  
Die ID des während der Durchführung der Maßnahme zu verwendenden Indikatormodells. Falls das Feld leer bleibt oder mit 0 belegt wird, wird das aktuell aktive Indikatormodell während der Durchführung der Maßnahme deaktiviert.

Für den Fall „ohne Monitoring“ ist noch folgende Spalte zu berücksichtigen:

- Beginn von Start  
Wie viele Monate nach Beginn der Betrachtung soll die Maßnahme gestartet werden? Hierbei ist unter anderem die Verzögerung der Durchführung der Maßnahme durch Planungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

Für die Betrachtung im Fall „mit Monitoring“ umfasst die Eingabe die folgenden zusätzlichen Spalten:

- Beginn von Start  
Falls das Feld leer bleibt, wird die Maßnahme im Fall „mit Monitoring“ nicht von Beginn an eingeplant. Die Maßnahme kann beispielsweise flexibel durch Verknüpfung mit einer Schwellenwertgruppe flexibel gestartet werden.  
Falls das Feld nicht leer bleibt, wird die Eingabe als die Anzahl an Monaten interpretiert, nach welchen die Maßnahme gestartet wird (von Beginn der Betrachtung an). Hierbei ist unter anderem die Verzögerung der Durchführung der Maßnahme durch Planungsmaßnahmen zu berücksichtigen.
- Verzögerung  
Auf der Registerkarte Schwellenwertgruppen können Schwellenwertgruppen mit Maßnahmen verknüpft werden, die beim Erreichen dieser Schwellenwertgruppe ausgeführt werden sollen. In diesem Feld wird festgelegt, wie viele Monate nach Erreichen der verknüpften Schwellenwertgruppe die Maßnahme begonnen werden soll. Dadurch kann eine durch Planung einer Maßnahme bedingte Verzögerung abgebildet werden. Falls das Feld leer bleibt und die Maßnahme mit einer Schwellenwertgruppe verknüpft wurde, wird die Maßnahme im Fall mit Monitoring sofort angewendet.
- Wiederholung möglich  
Dieses Feld legt fest, ob die Maßnahme wiederholt ausgeführt werden kann – oder nur ein einziges Mal. Falls das Feld leer bleibt oder mit 0 belegt wird, dann kann die Maßnahme nur einmal durchgeführt werden. Fall das Feld mit einer 1 besetzt wird, kann die Maßnahme wiederholt durchgeführt werden.
- Max. zulässige ID Schwellenwertgruppe bei Ausführung  
Die Maßnahme wird nur durchgeführt, falls während der Verzögerung oder unmittelbar vor Beginn der Maßnahme die ID der aktiven Schwellenwertgruppe nicht über der in diesem Feld angegebenen ID liegt. Falls das Feld leer bleibt, wird die Maßnahme unabhängig von der gerade aktiven Schwellenwertgruppe gestartet.  
Eine Eingabe in diesem Feld kann sinnvoll sein, falls Ersatzmaßnahmen bei großen Schäden in-

itiert werden – welche die betreffende Maßnahme überflüssig machen würden.

- Ende Monitoring

Dieses Feld legt fest, ob und wann das Monitoring beendet werden soll. (i) Bei keiner Eingabe oder einem Wert von 0 wird das Monitoring weitergeführt. (ii) Bei einem Wert von 1 wird das Monitoring mit Aktivierung (also dem Einplanen) der Maßnahme deaktiviert. (iii) Bei einem Wert von 2 wird das Monitoring mit dem eigentlichen Start der Maßnahme deaktiviert. (iv) Bei einem Wert von 3 wird das Monitoring nach dem Beenden der Maßnahme deaktiviert.

Falls das Monitoring beendet wird, wird das Indikatormodell nicht mehr verwendet, um die Einstufung in die Schwellenwertgruppe zu aktualisieren. Weiterhin fallen keine laufenden Kosten aus dem Betrieb von Monitoring mehr an.

## 6.2.7 Registerkarte „Schwellenwertgruppe“

Auf dieser Registerkarte wird festgelegt, wie Indikatorwerte den Schwellenwertgruppen zugeordnet sind (Bild 47). Die Einstufung von Indikatorwerten in Schwellenwertgruppen muss für steigende Indikatorwerte vorgenommen werden. Die auf dieser Registerkarte vorgenommene Zuordnung wird vorwiegend für den Fall „mit Monitoring“ verwendet, um Maßnahmen flexibel – basierend auf dem Monitoringresultat – zu starten. Darüber hinaus wird die Zuordnung im Fall „mit Monitoring“ als auch im Fall „ohne Monitoring“ dazu verwendet das Risiko aus Versagen der Brücke abzuschätzen.

Die durch (ein mögliches) Versagen der Brücke entstehenden Kosten werden rechts oben auf der Registerkarte angegeben. Die in diesem Feld eingetragenen Kosten schließen auch indirekte Kosten mit ein (z. B. den monetarisierten und durch das Versagen bestimmten Vertrauensverlust in Behörden).

Die Eingabe auf dieser Registerkarte umfasst darüber hinaus folgende Spalten:

- ID

Dieses Feld darf nicht verändert werden. Die erste Schwellenwertgruppe hat ID 1. Die definierten Schwellenwertgruppen werden über ihre ID referenziert.

- Bezeichnung

In diesem Feld kann eine kurze Beschreibung abgegeben werden.

- Indikatorwert

Die jeweilige Schwellenwertgruppe wird aktiv, sobald der Indikatorwert den in diesem Feld angegebenen Wert erreicht oder übersteigt. Der Wert dieses Feldes muss in jeder Zeile größer als der Wert der letzten Zeile sein.

Das Feld der Schwellenwertgruppe mit der ID 1 muss leer bleiben, da alle Indikatorwerte kleiner als der für ID 2 angegebene Schwellenwert automatisch der Schwellenwertgruppe 1 zugeordnet werden.

Falls das Monitoring Ergebnis binär ist, also entweder positiv oder negativ, so bietet es sich i. d. R. an mit drei Schwellenwertgruppen zu arbeiten: (1) es besteht kein Problem bzw. es liegt kein Handlungsbedarf vor, (2) eine Instandhaltung, ein Monitoring, oder ein Neubau ist erforderlich, (3) das Monitoring hat ein negatives Ergebnis geliefert. Es ist akuter Handlungsbedarf notwendig (z. B. ein Neubau oder eine Sperrung). In diesem Fall sind folgende Grenzwerte für den Indikator vorgeschlagen: 2 für ID 2, und 3 für ID 3. Somit ergibt ein Indikatorwert von 1 eine Einstufung in die Schwellenwertgruppe 1, und so weiter.

ID	Bezeichnung (Zustand)	Indikatorwert	PF	VBS ID	Maßnahme 1 ID	Maßnahme 2 ID	Durch Versagen der Brücke entstehende Kosten:
1	kein Problem / kein Handlungsbedarf -> mindestens 1 Teilbauer ist neu			0			1.00E+09 €
2	TB2 ist in einem problematischen Zustand   TB3 wurde Not-Instandgesetzt	2	1.00E-05	0			
3	TB2 und TB3 sind in einem problematischem Zustand	3	1.50E-05	0			
4	Monitoringergebnis 'negativ' nach Verstärkung von TB3	4		4			
5	Monitoringergebnis 'negativ' vor Verstärkung von TB3	5		3	4		

Bild 47: Darstellung der Registerkarte „Schwellenwertgruppe“ im Excel-Tool [eigene Darstellung].

- Pf**

In diesem Feld steht die geschätzte jährliche Versagenswahrscheinlichkeit des Bauteils, falls die jeweilige Schwellenwertgruppe aktiv ist. Dieses Feld muss nur ausgefüllt werden, falls die durch Versagen entstehenden Kosten berücksichtigt werden sollen. Auch falls durch die gewählte Sanierungsstrategie (mit und ohne Monitoring) Versagen praktisch ausgeschlossen werden kann, ist es nicht erforderlich diese Spalte auszufüllen.
- VBS ID**

Das im Fall „mit Monitoring“ mit dieser Schwellenwertgruppe verknüpfte VBS. Ein Wert von 0 bedeutet, dass die Schwellenwertgruppe nicht direkt mit einem VBS gekoppelt ist. In diesem Fall sollte das nach Durchführung einer Maßnahme zu aktivierende VBS explizit auf der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ angegeben werden.
- ID der Maßnahme 1**

ID der Maßnahme, welche bei Aktivierung dieser Schwellenwertgruppe im Fall „mit Monitoring“ eingeplant werden soll.
- ID der Maßnahme 2**

Für die Verknüpfung mit einer weiteren Maßnahme – siehe Beschreibung des vorherigen Feldes.

**6.2.8 Registerkarte „Allgemeines“**

Auf dieser Registerkarte wird die Simulation der Problemstellung gestartet (Bild 48). Des Weiteren können allgemeine Eingaben vorgenommen werden.

Die Felder mit Eingabemöglichkeit sind:

- Diskontierungsrate**

Die während der zeitlichen Simulation anzusetzende Diskontierungsrate (Zinssatz).
- Monitoring: Installationskosten**

Die einmalig für die Installation des Monitoringsystems anfallenden Installationskosten.
- Monitoring: Betriebskosten**

Die monatlich durch den Betrieb des Monitoringsystems anfallenden Kosten.

Falls das Monitoringsystem während dem Betrachtungszeitraum nicht von Anfang an und nicht durchgehend betrieben wird, sollten die Kosten hier mit 0 € angesetzt werden. Die laufenden Kosten eines zeitlich begrenzten Monitorings werden in diesem Fall über ein entsprechendes Verkehrsbetriebsszenario angesetzt.

- Initialer Indikatorwert für t = 0**

Anfänglicher Wert des Indikators.
- ID des initialen Indikatormodell**

ID des initialen Indikatormodells – vorrangig für den Fall „ohne Monitoring“. Für den Fall „mit Monitoring“ ergibt sich das Indikatormodell i. d. R. aus der Einstufung in eine Schwellenwertgruppe.
- ID des initialen VBS ohne Monitoring**

ID des initial anzusetzenden VBS für den Fall „ohne Monitoring“.
- ID des initialen VBS mit Monitoring**

Ein Eintrag in diesem Feld wird im Fall „mit Monitoring“ nur berücksichtigt, falls das initiale VBS

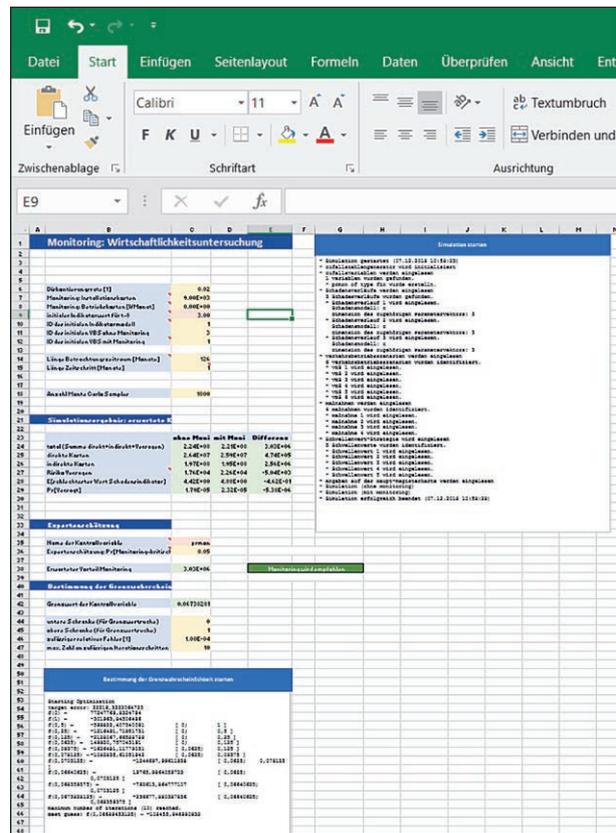


Bild 48: Darstellung der Registerkarte „Allgemeines“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]

nicht von der initialen Schwellenwertgruppe abhängt. Die Verkehrsbetriebsszenarien werden auf der Registerkarte Schwellenwertgruppen i. d. R. mit einer Schwellenwertgruppe verknüpft.

- **Länge Betrachtungszeitraum**  
Hier wird die Länge des abzudeckenden Simulationszeitraums eingetragen.  
Falls ein Neubau zu einem fixen Zeitpunkt geplant ist (sowohl für „mit Monitoring“ als auch für „ohne Monitoring“), dann sollte hier die Zeit bis zum Beginn des Neubaus eingetragen werden. Die Kosten für den Neubau brauchen in diesem Fall nicht berücksichtigt zu werden, da diese sowohl „mit Monitoring“ als auch „ohne Monitoring“ anfallen.
- **Länge Zeitschritt**  
Hier steht die Länge eines Simulationszeitschrittes. I. d. R. entspricht ein Zeitschritt wie zuvor beschrieben einem Monat. Es können aber auch andere Zeitschritte gewählt werden. Es wird empfohlen den Zeitschritt bei einem Monat zu belassen. Die Änderung der Länge eines Zeitschrittes macht unter anderem Anpassungen am Indikatormodell erforderlich.
- **Anzahl Monte-Carlo-Samples**  
Die Erwartungswerte der Kosten werden mittels Monte-Carlo-Simulation abgeschätzt. Je größer die Anzahl der Realisierungen, umso kleiner ist die mit der Schätzung einhergehende statistische Unsicherheit. Allerdings geht eine größere Anzahl an Realisierungen mit einem steigenden Rechenaufwand einher. Ein Wert von 1.000 Simulationen sollte i. d. R. ausreichend sein, um die Kosten hinreichend genau abschätzen zu können.

Die Simulation wird auf der Registerkarte „Allgemeines“ durch einen Klick auf die Schaltfläche ‚Simulation starten‘ (oben in der Mitte der Registerkarte) gestartet.

Die folgende Beschreibung der Registerkarte „Allgemeines“ gilt, falls das Monitoringresultat binär ist, also nur zwei Zustände annehmen kann (wie beispielsweise unkritisch und kritisch). Die Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoringresultat (je Zeitschritt) kritisch ist, wird in diesem Fall als Modellparameter aufgefasst. Wird diese Wahrscheinlichkeit nun von einem Experten geschätzt, kann durch Vergleich der Kosten der Fälle mit und ohne Monitoring

eine Empfehlung für oder gegen die Installation des Monitoringsystems ausgesprochen werden. Hierfür ist die Eingabe im folgenden Feld notwendig:

- **Name der Kontrollvariablen**  
Auf der Registerkarte „Parameter“ muss die Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoringsystem ein kritisches Ergebnis liefert, als Parameter vom Typ „fix“ definiert werden. Dieser Parameter muss in die Definition des Indikatormodells auf der Registerkarte „Indikatormodell“ eingehen.  
Der Name dieses Parameters wird in dieses Feld eingetragen. Bei dem hierbei angegebenen Parameter handelt es sich um die Variable, deren Wert vom Experten geschätzt wird, und welche während der Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit verändert wird.
- **Expertenschätzung: Pr [Monitoring = kritisch]**  
Die Wahrscheinlichkeit, von einem unabhängigen Experten geschätzt, dass das zu installierende Monitoringsystem in einem Zeitschritt ein als kritisch einzustufendes Ergebnis liefert.

Unter Umständen kann es interessant sein die sogenannte Grenzwahrscheinlichkeit zu bestimmen. Dies ist die Wahrscheinlichkeit eines kritischen Monitoringresultates, für welche die erwarteten Kosten im Fall mit Monitoring gleich den erwarteten Kosten im Fall ohne Monitoring sind. Die Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit wird durch folgende Feldeingaben gesteuert:

- **Untere Schranke (für Grenzwertsuche)**  
Die untere Schranke des Parameterbereichs der Kontrollvariablen, in dem die Grenzwertsuche durchgeführt werden soll.
- **Obere Schranke (für Grenzwertsuche)**  
Die obere Schranke des Parameterbereichs der Kontrollvariablen, in dem die Grenzwertsuche durchgeführt werden soll.
- **Zulässiger relativer Fehler**  
Der relative Fehler ist auf die gemittelten Kosten aus den Fällen „mit Monitoring“ und „ohne Monitoring“ bezogen. Falls die relative absolute Differenz aus den Kosten beider Fälle unter dem hier angegebenen Wert liegt, wird die Grenzwertsuche beendet.

- Max. Zahl an zulässigen Iterationsschritten  
Weiterhin wird die Grenzwertsuche beendet, falls die Anzahl der durchgeführten Iterationsschritte die in diesem Feld angegebene Zahl übersteigt.

Das Ergebnis der Suche nach der Grenzwahrscheinlichkeit wird im Feld „Grenzwert der Kontrollvariablen“ ausgegeben. Zu beachten ist, dass durch die Optimierung numerisch i. d. R. keine exakte Übereinstimmung der Kosten aus den Fällen „mit Monitoring“ und „ohne Monitoring“ erreicht werden kann. Grund hierfür ist, dass die geschätzten Kosten mittels einer Monte Carlo Simulation bestimmt werden. Selbst mit vorgegebenem Seed-Value ist die Funktion der Kosten in Abhängigkeit von der angegebenen Kontrollvariablen nicht stetig. Im Fall

der Optimierung sollte der Seed-Value auf der Registerkarte „Einstellungen“ gesetzt werden.

### 6.2.9 Registerkarte „Ergebnisse“

Eine erste Übersicht der Ergebnisse wird bereits auf der Registerkarte „Allgemeines“ geben. Die Registerkarte „Ergebnisse“ enthält weitere nützliche Informationen und Abbildungen (siehe Bild 49).

Unter der Überschrift „geschätzte Erwartungswerte“ werden die Erwartungswerte mit und ohne Monitoring angegeben.

Die Erwartungswerte für „totale Kosten“, „direkte Kosten“, „indirekte Kosten“ und „Risiko Versagen“ sind in Euro angegeben.

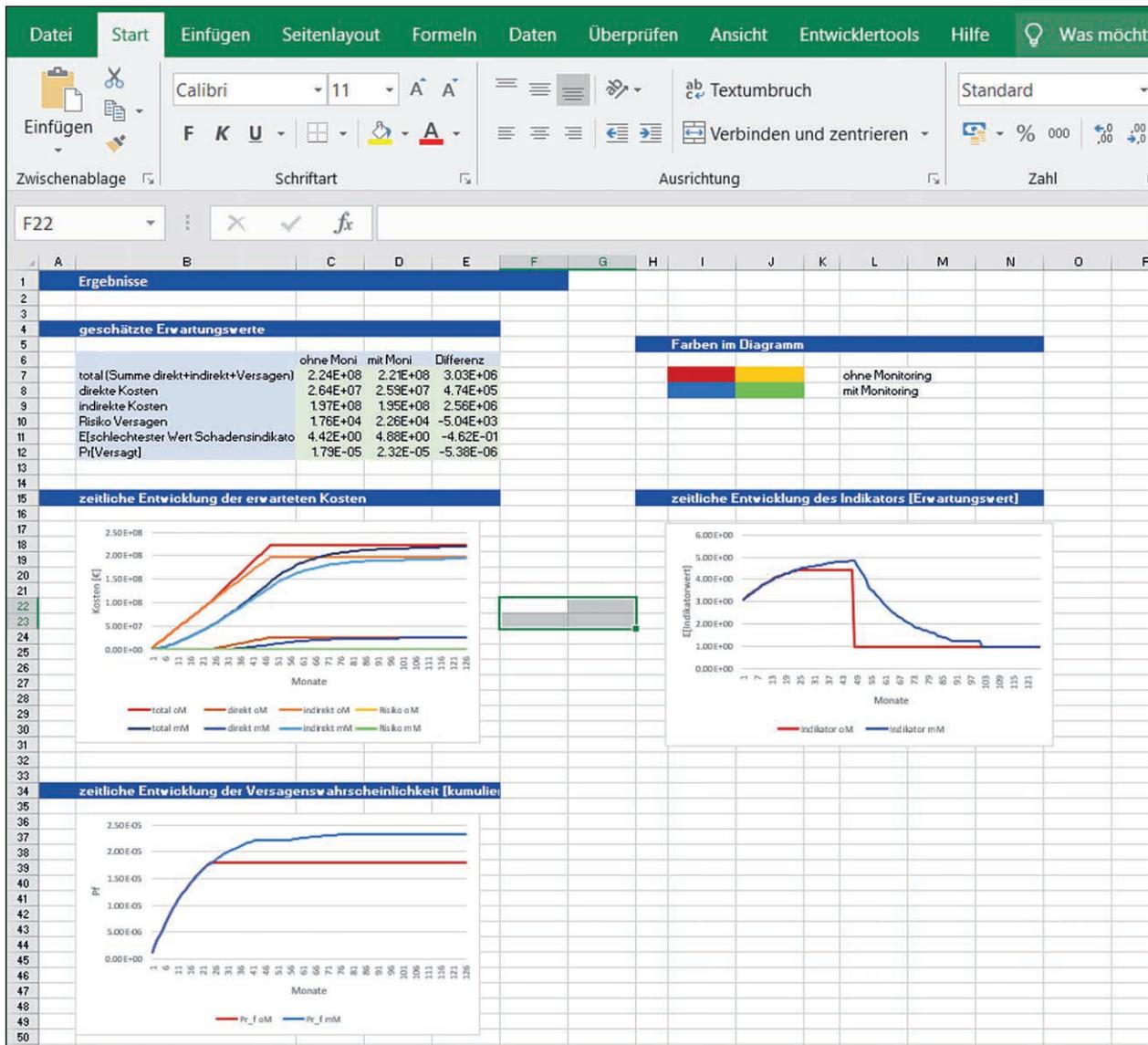


Bild 49: Darstellung der Registerkarte „Ergebnisse“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]

„Risiko Versagen“ gibt die durch Versagen des Bauwerks erwarteten Kosten an. Diese Kosten berechnen sich aus dem auf der Registerkarte „Schwellenwertgruppen“ angegebenen Wahrscheinlichkeiten in der Spalte „Pf“, multipliziert mit dem im Feld „Durch Versagen der Brücke entstehende Kosten“ angegebenen Wert.

„E[schlechtester Wert Schadensindikator]“ ist der Erwartungswert des während einer Simulation beobachteten kleinsten Indikatorwertes. Diese Größe ist vor allem für Problemstellungen hilfreich, in denen der Indikator nicht diskret, sondern kontinuierlich modelliert ist.

„Pr[Versagt]“ drückt die Wahrscheinlichkeit aus, dass die Brücke innerhalb des auf der Registerkarte „Allgemeines“ definierten Betrachtungszeitraum versagt.

Zusätzlich ist der zeitliche Verlauf der erwarteten Kosten, die zeitliche Entwicklung der Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks und die zeitliche Entwicklung des Indikators grafisch dargestellt.

### 6.3 Berechnung der Erwartungswerte der Kosten im Excel-Tool

Basierend auf den beschriebenen probabilistischen Modellen in den Fällen „mit Monitoring“ und „ohne Monitoring“ sind die Erwartungswerte der Kosten zu berechnen. Dazu wird eine Monte Carlo Simulation eingesetzt. Monte Carlo ist ein numerisches Simulationsverfahren, bei der eine relativ große Anzahl unterschiedlicher Realisationen der Schadensentwicklung simuliert werden [7]. Eine Realisation ist eine mögliche zukünftige Entwicklung des Zustands. Die einzelnen Realisationen werden hierbei so generiert, dass jede Realisation gleich wahrscheinlich ist. Mit der Monte Carlo Simulation werden die gesuchten Erwartungswerte im Mittel korrekt geschätzt, die Schätzwerte sind jedoch mit einer statistischen Unsicherheit behaftet. Je größer die Anzahl der erzeugten Realisationen, umso kleiner ist die statistische Unsicherheit der geschätzten Erwartungswerte; d. h., umso näher liegen die Schätzwerte an den tatsächlichen Werten.

Für jede Realisation wird die Entwicklung des Bauteils und des Brückenbauwerks von  $t = 0$  bis  $t = T$  schrittweise simuliert. In jedem Zeitschritt  $\tau$  werden folgende Berechnungsschritte durchgeführt:

- Basierend auf dem aktiven Indikatormodell wird die gültige Schwellenwertgruppe probabilistisch bestimmt.
- Im Fall „mit Monitoring“ wird daraufhin geprüft, ob neue Maßnahmen ausgehend von der aktuellen Einstufung in die Schwellenwertgruppe zu starten sind.
- Es wird geprüft, ob zeitlich fest eingeplante Maßnahmen zu starten und/oder zu beenden sind.
- Falls gerade eine Maßnahme läuft, werden die auf die Dauer des Zeitschritts anfallenden Kosten berücksichtigt. Die Kosten einer Maßnahme stellen direkte Kosten dar, und werden hierbei als gleichmäßig über die Bauzeit verteilt angenommen.
- Ausgehend von der aktuellen Einstufung in die Schwellenwertgruppe, wird das Versagensrisiko im aktuellen Zeitschritt ermittelt – und den Kosten aus Versagen aufgeschlagen. Alle anderen Kosten sind folglich bedingt auf „nicht Versagen bis zum aktuellen Zeitschritt“ und gehen auch als solche in die Berechnung ein.
- Die durch das Verkehrsbetriebsszenario anfallenden Kosten werden für die Dauer des Zeitschritts berücksichtigt.
- Im Fall „mit Monitoring“ werden die für die Dauer des Zeitschritts anfallenden Betriebskosten berücksichtigt.

Um ein effizientes Speichermanagement zu gewährleisten, werden die einzelnen Realisationen nicht für jeden Zeitschritt gespeichert – sondern nur deren Erwartungswerte.

### 6.4 Systemvoraussetzungen

Das Microsoft Excel-Tool ist Bestandteil dieses Projektes. Zur Anwendung gibt es die folgenden Systemvoraussetzungen:

- Betriebssystem: Microsoft Windows 7 oder Microsoft Windows 10.
- Programm: Microsoft Excel 2016, Voraussetzung: VBA Makros zulassen, Softwaretool ist nicht signiert.
- RAM: 4GB.
- Spracheinstellungen: Deutsch.

## 7 Anwendungsbeispiel Schwelmetalbrücke

Das Konzept aus Kapitel 4 wird in ein praxisnahes Verfahren umgesetzt und auf zwei Beispiele angewendet. Als Beispiele dienen die Schwelmetalbrücke und eine Autobahnbrücke in Duisburg-Beeck (siehe Kapitel 8).

Die Beispiele unterscheiden sich in Bezug auf die Schädigungsmechanismen. An der Schwelmetalbrücke ist der Hohlkastenquerschnitt gerissen und kann die von der Norm geforderte Last nicht mehr vollständig aufnehmen. Bei der Autobahnbrücke in Duisburg-Beeck besteht die so genannte Koppelfugenproblematik, bei der es in den Arbeitsfugen zu Spannungsspitzen und Rissen kommen kann.

Bei beiden Beispielen wurden bereits die Entscheidungen getroffen und es liegen Informationen vor, die zum Zeitpunkt der Entscheidung nicht vorlagen. Die Beispiele sind so dargestellt, dass sie sich auf den Zeitpunkt der Entscheidung beziehen, d. h. das Ergebnis des Monitorings ist nicht bekannt und Informationen über den Erfolg der angewendeten Strategie kann im Beispiel nicht berücksichtigt werden. Es werden zur Berechnung jedoch die tatsächlichen Zeitpläne zur Umsetzung der Maßnahmen verwendet und nicht die ursprünglich Vorgesehenen, die nicht vollständig bekannt sind. Das kann dazu führen, dass die hier gezeigten Ergebnisse ungünstig für das Monitoring ausfallen, da Verzögerungen im Zeitplan vermutlich auch auf positive Monitoringergebnisse zurückzuführen sind.

Die Schwelmetalbrücke (oder Schwelmebrücke) befindet sich auf der Autobahn A 1 im Bereich der Anschlussstelle (AS) Wuppertal-Langerfeld bei der Ausfahrt 93 (Bauwerksnummer 4709700, geogra-

fische Informationen können unter [186] abgerufen werden). Die Brücke wurde 1960 als Spannbetonbrücke mit Balken-/Plattenmischsystem gebaut. Die Brücke führt über die Bundesstraße B 7, eine Gemeindestraße (Dieselstraße), fünf elektrifizierte Gleisanlagen der Deutschen Bahn und über einen Fluss, die Schwelme. Ursprünglich bestand die Schwelmebrücke aus 2 parallel nebeneinanderliegenden getrennten Überbauten, die Teilbauwerke 2 und 3 (TB 2 und TB 3). Jedes Teilbauwerk hat eine Breite von 15,45 m und die Brücke eine Gesamtlänge von 207,5 m. Die Brücke ist als drei Feld-Träger ausgebildet. Die Stützweiten der Randfelder betragen 60 m und die des Feldes in der Mitte 87 m [187].

In Bild 50 ist der Querschnitt des Teilbauwerks 3 mit den Hohlkästen 1 und 2 dargestellt.

Im Jahr 2006 wurde die Brücke mit zwei außen liegenden Stahlverbundbrücken erweitert, in Fahrtrichtung (FR) Dortmund mit Teilbauwerke 1 und in FR Köln mit Teilbauwerk 4. Eine Aufsicht auf die erweiterte Schwelmebrücke ist in Bild 85 dargestellt. Bild 51 zeigt die Unterseite der Schwelmetalbrücke mit den 6 Hohlkästen.



Bild 51: Unterseite der Schwelmetalbrücke [187], Foto von Annette Jarosch, BBV, 2015

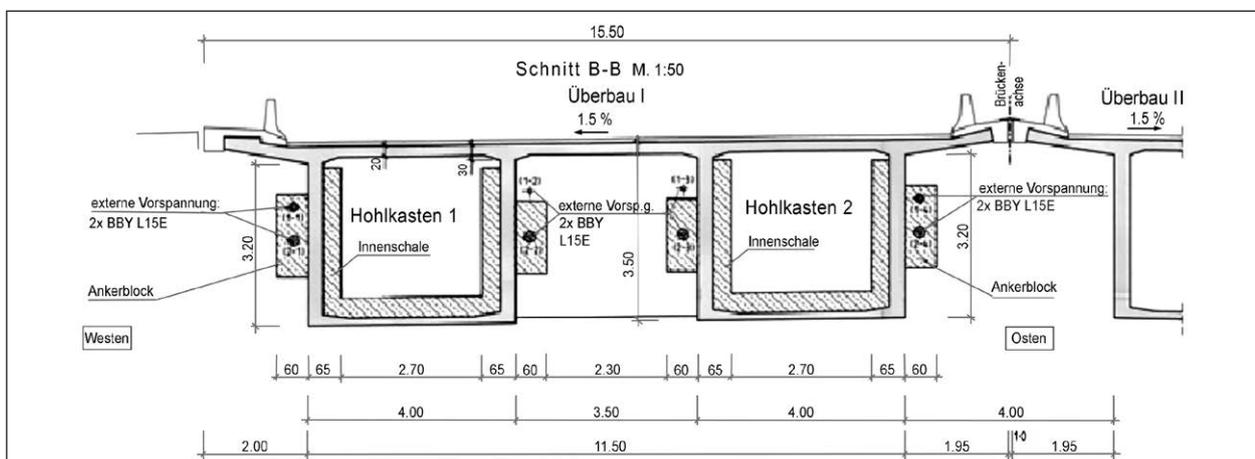


Bild 50: Querschnitt des Teilbauwerks 3 in Fahrtrichtung Köln. Zeichnung von Ing. Gesellschaft Thomas und Bökamp [187]

## 7.1 Schädigungen und Abweichungen von der Norm

Vor 2013 wurden an der Schwelmetalbrücke ausgeprägte Rissbildung in den Stegen und der Bodenplatte der Hohlkästen beobachtet. Es wurden Schrägrisse in den Stegen im Stütz- und Widerlagerbereich beobachtet mit einer Rissbreite bis zu 0,75 mm und halbrunde Risse in der Bodenplatte in den Mittelfeldern mit Rissbreiten bis 0,9 mm.

Gründe hierfür sind, dass die Überlappung der Spannglieder sehr gering ist und eine Rückhängebewehrung bzw. erhöhte Schubbewehrung in den Stegen fehlt [187]. Dies führt zu starker lokaler Schubbeanspruchung der Stege [187].

Eine Nachrechnung des Bauwerks von Thomas & Bökamp ergab:

- Deutliche Defizite der vorhandenen Schubbewehrung der Spannbeton-Teilbauwerke 2 und 3.
- Der Nachweis der Hauptzugspannungen nach DIN 4227 (1988) im Bruchzustand hat gezeigt, dass die vorhandene Bewehrung auf Basis des Normenstandes vor Einführung der DIN-Fachberichte im Jahr 2003 nicht ausreicht (Stufe 2 der Nachrechnung entsprechend).

## 7.2 Entscheidungssituation

Aus der Nachrechnung von Thomas & Bökamp und den vorhandenen Rissen musste eine Entscheidung getroffen werden, wie die Brücke sicher zu betreiben ist, bis der alternativlose Neubau der Brücke

realisiert wird. Die Möglichkeit einer dauerhaften Instandsetzung ist nicht effizient möglich.

Die generelle Entscheidungssituation ist in Bild 52 dargestellt. Es kann eine Entscheidung getroffen werden zwischen:

- einer Vollsperrung der Teilbauwerke 2 und 3 ohne Verstärkung bis zum Ersatzneubau oder
- einer Verstärkung der Teilbauwerke 2 und 3 mit Monitoring.

Die beiden Entscheidungssituationen und die Konsequenzen für den Verkehr sind im Folgenden zusammengestellt.

### 7.2.1 Entscheidungssituation – kein Monitoring, Sperrung der Teilbauwerke 2 und 3 für den Verkehr

Nach der Zustandserfassung könnte als Sofortmaßnahme entschieden werden, dass nicht in Verstärkung und Monitoring investiert wird. Damit würde bis zum Ersatzneubau von Teilbauwerk 2 und 3 der Verkehr einspurig nur über die Teilbauwerke 1 und 4 geführt werden. Dies führt zu einer erheblichen Kapazitätseinschränkung auf der Brücke, bis der Neubau von Teilbauwerk 2 realisiert ist. Es wird angenommen, dass die Planung bis zum Neubau 24 Monate beträgt. Der Bau erfolgt für beide Teilbauwerke gleichzeitig und benötigt ebenfalls 24 Monate [194]. Der Zeitplan für diese Maßnahme ist in Tabelle 24 gezeigt.

Das Verkehrsszenario für die Zeit bis zum Neubau ist in Bild 53 dargestellt.

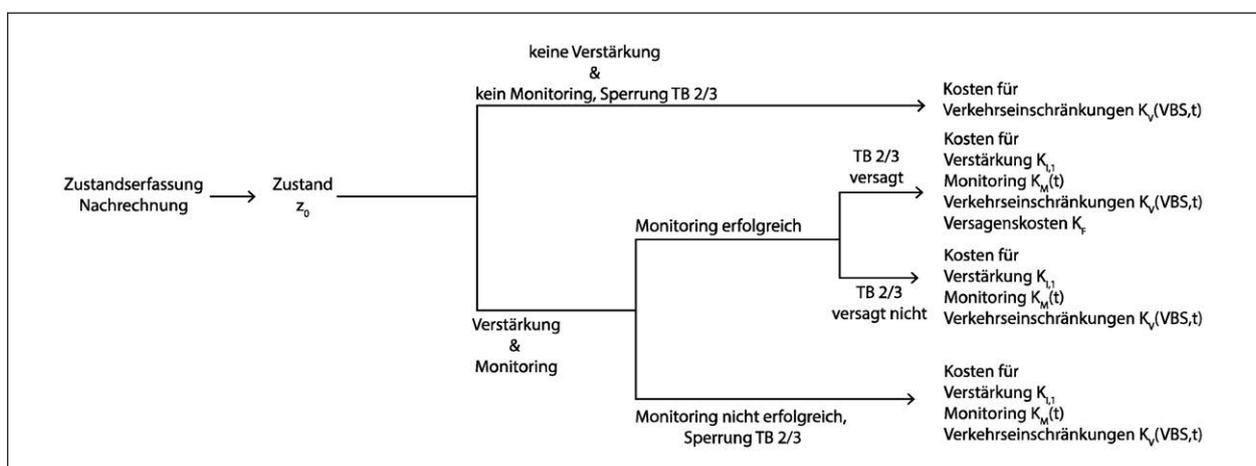


Bild 52: Schematische Modelldarstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten im Fall eines Neubaus und für den Fall einer Verstärkung mit Monitoring der Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

Nach Fertigstellung des Teilbauwerks 2 kann der Verkehr in einer 4+0 Verkehrsführung über das Teilbauwerk 2 geführt werden. Das zugehörige Verkehrsszenario ist in Bild 54 dargestellt.

Nach Übergabe der beiden neuen Teilbauwerke an den Verkehr, wird der Verkehr uneingeschränkt über die 4 Teilbauwerke geführt. Dieses Verkehrsszenario ist in Bild 55 dargestellt.

Gemäß Straßen.NRW wird die Schwelmetalbrücke in Zukunft nur über zwei Fahrspuren statt über drei Fahrspuren geführt. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit des Beispiels wird dieser zukünftige Wechsel der Verkehrsführung nicht berücksichtigt. An den Ergebnissen ändert dies jedoch nichts, da die Kapazität gleichbleibt.

Die zeitliche Zuordnung der Verkehrsszenarien ist im Zeitplan gegeben (siehe Tabelle 24).

	2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024																							
	Semester																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Neubau TB 2																								
Neubau TB 3																								
Verkehr	Sperrung TB 2 & 3								Normalbetrieb															
Szenario	Szenario 2								Szenario 6															

Tab. 24: Zeitplan für einen Ersatzneubau, wenn die Teilbauwerke 2 und 3 gesperrt werden müssten [eigene Darstellung]

	FR	km/h	Verkehr	Teilbauwerk
FR Dortmund	→	60	Pkw + Lkw	1
	○		-----	2
	○		-----	3
	○		-----	3
	○		-----	3
FR Köln	←	60	Pkw + Lkw	4

Bild 53: Verkehrsszenario 2, wenn die Teilbauwerke 2 und 3 für den Verkehr gesperrt bleiben [eigene Darstellung]

	FR	km/h	Verkehr	Teilbauwerk
FR Dortmund	→	60	Pkw + Lkw	1
FR Dortmund	→	60	Pkw + Lkw	2
FR Dortmund	→	60	Pkw + Lkw	2
FR Köln	←	60	Pkw + Lkw	2
FR Köln	←	60	Pkw + Lkw	2
	○		-----	3
	○		-----	3
FR Köln	←	60	Pkw + Lkw	4

Bild 54: Verkehrsszenario 5, 4+0 Verkehr über Teilbauwerk 2 [eigene Darstellung]

	FR	km/h	Verkehr	Teilbauwerk
FR Dortmund	→	80	Pkw + Lkw	1
FR Dortmund	→	100	Pkw + Lkw	2
FR Dortmund	→	100	Pkw + Lkw	2
FR Köln	←	100	Pkw + Lkw	3
FR Köln	←	100	Pkw + Lkw	3
FR Köln	←	80	Pkw + Lkw	4

Bild 55: Verkehrsszenario 6 nach Neubau von Teilbauwerk 2 und 3 [eigene Darstellung].

### 7.2.2 Entscheidungssituation – Verstärkung und Monitoring

In dieser Entscheidungssituation wird als Sofort- und Kompensationsmaßnahme eine Verkehrsbeschränkung für die Teilbauwerke 2 und 3 erlassen. Die Teilbauwerke 2 und 3 für Fahrzeuge über 3,5 t gesperrt und die Geschwindigkeit wird auf 60 km/h beschränkt. Zusätzlich wird ein Rissmonitoring in Teilbauwerk 2 und Teilbauwerk 3 zur Überwachung installiert. In diesem Fall ist es notwendig das Teilbauwerk 3 instandzusetzen, um eine 4+0 Verkehrsführung in der Neubauphase zu ermöglichen. In [187] ist erklärt, dass eine Ertüchtigung der Brücke, die zukünftig auch Lkw-Verkehr aufnehmen kann, nicht möglich ist, da die Querschnitte der Brücke zu filigran sind und eine externe Vorspannung durch die hohen Beanspruchungen durch die konzentrierte

Lasteinleitung im Verankerungsbereich nicht möglich ist. Ein Neubau ist daher alternativlos, durch das Monitoring kann der Neubau zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen und die Teilbauwerke können weiter genutzt werden.

Der Zeitplan für diesen Fall ist in Tabelle 25 gezeigt.

Zeigt das Monitoring einen unkritischen Zustand, so wird der Verkehr wie in Bild 56 dargestellt bis zum Neubau geführt.

Nach der Notinstandsetzung von Teilbauwerk 3 kann der Verkehr während des Neubaus über das Teilbauwerk 3 in einer 4+0 Verkehrsführung geleitet werden. Dabei ist das Teilbauwerk 3 für den Verkehr > 3,5 t weiterhin gesperrt (siehe Bild 57).

	Semester																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Notinstandsetzung TB 3																								
Neubau TB 2																								
Neubau TB 3																								
Monitoring TB 2																								
Monitoring TB 3																								
Verkehr	PKW über TB 2 & 3											4+0 über TB 3					4+0 über TB 2							
Szenario	Szenario 1											Szenario 3					Szenario 5				Szenario 6			

Tab. 25: Zeitplan für den Fall, dass Teilbauwerke verstärkt wird und ein Monitoringsystem zur Überwachung installiert wird [eigene Darstellung]

	FR	km/h	Verkehr	Teilbauwerk
FR Dortmund	→	60	Pkw + Lkw	1
FR Dortmund	→	60	Pkw	2
FR Dortmund	→	60	Pkw	2
FR Köln	←	60	Pkw	3
FR Köln	←	60	Pkw	3
FR Köln	←	60	Pkw + Lkw	4

Bild 56: Verkehrsszenario 1, wenn die Teilbauwerke 2 und 3 für den Pkw-Verkehr freigegeben sind und das Monitoring erfolgreich ist [eigene Darstellung]

	FR	km/h	Verkehr	Teilbauwerk
FR Dortmund	→	60	Pkw + Lkw	1
	○			2
	○			2
FR Dortmund	→	60	Pkw	3
FR Dortmund	→	60	Pkw	3
FR Köln	→	60	Pkw	3
FR Köln	←	60	Pkw	3
FR Köln	←	60	Pkw + Lkw	4

Bild 57: Verkehrsszenario 3, in der Neubauphase von Teilbauwerk 2 nach Verstärkung von Teilbauwerk 3 [eigene Darstellung]

	FR	km/h	Verkehr	Teilbauwerk
FR Dortmund	→	60	Pkw + Lkw	1
FR Dortmund	→	60	Pkw + Lkw	
FR Dortmund	→	60	Pkw + Lkw	
FR Köln	←	60	Pkw + Lkw	2
FR Köln	←	60	Pkw + Lkw	
	○			3
	○			
FR Köln	←	60	Pkw + Lkw	4

Bild 58: Verkehrsszenario 5, 4+0 Verkehrsführung auf neuem Teilbauwerk 2 [eigene Darstellung]

Nach dem Neubau von Teilbauwerk 2 wird Teilbauwerk 3 gesperrt und der Verkehr wird über das Teilbauwerk 2 geführt. Für den Neubau bestehen keine Einschränkungen für den Verkehr (siehe Bild 58).

Nach Übergabe der Teilbauwerke an den Verkehr wird der Verkehr in Verkehrsszenario 6 geführt (siehe Bild 55).

Für den Fall „mit Monitoring“ ist die Überwachung des Tragwerks vorhanden und bei Änderungen an den Rissen kann das Tragwerk sofort gesperrt werden. Dennoch hat ein geschädigtes Tragwerk unter Verkehr eine erhöhte Versagenswahrscheinlichkeit als ohne Verkehr. Daher sind die Fälle zu untersuchen, bei denen das Tragwerk versagt, bzw. nicht versagt (siehe Bild 52).

Die Versagenswahrscheinlichkeit wird vor der Instandsetzung auf  $1.5E-05$  pro Jahr geschätzt und nach der Notinstandsetzung auf  $1.0E-05$  pro Jahr (in Anlehnung an Bild 31).

Wenn das Monitoring ein weiteres und kritisches Risswachstum unter Verkehr zeigt, so sind Teilbauwerk 2 und 3 für den Verkehr zu sperren und der Verkehr wie in Verkehrsszenario 2 dargestellt, eingerichtet (siehe Bild 53). Zeigt das Monitoring vor der Notinstandsetzung von Teilbauwerk 3 Risswachstum, so wird angenommen, dass 2 Jahre für die Planung des Neubaus benötigt werden. Zeigt das Monitoring nach Instandsetzung von Teilbauwerk 3 Risswachstum so wird angenommen, dass dies den ursprünglichen Zeitplan nicht beeinflusst.

### 7.3 Bautechnische Kosten und Monitoringkosten<sup>19</sup>

Die Kosten für den Ersatzneubau von Teilbauwerk 2 und 3 belaufen sich geschätzt auf 28 Mio. € [191]. Diese Kosten sind Ohnehin-Kosten und werden in jedem der Szenarien anfallen.

Die Kosten für das Monitoring betragen rund 2.000 € pro Monat bis zur Verstärkung des Teilbauwerks 3. Danach wird nur noch Teilbauwerk 2 überwacht. Die Kosten ab diesem Zeitpunkt betragen 1.400 € pro Monat.

Daraus ergeben sich Betriebskosten in diesem Beispiel von rund 90.000€.

Für die Installationskosten des Monitorings fallen insgesamt 9.000 € an. Die Gesamtkosten für das Monitoring belaufen sich damit auf 99.000 €. Die Kosten für die Notinstandsetzung werden zu 3,5 Mio. € angenommen [190].

Es wird ein Zinssatz verwendet, der die Zeitpräferenz berücksichtigt und derzeit bei etwa 1,7 – 2 % liegt. In diesem Beispiel wird ein Zinssatz von 2 % verwendet.

Die Kosten werden auf den Entscheidungszeitpunkt bezogen im Jahr 2013.

<sup>19</sup> Die in diesem Beispiel verwendeten Kosten sind von Straßen.NRW für dieses Projekt zur Verfügung gestellt worden.

## 7.4 Volkswirtschaftliche Kosten aus Verkehrseinschränkungen

Für die Schwelmetalbrücke werden die verschiedenen Verkehrsszenarien durchgerechnet und daraufhin die Veränderungen der Kosten für die sozio-ökonomischen Indikatoren berechnet. Die Kosten werden jeweils für einen durchschnittlichen Werktag (Di-Do) berechnet.

### 7.4.1 Datengrundlage: Verkehrsmodell PTV Visum

Als Grundlage zur Untersuchung der verkehrlichen Aspekte diente das makroskopische Verkehrsmodell PTV Visum, in dem die Auswertung der netzweiten Effekte (Verkehrsverlagerungen) durchgeführt wurde.

Für die Berechnungen wurde eine aktualisierte Version des PTV-eigenen, deutschlandweiten Straßennetz- und Verkehrsmodells PTV VALIDATE (Version 7.2 mit dem Datenstand 2016/2. Quartal) verwendet. Validate ist derzeit eines der größten Verkehrsmodelle der Welt. Das kalibrierte, prognosefähige Modell enthält Pkw- und Lkw-Belastungen für das gesamte deutsche Hauptstraßennetz und bildet auch das gesamte europäische Ausland mit ab.

Die Verkehrsnachfrage ist in der Version VALIDATE 7.2 – in Form von fünf Quelle-Ziel Matrizen, separat für Pkw, Lkw bis 3,5 t zGG (Lkw-S), bis 7,5 t zGG (Lkw-M), bis 12 t zGG (Lkw-L) und über 12 t zGG (Lkw-XL) hinterlegt. Die Auswertung der Nachfra-

gesegmente in dieser Studie erfolgte für Pkw und Lkw S zusammen, getrennt von Lkw M-L-XL, so dass zwei Nachfragesegment-Gruppen ausgelesen wurden.

Aus der Kombination von Netzmodell und der so differenzierten Verkehrsnachfrage werden mithilfe der PTV-eigenen Simulationssoftware Visum die Belastungen der einzelnen Strecken richtungs getrennt ermittelt. Hierbei finden sowohl offizielle Verkehrszählungen als auch existierende geeichte Verkehrsmodelle zur Kalibrierung Verwendung. Als Ergebnis liegt für jede Strecke je Richtung eine durchschnittliche tägliche Belastung unterteilt nach den oben dargestellten Nachfragesegmenten vor. Die in PTV Visum berechnete Umlegung stellt neben den Belastungszahlen auch Routeninformationen zur Verfügung. Das Modell liefert nicht nur Informationen über die Anzahl der Fahrzeuge, die einen Standort passieren, sondern auch darüber, woher sie kommen, wohin sie wollen und auf welcher Route sie unterwegs sind (sogenannte Routenspinnen bezogen auf ein Netzelement). Die Netzlänge des für Deutschland abgebildeten Straßennetzes umfasst ca. 600.000 km.

Bild 59 zeigt das in PTV Validate modellierte Straßennetz Europas sowie das Netzmodell Deutschlands.

Es wird für die Beispiele ein Teilnetz verwendet, welches weiträumig Verkehrsumlegungen auf Ausweichrouten abbildet, die durch verkehrliche Einschränkungen an den Brücken entstehen (Bild 60). Um die Ergebnisse in MS-Excel effizient und schnell

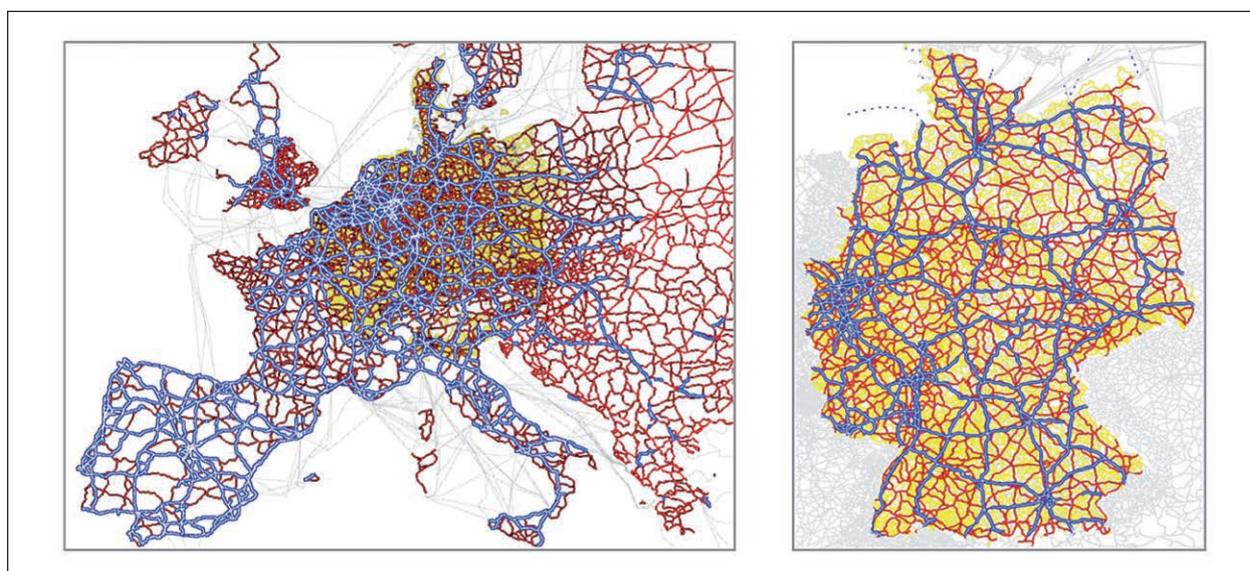


Bild 59: PTV Validate Straßennetz Europas (links) und das Netzmodell Deutschland (rechts) [eigene Darstellung]

berechnen zu können, wurde das normalerweise aus 1,4 Millionen Streckenabschnitten, die etwa 170.000 km Netzlänge entsprechen, auf ein zusammenhängendes Netz von etwa 600.000 Strecken bzw. 54.000 Strecken-km reduziert, ohne Verlust der Genauigkeit der Ergebnisse. Das Netzmodell umfasst das vorrangige Straßennetz inkl. auch aller

örtlicher Verbindungsstraßen. Straßen des untergeordneten Verkehrsnetzes, die reinen Erschließungscharakter haben, sind im Modell nicht enthalten. Das Modell umfasst neben dem Bundesland Nordrhein-Westfalen, die angrenzenden Bereiche aus den benachbarten Bundesländern sowie auch Teile der Nachbarstaaten Niederlande und Belgien.

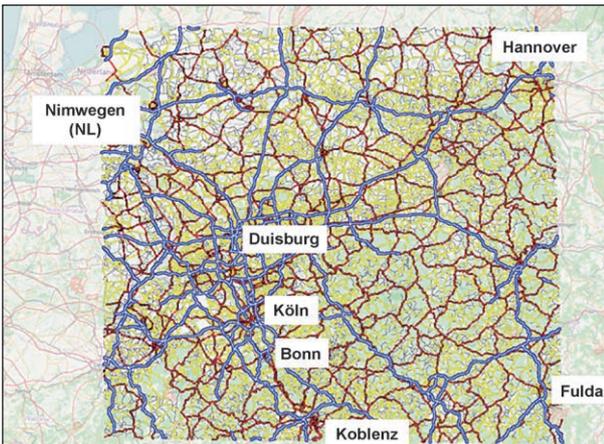


Bild 60: Verwendetes PTV Validate Teilnetz [eigene Darstellung]

Im vorliegenden Netz sind für die Schwelmetalbrücke die Strecken gekennzeichnet, auf denen die Kapazität, Höchstgeschwindigkeit sowie erlaubte Verkehrsträger eingestellt werden können und je nach Szenario modifiziert werden (siehe Tabelle 26). Die Brücke befindet sich als „Point of Interest“ (Pol) referenziert über Geo-Koordinaten im Netz.

### 7.4.2 Operationalisierung der identifizierten Maßnahmen als Szenarien im Verkehrsmodell

Die in Bild 53 bis Bild 58 sowie in Tabelle 25 definierten Verkehrsszenarien sind in Tabelle 26 für das Verkehrsmodell operationalisiert.

AS W-Langerfeld (93)/Schwelme-Brücke					
Verkehrsführung		Anzahl Fahrspuren je Richtung	Kapazität (in Pkw-E/h und Richtung)	Zul. Höchstgeschwindigkeit	Fahrverbote und Sonstiges
Szenario 6 (Basisfall)	FR Dortmund	3	4.950	80	--
	FR Köln	3	4.950	100	--
Bestehende Verkehrseinschränkungen		Keine			
Szenario 1	FR Dortmund	3	4.950	60	Teilbauwerk 2 und 3: Sperrung für Lkw > 3,5t
	FR Köln	3	4.950	60	
Szenario 2 + 4	FR Dortmund	1	1.650	60	Teilbauwerk 2 und 3 komplett gesperrt
	FR Köln	1	1.650	60	

Tab. 26: Verkehrsszenarien für AS W-Langerfeld (93) [eigene Darstellung]

AS W-Langerfeld (93)/Schwelme-Brücke					
Verkehrsführung		Anzahl Fahrspuren je Richtung	Kapazität (in Pkw-E/h und Richtung)	Zul. Höchstgeschwindigkeit	Fahrverbote und Sonstiges
Szenario 3	FR Dortmund	3	4.200 (85 %)	60	Sperrung Teilbauwerk 2/ Lkw ab 3,5 t gesperrt auf Teilbauwerk 3
	FR Köln	3	4.200 (85 %)	60	
Szenario 5	FR Dortmund	3	4.200 (85 %)	60	Sperrung Teilbauwerk 3
	FR Köln	3	4.200 (85 %)	60	

Tab. 26: Fortsetzung

### 7.4.3 Berechnung der gesamtwirtschaftlichen Kosten unterschiedlicher Szenarien

Die Berechnungsvorschriften der einzelnen Indikatoren werden im Kapitel 4.9 beschrieben.

Zur Vereinfachung der Monetarisierung werden fahrleistungsgewichtete Kostensätze ermittelt, wie die folgenden Tabellen darlegen. Die Eingangsdaten zur Gewichtung sind, wenn nicht anders gekennzeichnet, aus dem Methodenhandbuch des BVWP 2030 entnommen [126].

#### Betriebskosten und Reisezeit

Zur Berechnung der Reisezeit wird zwischen Pkw- und Lkw-Verkehr differenziert. Beim Pkw-Verkehr wird darüber hinaus unterschieden zwischen gewerblichem und nicht-gewerblichem Verkehr. Da die Zeitkostensätze im Pkw-Verkehr personenstundenbezogen vorliegen, die zugrunde liegenden Kenngrößen aus Visum dagegen in Fahrzeugstunden ausgewiesen sind, erfolgte eine Umrechnung durch den von MID 2008 [168] angegebenen durchschnittlichen Besetzungsgrad von 1,5 Personen/Fahrzeug. Der Anteil des gewerblichen Pkw-Verkehrs an der Gesamt-Pkw-Verkehrsleistung wird mit 14 % angesetzt [169].

Auch für die Berechnung der Betriebskosten muss zwischen Pkw- und Lkw-Verkehr differenziert und die Fahrleistungen mit den jeweiligen Kosten multipliziert werden. Bei den Betriebskosten wird zwischen Vorhaltungskosten, Personalkosten, Betriebsgrundkosten und Energiekosten differenziert. Bei den Personalkosten wurden nur die Nachfragesegmente Lkw S – M – XL berücksichtigt, während die Personalkosten des gewerblichen Pkw-Verkehrs bei den Reisezeiten berücksichtigt wurden. Bezüglich Vorhaltungskosten werden nur der gewerbliche Pkw- und Lkw-Verkehr betrachtet.

Der Energie- und Kraftstoffverbrauch wird in Abhängigkeit von Fahrleistung und Verkehrssituation be-

rechnet. Aus der Auslastung, der Lage (städtisch oder ländlich) und der im Vorfeld definierten, den Strecken zugeordneten HBEFA-Streckenklasse (bzw. die aus dem eingestellten Streckenattribut ermittelte Geschwindigkeitsklasse), ergibt sich für jede angewendete Fahrzeugkombination ein Energie- bzw. Kraftstoffverbrauchsfaktor, der auf die Fahrleistung einer Stunde eines Fahrzeugtyps eines Streckenabschnitts anzuwenden ist. Für das bewertungsrelevante Ergebnis ist über alle Fahrzeugarten, Stunden und Streckenabschnitte aufzusummieren.

Die Bereitstellung der Energie- und Kraftstoffverbrauchsfaktoren erfolgt in PTV Visum nach HBEFA 3.3 [170], das als Zusatzmodul in der makroskopischen Simulationssoftware bereits integriert ist und eine vollständige, automatisierte Kraftstoffberechnung ermöglicht. Als Ergebnis werden die absoluten Kraftstoffverbrauchskennwerte in Tonnen über alle Straßen summiert. Es wird jeweils der Benzin- sowie Dieserverbrauch berechnet. Die Kosten und der Verbrauch für die Antriebsarten Gas und elektrischer Strom wurden hier problemadäquat nicht berücksichtigt, da der Anteil dieser Antriebsarten laut dem Kraftfahrt-Bundesamt im Jahre 2017 lediglich 1,5 % des gesamten Fahrzeugbestands betrug [171]. Dies kann sich zukünftig ändern.

In Tabelle 27 werden die aggregierten Kostensätze getrennt für die Nachfragesegmente Pkw und Lkw S sowie Lkw ab 3,5 t für die Indikatoren Betriebskosten und Reisezeit dargestellt.

#### Verkehrssicherheit

Dieser Wirkungsbereich umfasst die Veränderung des Unfallgeschehens, das sich aus der erhöhten Fahrleistung infolge einer Lkw- oder (Teil-)sperrung ergibt.

Im BVWP 2030 erfolgt die Berechnung der Nutzenkomponente „Veränderung der Verkehrssicherheit

Indikator	Kostensatz je Nachfragesegment	
	Nachfragesegment Car + Lkw S	Nachfragesegment Lkw M – L – XL
Betriebskosten		
Vorhaltungskosten	1,62 (Euro/Fz-h)	7,11 (Euro/Fz-h)
Personalkosten	3,31 (Euro/Fz-h)	18,79 (Euro/Fz-h)
Betriebsgrundkosten	14,50 (Euro/100 Fz-km)	24,67 (Euro/100 Fz-km)
Energiekosten	0,76 (Euro/l)	0,75 (Euro/l)
Reisezeit	11,02 (Euro/Fz-h)	3,36 (Euro/Fz-h)

Tab. 27: Fahrleistungsgewichtete und aggregierte Kostensätze für die Indikatoren Betriebskosten und Reisezeit [eigene Darstellung]

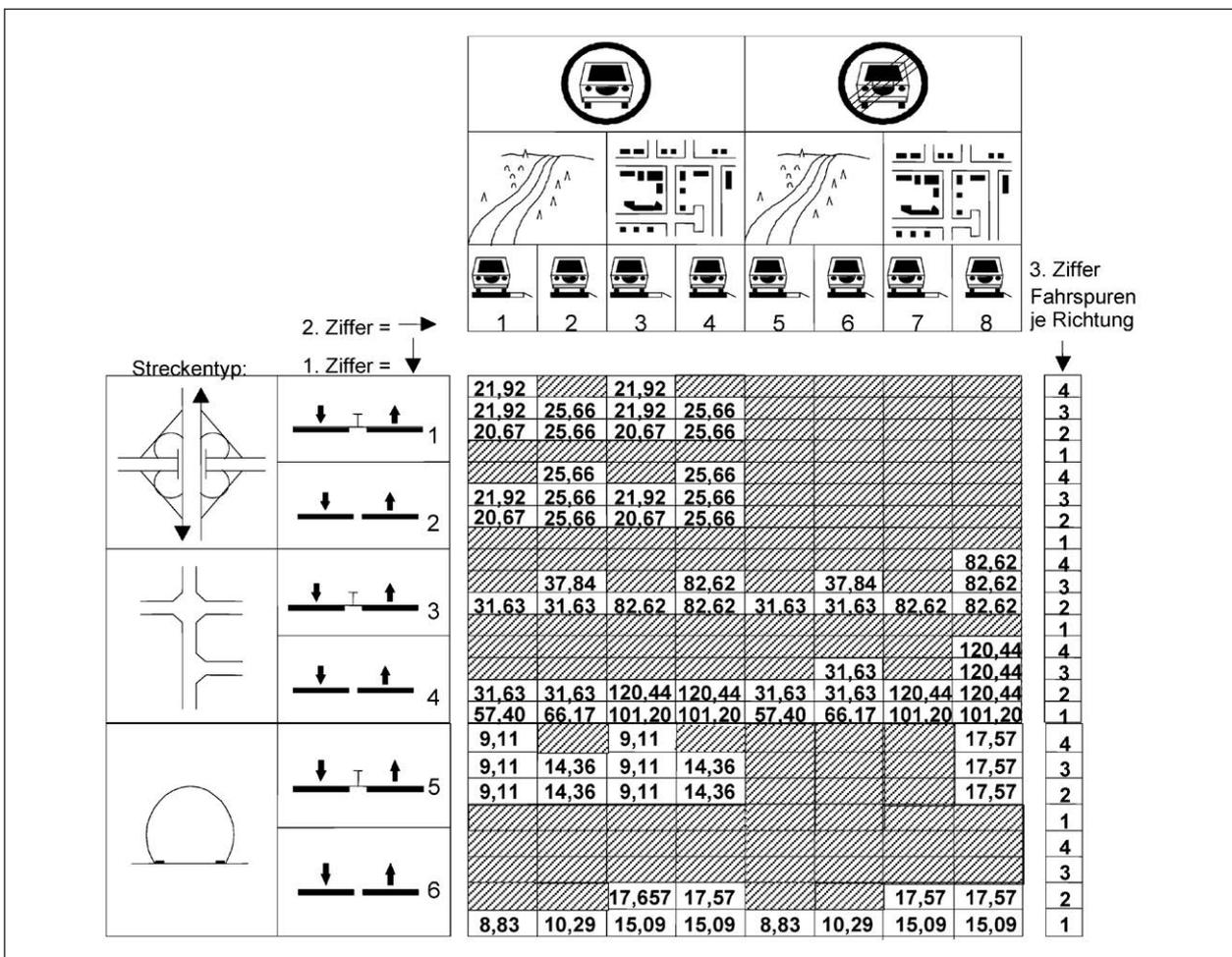


Bild 61: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values in €/Tsd. Fz-km [126]

(NS)“ über fahrleistungsbezogene Unfallkostenraten [Euro/Tsd. Fz-km] [126]. Die fahrleistungsbezogenen Unfallkostenraten basieren auf differenzierten Wertansätzen für Personen- und Sachschäden.

Die Unfallkostenraten werden unter Berücksichtigung des Streckentyps (planfrei, plangleich oder

Tunnelstrecke mit/ohne Fahrtrichtungstrennung; Kennziffer 1), der räumlichen Lage der Strecke (innerhalb von bebauten Gebieten oder außerhalb; Kfz-Straße) und dem Vorhandensein eines Seitenstreifens (Kennziffer 2) sowie der Anzahl der Fahrspuren je Richtung (Kennziffer 3) ermittelt (siehe Bild 61 und Bild 62).

Streckentyp:		2. Ziffer =		1. Ziffer =		3. Ziffer Fahrspuren/ Richtung		4. Ziffer Streckenqualität			
		5	6	7	8	1	2	3	4	5	
	3	[Diagram: Road with central island, arrows pointing up and down]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		1	82,62
		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		2	
		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		3	37,84
		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		4	82,62
		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		5	
		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		1	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		2	31,63	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		3	31,63	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		4	82,62	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		5	82,62	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		1		
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		2		
4	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		1		
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		2		
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		3	120,44	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		4		
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		5		
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		1		
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		2	44,93	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		3	44,93	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		4	120,44	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		5	120,44	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		1	66,17	
	[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		2	82,39	
[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		3	98,26		
[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		4	101,20		
[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		5	101,20		
[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		1	89,91		
[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		2	101,20		
[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		3	251,25		
[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		4	251,25		
[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		[Diagram: Road with central island, arrows pointing left and right]		5	120,80		

Bild 62: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values differenziert nach der vierten Kennziffer (Qualität) [€/Tsd. Fz-km] [126]

## Luftverschmutzung und Klimaschutz

Im Methodenhandbuch des BVWP 2030 erfolgt die Berechnung der Veränderung der Abgasbelastungen getrennt für die sechs Schadstoffarten NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC, Partikel (PM) und SO<sub>2</sub> [126]. Neben den Abgasemissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren werden auch die Emissionen von Elektrofahrzeugen berücksichtigt, die sich auf den Endenergieverbrauch ab Stromabnehmer bzw. ab Ladestation für Pkw mit Elektroantrieb beziehen. Es werden die Emissionen aus den Antriebsarten Diesel, Otto und Gas unter Verwendung des HBEFA-Ansatzes ermittelt.

Die Bereitstellung der Emissionsfaktoren erfolgt in PTV Visum nach HBEFA 3.3 [170], das als Zusatzmodul in der makroskopischen Simulationssoftware bereits integriert ist und eine vollständige, automati-

sierte Emissionsberechnung ermöglicht. Im Rahmen des Verfahrens werden folgende Schadstoffe separat für die Fahrzeugschichten des motorisierten Individualverkehrs sowie für den Schwerverkehr ausgewertet:

- Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>),
- Stickoxid (NO<sub>x</sub>),
- Partikel (PM).

Die Emissionsfaktoren wurden streckenbezogen aus dem Datenpool des HBEFA ausgewählt. Die Auswahl erfolgt in Abhängigkeit von der Verkehrssituation und der Fahrzeugkombination (Schwerverkehr und Leichtverkehr mit den eingesetzten Emissionskonzepten) der Strecke. Die tabellierten Emissionsfaktoren weisen dabei erhebliche Unterschiede auf. Insofern haben die strecken- und fahrzeugbezogenen Parameter einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der emittierten Schadstoffe. Folgende Aspekte werden bei der Berechnung der Emissionskennwerte berücksichtigt.

- Streckenklasse (z. B. Autobahn oder Kreisstraße) mit Geschwindigkeitsprofil,
- Lage (städtisch oder ländlich),
- Streckenauslastung (Level of Service) mit vordefinierten Klassengrenzen,
- Nachfragesegmentspezifische Belastung,
- Verkehrszusammensetzung für die Nachfragesegmente Schwer- bzw. Leichtverkehr mit Bezug zur Kraftstoffart, Größenklasse, Emissionsstufe.

Aus dem aktuellen Level of Service (Auslastung), der Lage (städtisch oder ländlich) und der im Vorfeld definierten, den Strecken zugeordneten HBEFA-Streckenklasse (bzw. die aus dem eingestellten Streckenattribut ermittelte Geschwindigkeitsklasse), ergibt sich für jede angewendete Fahrzeugkombination ein Emissionsfaktor. Dieser Faktor entspricht der spezifischen Verkehrssituation und wird mit der aktuellen nachfragespezifischen Streckenbelastung und der Länge der Strecke multipliziert und als relevante Schadstoffemission für jede Strecke ausgegeben. Als Ergebnis werden die absoluten Emissionskennwerte in Tonnen über alle Straßen summiert.

	außerorts	innerorts
Emissionen CO <sub>2</sub> gesamt [EUR/t]	145	145
Emissionen NO <sub>x</sub> gesamt [EUR/t]	15.400	15.400
Emissionen PM gesamt [EUR/t]	122.800	364.100

Tab. 28: Schadenskosten für Abgasemissionen innerorts und außerorts [126]

Für die Emissionsberechnung wurden die Kostensätze aus dem BVWP 2030 angesetzt [126] (siehe Tabelle 28).

## Lärm

Eine detaillierte Berechnung der Lärmkosten beruht i. d. R. auf der Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen (RLS-90 [205]). Hierbei wird eine Lärmemission auf Basis der Verkehrsstärke, der Straßeneigenschaften, der Verkehrszusammensetzung und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bestimmt. Im Anschluss kann durch weitere Informationen zum Straßensbild (Abstand der Bebauung von der Fahrbahn) und der Siedlungsstruktur (Bevölkerungsdichte bzw. Anzahl der betroffenen Personen, Lage) eine Lärmimmission bei den betroffenen Anwohnern berechnet werden. Für Straßen außerhalb bebauter Gebiete kann auch die Immission in Schutz- oder Erholungsgebieten als Bewertungsgröße hinzugezogen werden. Die jeweiligen Immissionswerte (Beurteilungspegel) können wiederum mit generalisierten Kostensätzen des BVWP-Methodenhandbuch [126] monetarisiert werden.

Eine verfahrensgenaue Berechnung nach der RLS-90 bietet vor allem auf mikroskopischer Ebene eine sehr genaue Lärmberechnung, jedoch wären hierfür im vorliegenden Netzmodell sehr viele Annahmen zu treffen, da beispielsweise Verteilungen von Einwohnern oder die Lage der einzelnen Straßen nicht definiert sind.

Im „Update of the Handbook on External Costs of Transport“ [206] werden deswegen aggregierte Kostensätze für Lärmkostenberechnungen von größeren Netzen vorgeschlagen, welche zutreffende Annahmen verallgemeinern und daher mit den vorliegenden Daten aus dem Verkehrsnetz eine vereinfachte, aber dennoch verlässliche Berechnung ermöglichen. Die dem Handbuch zugrunde liegenden Daten entstammen dabei ebenfalls Berechnun-

gen mit der RLS-90 [205], wodurch die Vergleichbarkeit der beiden Methoden erhalten bleibt.

Die Kostensätze sind dabei abhängig von den folgenden Größen:

- Fahrzeugklassen: Pkw, Motorrad, Bus, Lkw usw.,
- Tageszeit: Tag oder Nacht,
- Verkehrsfluss: Dicht oder dünn,
- Raumtyp: urban, suburban, rural.

Sowohl Raumtyp als auch Fahrzeugklassen sind statisch, die Zuordnung ändert sich während der Berechnung nicht, während der Verkehrsfluss sehr von der Tageszeit abhängt. Es ist dabei empfehlenswert, mithilfe von Tagesganglinien (z. B. aus Zählstellen, Erhebungen etc.) verschiedene Zeitscheiben zu bilden, und für alle Zeitscheiben jeweils den Verkehrsfluss zu bestimmen. Im vorliegenden Fall wurden folgende Zeitscheiben berechnet:

- Nacht: 22-06,
- Tag: 09-15, 18-22,
- Morgenspitze: 06-09,
- Abendspitze: 15-18.

Es sind dabei auch andere Unterteilungen möglich, es sollte jedoch zumindest eine Unterteilung in Tageszeitraum (06-22 Uhr) und Nachtzeitraum (22-06) vorgenommen werden.

Die Kategorisierung der Raumtypen erfolgt auf Basis der Straßendichte (Einwohner pro Straßenkilometer), hierfür lassen sich entsprechende Grenzwerte im Handbuch finden. Falls beispielsweise keine Einwohnerdaten zur Verfügung stehen, kann die Zuordnung zu den Raumtypen auch auf Basis von anderen, nachvollziehbaren Kriterien durchgeführt werden, wobei dabei alle Straßen außerhalb bebauter Gebiete grundsätzlich als rural eingestuft werden sollten.

Die Kostensätze sind in Bild 63 vergleichend dargestellt.

Im Rahmen der Berechnung der Kosten empfiehlt es sich, selbst aggregierte Kostensätze zu berechnen. Die Berechnung der Szenarien ergab beispielsweise für die Abfolgen der Verkehrsflüsse (Nacht – Frühspitze – Tag – Abendspitze) insgesamt nur folgende Kombinationen:

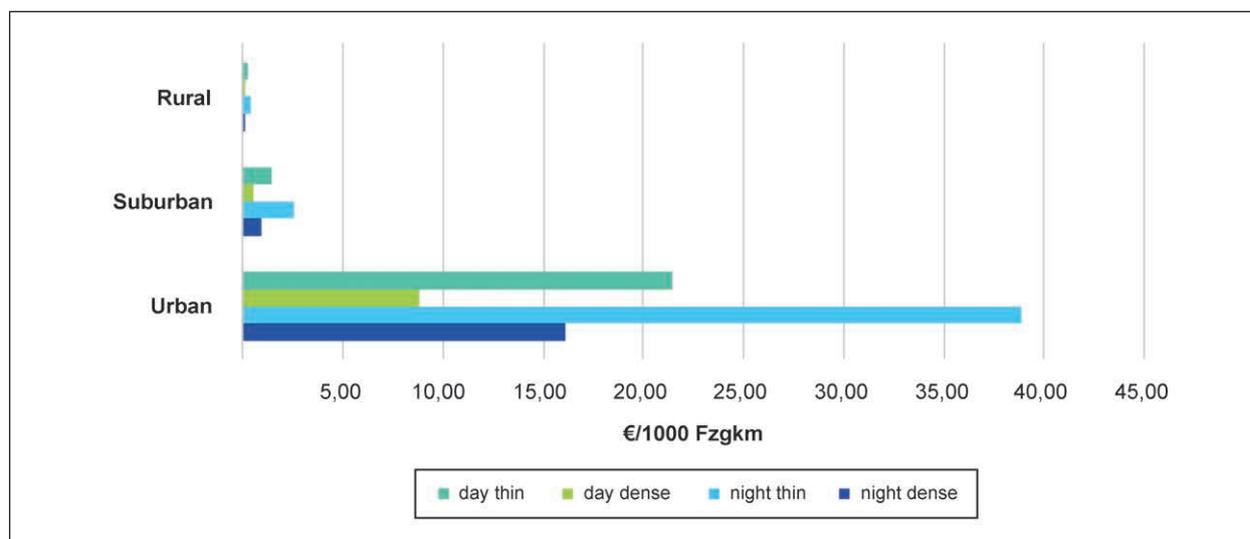


Bild 63: Kostensätze für die Lärmberechnung nach Raumtypen in Anlehnung an [206]

Kategorie	€/1.000Fzghm, „Car+Lkws“	€/1.000Fzghm, „LkwM-XL“
urban thin-thin-thin-thin	28,09 €	211,13 €
urban thin-dense-thin-dense	21,39 €	160,86 €
urban thin-dense-dense-dense	14,07 €	105,92 €
urban thin-thin-thin-dense	24,53 €	184,45 €
urban dense-dense-dense-dense	11,56 €	87,01 €
suburban thin-thin-thin-thin	1,82 €	13,63 €
suburban thin-thin-thin-dense	1,57 €	11,74 €
suburban thin-dense-thin-dense	1,35 €	10,07 €
suburban thin-dense-dense-dense	0,83 €	6,17 €
rural thin-thin-thin-thin	0,25 €	1,60 €
rural thin-thin-thin-dense	0,23 €	1,41 €
rural thin-dense-thin-dense	0,20 €	1,25 €
rural thin-dense-dense-dense	0,15 €	0,87 €

Tab. 29: Kostensätze in Kombination mit Raumtyp, Verkehrsfluss und Pkw-Lkw [eigene Darstellung]

- thin – thin – thin – thin,
- thin – thin – thin – dense,
- thin – dense – thin – dense,
- thin – dense – dense – dense.

$$er_i = \frac{\sum_{j=1}^n t_{ij} * EW_j}{\sum_{j=1}^n EW_j} \quad \text{Gl. 57}$$

$er_i$  Erreichbarkeit

$EW$  Einwohner

$t$  Reisezeit

$i$  Index der untersuchten Stadt

$j$  Index der zu erreichenden Städte

$n$  Anzahl der Städte

In Kombination mit den Raumtypen ergeben sich somit folgende Kostensätze (Tabelle 29).

### Erreichbarkeit

Die Erreichbarkeit wird i. d. R. in Bezug auf konkrete Ziele von einem Ort aus bestimmt. Allgemein lässt sich das Erreichbarkeitsmaß folgendermaßen bestimmen:

In der obenstehenden Formel ist  $n$  die Anzahl der betrachteten Zielbezirke. Die Gewichtung von ein-

zelenen Relationsfahrzeiten sollte i. d. R. auf Basis der Einwohnerzahlen der jeweiligen Zielbezirke erfolgen, da sich die Erreichbarkeit v. a. auf die möglichen und nicht die tatsächlichen Verkehrsbewegungen bezieht. Im Falle der Erreichbarkeit im Güterverkehr kann u. U. aber auch ein wirtschaftlicher Indikator (z. B. Arbeitsplätze pro Bezirk, Anzahl Angestellte etc.) zur Gewichtung herangezogen werden.

Für die vorliegende Untersuchung wird jedoch auf die Relationen zwischen zentralen Orten übergegangen, deren Routen das zu untersuchende Bauwerk queren. Da jedoch für viele Relationen die Erreichbarkeit sich auch durch eine Maßnahme nicht ändert, weil die Hauptverkehrsrouten gar nicht über das betrachtete Bauwerk führen, ist es sinnvoll, bereits eine Vorauswahl von bestimmten Relationen zu machen.

Im vorliegenden Falle wurden über eine Spinnenbetrachtung der Wege über die Bauwerke und der geografischen Lage der Bezirke folgende Beziehungen in die Bewertung mit einbezogen:

Schwelmetalbrücke
• Köln → Ennepe-Ruhrkreis
• Wuppertal → Ennepe-Ruhrkreis
• Remscheid → Ennepe-Ruhrkreis
• Köln → Dortmund
• Wuppertal → Dortmund
• Remscheid → Dortmund

Da die Maßnahmen sich auch in Bezug auf Lkw- und Pkw-Befahrbarkeit unterscheiden, werden die Erreichbarkeiten für diese beiden Fahrzeugsegmente separat betrachtet.

Der somit verallgemeinerte Quotient ist allgemein stark abhängig von der Anzahl der betrachteten Relationen, und speziell auch der Länge der jeweiligen Relationen. Betrachtet man ein komplettes Netz, so ist er sehr nahe der durchschnittlichen Reisezeit im Netz, betrachtet man wie oben nur einige Teilrelationen, so weicht er deutlich davon ab. Deswegen ist es auch bei Vergleichen des Quotienten wichtig, dass immer dieselben Relationen bewertet werden.

Bei allen vorliegenden Maßnahmen wurden die Einschränkungen der Bauwerke beidseitig im gleichen Maße vorgesehen, weswegen eine alleinige Betrachtung von einer Richtung ausreichend ist. Bei asymmetrischen Maßnahmen ist es notwendig, beide Richtungen der Bezirksrelationen zu betrachten.

Es wurden beispielhaft nur die Szenarien mit den stärksten verkehrlichen Auswirkungen an beiden Brücken betrachtet.

#### 7.4.4 Ergebnisse des Verkehrsmodells für die Schwelmetalbrücke

Die Monetarisierung der Indikatoren Betriebskosten, Reisezeit, Verkehrssicherheit, Luftverschmutzung und Klimaschutz wird nach dem Methodenhandbuch des BVWP 2030 [126] durchgeführt und es werden zur Vereinfachung fahrleistungs- bzw. distanzabhängige Kostensätze verwendet. Der Indikator Lärm wurde in diesem Projekt angelehnt an der Methode und den Kostensätzen in [206] bestimmt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen absoluten Kosten pro Tag und Szenario in den nachfolgenden Tabellen und Grafiken in gerundeten Werten dargestellt. Die berechneten Tageswerte beziehen sich auf die Verkehrsleistungen im ausgewerteten Teilnetz (ca. 600.000 Strecken bzw. ca. 54.000 Strecken-km) und sollten daher nicht als Absolutwert einer Interpretation zugeführt werden. Im Folgenden sind daher immer Differenzbetrachtungen dargestellt. Im vorherigen Kapitel 7.4.2 sind die Merkmale und Operationalisierung der Verkehrseinschränkungen im Verkehrsmodell erläutert. Wenn die Anzahl der Fahrstreifen während der Maßnahmendurchführung beibehalten werden kann, wird aufgrund der Verschwenkung auf die Gegenfahrbahn und der Verschmälerung der Fahrspuren die Kapazität auf ca. 85 % der Kapazität des Basisfalls reduziert sowie für eine realitätsnahe Bild einer Baustelle am Bauwerk ein Streckenzug auch vor und hinter dem Bauwerk einbezogen.

Die als Basis dienende Umlegung und die anschließende Kenngrößenermittlung für die verkehrlichen Szenarien und den Basisfall erfolgte automatisiert in PTV Visum. Die ermittelten Kenngrößen wurden anschließend den im vorherigen Kapitel gewichteten monetären Werten zugeordnet.

Da im vorliegenden Projekt die Differenzbetrachtung der gesamtwirtschaftlichen Kosten im Nachgang bei der Gegenüberstellung der Kosten für die Brücke mit und ohne Monitoring stattfindet, werden die Ergebnisse in absolute Tageswerte für die berechneten Indikatoren angegeben. Nichtsdestotrotz, zur Veranschaulichung der verkehrlichen Wirkungen einzelner Einschränkungen am Bauwerk,

wird exemplarisch eine Differenzbetrachtung der Planfälle zu einem Basisfall durchgeführt. Der Basisfall ist bei der Schwelmetalbrücke und bei der Brücke Duisburg-Beeck jeweils das Szenario, welches keinerlei verkehrliche Einschränkungen aufweist, also ein ungestörter Verkehrsablauf auf der Brücke besteht.

Für die Schwelmetalbrücke ergeben sich folgende absolute Tageswerte für die Kosten der einzelnen Indikatoren auf Basis des angewendeten Netzes (Tabelle 30).

Die Kostenanteile der einzelnen Indikatoren verteilen sich wie in Bild 64 dargestellt.

Es wird deutlich, dass der größte Anteil der Kosten von den Betriebskosten eingenommen wird, während Reisezeit den zweitgrößten Anteil ausmacht. Lärmkosten hingegen machen nur einen sehr geringen Anteil aus, während die Berechnung der selbigen sehr aufwendig ist. Aus diesem Grund sollte der Verkehrsplaner individuell abwägen, ob die Ermittlung des gesamtwirtschaftlichen Indikators „Lärm“ für die Entscheidung, ob Monitoring installiert werden soll, oder nicht, notwendig ist.

Die ermittelten Tageswerte können durch Multiplikation mit 30 Tagen ausreichend genau auf Monatswerte umgerechnet werden, insbesondere da es sich um Differenzbetrachtungen handelt.

Um die Veränderungen der Kosten durch unterschiedliche verkehrliche Einschränkungen besser zu verdeutlichen, visualisiert die Bild 65 die Differenzbetrachtung der Kosten zwischen Basisfall (Szenario 6) und den anderen Szenarien. Für Szenario 1 ergeben sich nur geringe Mehrkosten, da lediglich die inneren Fahrspuren für den Lkw-Verkehr ab 3,5 t gesperrt wurden und die Lkw die Brücke auf den äußeren Fahrspuren noch befahren dürfen. Szenario 2+4 weisen die stärksten Auswirkungen auf, da es sich hier um eine Teilspernung der inneren Teilbauwerke handelt, was bedeutet, dass eine Kapazitätsreduktion und ein Herabsetzen der zulässigen Geschwindigkeit auf dem Streckenzug vor und hinter dem Bauwerk sowie auf dem Bauwerk selbst im Verkehrsmodell implementiert wurde. Hier sind die Effekte erwartungsgemäß am höchsten. In Szenario 3 und 5 fallen die Kosten geringer aus als bei den Szenarien 2 und 4, da lediglich ein Teilbauwerk gesperrt wird, die Anzahl der Fahrspuren jedoch beibehalten bleibt.

Schwelmetalbrücke						
Indikator	Kosten in (€)					
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6 (Basisfall)
Reisezeit	49.532.640	49.596.370	49.548.710	49.596.370	49.548.850	49.516.130
Betriebskosten	69.129.710	69.163.470	69.138.470	69.163.470	69.135.920	69.122.030
Klimaschutz/Luftverschmutzung	11.538.570	11.557.610	11.545.570	11.557.610	11.554.400	11.541.290
Unfälle	11.351.670	11.354.850	11.353.590	11.354.850	11.352.430	11.351.590
Lärm	2.051.810	2.052.700	2.051.960	2.052.700	2.051.790	2.051.330
Summe	143.604.390	143.725.010	143.638.300	143.725.010	143.643.380	143.582.360

Tab. 30: Absolute Tageswerte der Kosten für die Szenarien der Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

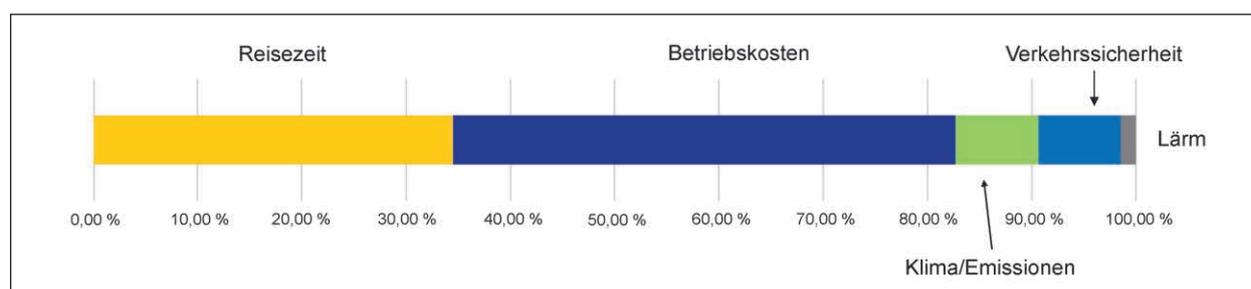


Bild 64: Kostenverteilung der Indikatoren für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

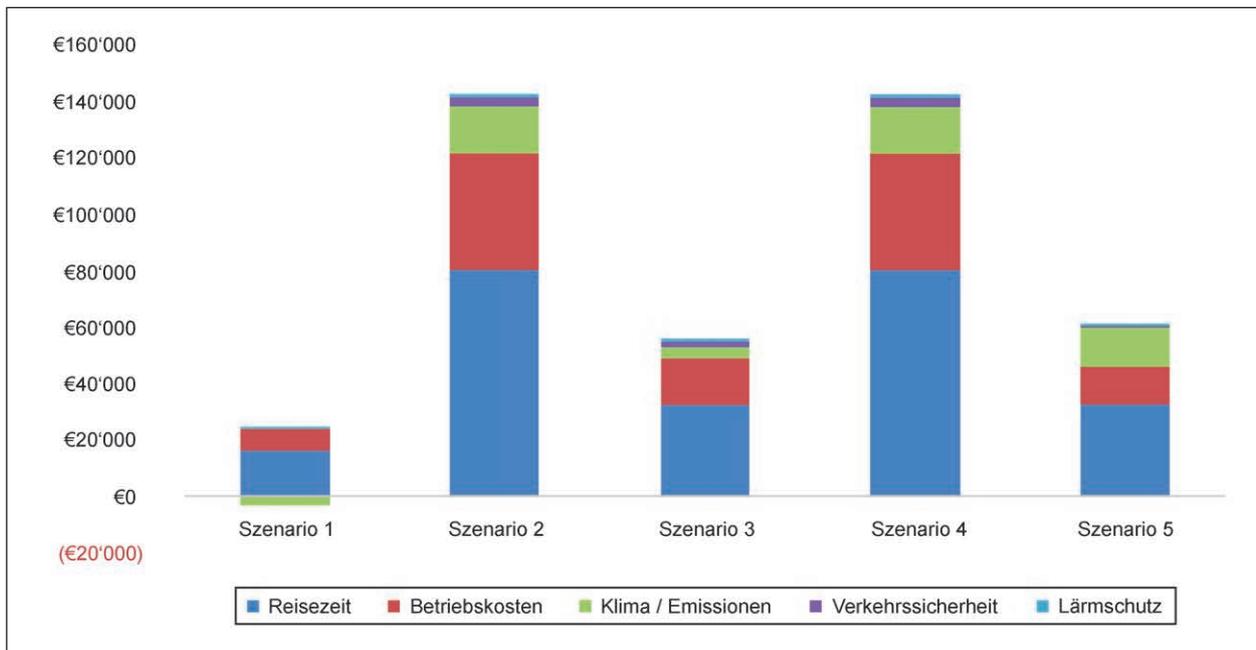


Bild 65: Kostenveränderung pro Tag zwischen den Szenarien und dem Basisfall (keine verkehrliche Einschränkung) der Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

### 7.4.5 Veränderungen der Erreichbarkeiten

Wie bereits erwähnt, wurde exemplarisch die Veränderung der Erreichbarkeiten zwischen dem Szenario Basisfall (Schwelmetalbrücke S6) und dem Szenario mit den stärksten verkehrlichen Einschränkungen berechnet. Dadurch, dass die Brücke jeweils nur Teilspernungen und keine Vollsperrungen aufweisen, sind die Veränderungen der Erreichbarkeiten erwartungsgemäß gering.

Als Gewichtung wurden beim Personenverkehr die Einwohnerzahlen herangezogen und beim Güterverkehr das Bruttoinlandsprodukt je Stadt in Mio. €. Bei der Berechnung der Erreichbarkeit ist es ebenfalls möglich, mit anderen Zahlen die Reisezeit zu gewichten. Es muss jedoch immer beachtet werden, dass von einer potenziellen Größe bzw. Erreichbarkeit ausgegangen wird.

Bild 66 zeigt die geografischen Positionen der einzelnen Oberzentren und der Brücke. Die Werte sind jeweils als Tageswerte eines durchschnittlichen Werktags zu verstehen.

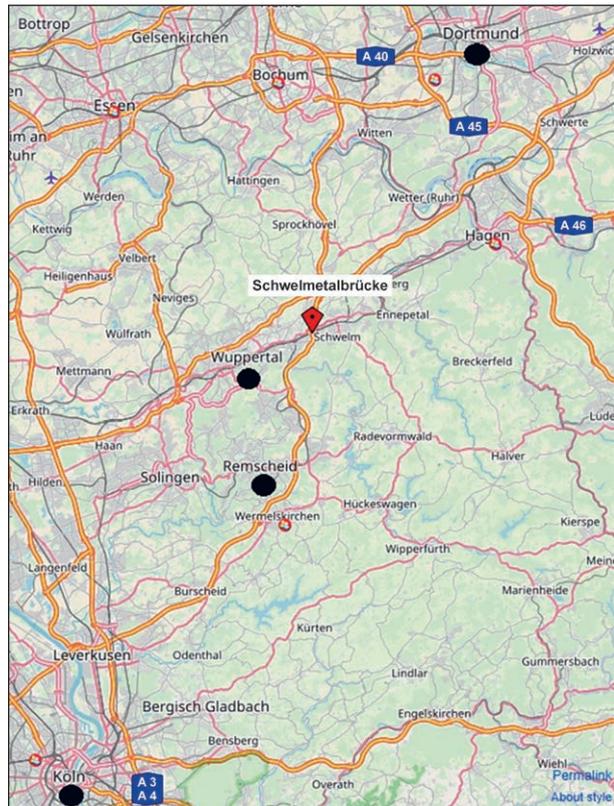


Bild 66: Oberzentren Schwelmetalbrücke [Quelle: ©OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA]

#### Veränderung der Erreichbarkeit bei Teilspernung der Schwelmetalbrücke

Beim Vergleich der Erreichbarkeiten zwischen dem Szenario Basisfall und der Teilspernung der Schwelmetalbrücke von Dortmund und dem Ennepe-Ruhr-

kreis zu den unterschiedlichen Oberbezirksbeziehungen wird die Veränderung der Erreichbarkeit schon deutlicher. Tabelle 31 zeigt die Anzahl der

Pkw und Lkw sowie die Fahrzeit in Fz/h zwischen den einzelnen betrachteten Beziehungen auf, welche als Input für die Ermittlung des Erreichbarkeitsmaß dienen. Dadurch, dass sich die Fahrzeiten zwi-

schen den Oberzentren bei Pkw- und Lkw stärker verändert, ergibt auch der Erreichbarkeitsmaß eine deutlichere Differenz, wie Tabelle 32, Tabelle 33 und Bild 67 verdeutlichen.

	<b>Pkw</b>			
	<b>Von</b>	<b>Nach</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Zeit (Fz/h)</b>
S6	Ennepe-Ruhrkreis	Köln	1.102,03	1.128,43
	Ennepe-Ruhrkreis	Wuppertal	28.962,95	7.264,67
	Ennepe-Ruhrkreis	Remscheid	2.458,91	949,46
	Dortmund	Köln	759,94	1.096,89
	Dortmund	Wuppertal	2.535,99	1.955,54
	Dortmund	Remscheid	503,88	402,24
S2/S4	Ennepe-Ruhrkreis	Köln	1.102,03	1.176,75
	Ennepe-Ruhrkreis	Wuppertal	28.962,95	7.414,98
	Ennepe-Ruhrkreis	Remscheid	2.458,91	1.048,82
	Dortmund	Köln	759,94	1.146,40
	Dortmund	Wuppertal	2.535,99	1.983,51
	Dortmund	Remscheid	503,88	440,25
	<b>Lkw</b>			
	<b>Von</b>	<b>Nach</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Zeit (Fz/h)</b>
S6	Ennepe-Ruhrkreis	Köln	67,55	83,54
	Ennepe-Ruhrkreis	Wuppertal	347,19	179,89
	Ennepe-Ruhrkreis	Remscheid	152,3	83,95
	Dortmund	Köln	51,44	84,59
	Dortmund	Wuppertal	62,66	51,91
	Dortmund	Remscheid	14,03	12,21
S2/S4	Ennepe-Ruhrkreis	Köln	67,55	88,08
	Ennepe-Ruhrkreis	Wuppertal	347,19	184,22
	Ennepe-Ruhrkreis	Remscheid	152,3	94,75
	Dortmund	Köln	51,44	88,85
	Dortmund	Wuppertal	62,66	52,58
	Dortmund	Remscheid	14,03	13,43

Tab. 31: Anzahl der Pkw- und Lkw-Fahrten sowie Reisezeit in Fz/h aus Visum zwischen den Oberzentren für die Schwelmetalbrücke und alle betrachteten Szenarien [eigene Darstellung]

	<b>von</b>	<b>nach</b>	<b>von-Einwohner</b>	<b>nach-Einwohner</b>	<b>BIP (Mio. €)</b>	<b>Ø Fahrzeit Pkw</b>	<b>Ø Fahrzeit Lkw</b>
S6	Ennepe-Ruhrkreis	Köln	325.374	1.061.000	62.053	1,02	1,24
		Wuppertal		350.046	11.954	0,25	0,52
		Remscheid		109.499	3.823	0,39	0,55
	Dortmund	Köln	585.813	1.061.000	62.053	1,44	1,64
		Wuppertal		350.046	11.954	0,77	0,83
		Remscheid		109.499	3.823	0,80	0,87
Erreichbarkeitsmaß S6		Erreichbarkeit Ennepe-Ruhr			0,800	1,093	
		Erreichbarkeit Dortmund			1,242	1,481	

Tab. 32: Erreichbarkeitsmaß für Pkw- und Lkw für das Szenario S6 Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

	von	nach	von-Einwohner	nach-Einwohner	BIP	Ø Fahrzeit Pkw	Ø Fahrzeit Lkw
S2/S4	Ennepe-Ruhrkreis	Köln	325.374	1.061.000	62.053	1,07	1,30
		Wuppertal		350.046	11.954	0,26	0,53
		Remscheid		109.499	3.823	0,43	0,62
	Dortmund	Köln	585.813	1.061.000	62.053	1,51	1,73
		Wuppertal		350.046	11.954	0,78	0,84
		Remscheid		109.499	3.823	0,87	0,96
Erreichbarkeitsmaß S2/S4			Erreichbarkeit Ennepe-Ruhr			0,835	1,152
			Erreichbarkeit Dortmund			1,296	1,553

Tab. 33: Erreichbarkeitsmaß für Pkw- und Lkw für die Szenarien S2/S4 Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

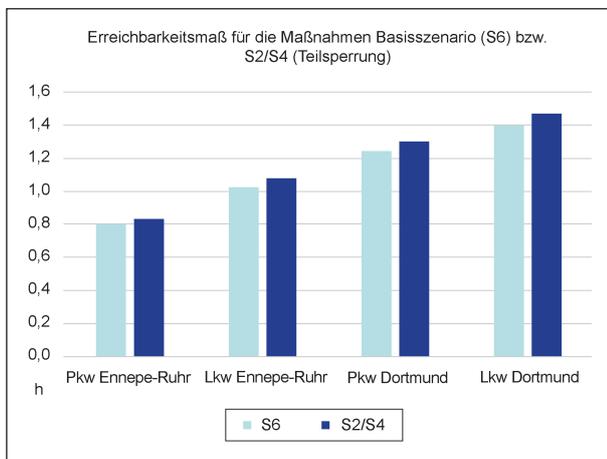


Bild 67: Vergleich der durchschnittlichen Fahrzeit in den Szenarien vom Ennepe-Ruhr-Kreis sowie Dortmund zu den jeweiligen Oberzentren [eigene Darstellung]

### 7.4.6 Interpretation der Ergebnisse der indirekten Kosten für die Schwelmetalbrücke

Erreichbarkeit ist eine potenzielle Größe, die Auskunft geben kann über die Attraktivität eines Ortes oder einer Region. An den beiden Beispielbrücken wurde die Outbound accessibility betrachtet, d. h. es wurde untersucht, wie gut von einer Region alle anderen betrachteten Regionen erreicht werden können.

Verkehrliche Einschränkungen können Auswirkungen auf die Erreichbarkeit haben, indem es schwieriger ist, an den Ort, an dem eine verkehrliche Maßnahme durchgeführt wird, mit dem gewählten Transportmittel zu gelangen. Die Erreichbarkeit nach innen und nach außen ist für Bewohner, Besucher sowie den Güterverkehr von hoher Bedeutung. Ein gut erreichbares Ziel ist beispielweise attraktiver,

als jenes, zu dem man mit mittlerem Aufwand schwerer hinkommt. Der meist aufkommensgewichtete Zeitbedarf im unbelasteten Netz stellt eine der wesentlichen Größen zur Beurteilung von Erreichbarkeit als Potenzialgröße dar.

Im vorliegenden Projekt wurde die Erreichbarkeit betrachtet. Da die verkehrlichen Einschränkungen der Brücke als Teilspernung keinen so großen Einfluss auf die Reisezeit haben, wie zum Beispiel eine Vollsperrung, sind die Unterschiede in den Erreichbarkeitsmaßen nur sehr gering und mit einer Isochronen-Darstellung im Visum nicht zu visualisieren.

Nichtsdestotrotz zeigen die Berechnungen, dass sich die Erreichbarkeit bei der Brücke durch die Teilspernungen zu den identifizierten Oberzentren verschlechtert.

### 7.5 Beschreibung des eingesetzten Monitoringsystems an der Schwelmetalbrücke

An der Schwelmetalbrücke wird mit einem Rissmonitoring die zeitliche Entwicklung der Rissbreiten überwacht. Zum Einsatz kommen dabei analoge und digitale Rissensoren (siehe Bild 68).

Die genaue Lage der Messpunkte ist in [185] dargestellt. Die Messungen mit den Wegaufnehmern erfolgen kontinuierlich. Die Ablesungen an den Rissmonitoren erfolgen wöchentlich.

Zusätzlich zum Rissmonitoring wird eine kontinuierliche Überwachung der Verkehrsbelastung durchgeführt [187].



Bild 68: Übersicht über die eingesetzten Rissmonitore [185]

Parameter & Zufallsvariablen				
ID	Bezeichnung	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung
prmon	Pr[Monitoringergebnis=kritisch]	fix	0.07	0.00

Bild 69: Eingabe in der Registerkarte „Parameter“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

## 7.6 Berechnungen unter Verwendung des Excel-Tools

Mit den zuvor gemachten Informationen kann die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Monitoring-systems berechnet werden. Hierfür wird eine Simulation mit dem in Kapitel 6 vorgestellten Excel-Tools durchgeführt. Die Eingaben in das Tool sind im Folgenden dargestellt und erläutert.

### 7.6.1 Registerkarte „Einstellungen“

Um die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der berechneten Ergebnisse sicherzustellen, wird das Feld „Seed Random Number Generator“ auf der Registerkarte „Einstellungen“ mit 543 belegt. Der Wert von 543 ist willkürlich festgelegt worden.

### 7.6.2 Registerkarte „Parameter“

Für das Beispiel wird lediglich ein Parameter benötigt. Es wird nur die Wahrscheinlichkeit modelliert, dass das Monitoringergebnis je Zeitschritt ein negatives Ergebnis liefert (Bild 69, siehe auch Bild 52 und Erläuterungen hierzu in Kapitel 4.4). Diese Wahrscheinlichkeit wird mit prmon bezeichnet.

Die Wahrscheinlichkeit wird als Parameter modelliert und somit ist die Verteilung „fix“. Der Mittelwert wird zu 0.07 festgelegt. Die Standardabweichung

ist zu Null gesetzt, da die Wahrscheinlichkeit mit einem Parameter beschrieben wird. Der Mittelwert von 0.07 ist ein erster Wert. Er wird später durch die Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit im Rahmen der Optimierung und Berechnung ersetzt. Dieser Wert ist daher hier nicht relevant.

### 7.6.3 Registerkarte „Verkehrsbetriebsszenario“

In dieser Registerkarte werden die Verkehrsbetriebsszenarien eingegeben. Die generellen Szenarien sind in den Tabellen 24 und 25 sowie den Bildern 53 bis 58 definiert.

Die monatlichen Kosten aus dem Betrieb des Monitoring-systems sind in diesem Beispiel zeitlich variabel und abhängig davon, ob beide Teilbauwerke (Teilbauwerk 2 und Teilbauwerk 3) oder nur Teilbauwerk 3 unter Monitoring stehen. Deshalb eignet sich das Feld zur Beschreibung der monatlichen Kosten auf der Registerkarte „Allgemeines“ weniger gut für dieses Beispiel. Die monatlichen Betriebskosten werden daher über die Verkehrsbetriebsszenarien erfasst.

Die Eingabe für das Verkehrsbetriebsszenario ist in Bild 70 dargestellt.

Speziell ist, dass das Monitoring an das Szenario 1 geknüpft ist. Um die beiden erwähnten Monitoring-

Verkehrsbetriebsszenario				
ID	Bezeichnung	einmalige Kosten [€]	laufende Kosten [€/Monat]	
			direkt	indirekt
1	Szenario 1: LKW-Schließung TB2 und TB3	0.00E+00	2.00E+03	6.61E+05
2	Szenario 1: LKW-Schließung TB2 und TB3	0.00E+00	1.40E+03	6.61E+05
3	Szenario 2 & 4: Sperrung TB2 & TB3	0.00E+00	0.00E+00	4.28E+06
4	Szenario 3: Neubau TB2, PKW auf TB3	0.00E+00	0.00E+00	1.68E+06
5	Szenario 5: Neubau TB3	0.00E+00	0.00E+00	1.83E+06
6	Szenario 6: Normalbetrieb	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

Bild 70: Eingabe in der Registerkarte „Verkehrsbetriebsszenario“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

Schwellenwertgruppen für den Fall mit Monitoring						
ID	Bezeichnung (Zustand)	Indikator Wert	Pf	VBS ID	Maßnahme 1 ID	Maßnahme 2 ID
1	kein Problem / kein Handlungsbedarf -> mindestens 1 Teilbauwerk ist neu		1.00E-07	0		
2	TB2 ist in einem problematischen Zustand   TB3 wurde Not-Instandgesetzt	2	1.00E-05	0		
3	TB2 und TB3 sind in einem problematischem Zustand	3	1.50E-05	0		
4	Monitoringergebnis 'negativ' nach Verstärkung von TB3	4	1.00E-07	4		
5	Monitoringergebnis 'negativ' vor Verstärkung von TB3	5	1.00E-07	3	4	

Bild 71: Eingabe auf der Registerkarte „Schwellenwertgruppen“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

szenarien abzudecken, wird deshalb das Szenario 1 zweimal (mit ID 1 und ID 2) definiert. Unterschiedlich hierbei sind die angesetzten Kosten: Für ID 1 wurden 2.000 € für das Monitoring beider Teilbauwerke und für ID 2 wurden 1.400 € für das Monitoring nur eines Teilbauwerks angesetzt (siehe Kapitel 7.3).

Die indirekten Kosten aus der Verkehrseinschränkung ergeben sich aus der Tabelle 26. Für das Szenario 1 werden die Kosten aus der Differenz zwischen den Kosten für Szenario 1 mit dem Basisfall gebildet. Konkret ergeben sich die Tageswerte zu 143.604.390 €/Tag – 143.582.360 €/Tag = 22.030 €/Tag (siehe Tabelle 30). Die monatlichen indirekten Kosten werden aus den täglichen Kosten berechnet: 22.030\*30 = 660.900 €/Monat = 6.61E+5 €/Monat (Bild 70). Die Kosten für die anderen Szenarien ergeben sich analog.

**7.6.4 Registerkarte „Schwellenwertgruppe“**

Um die vorliegende Problemstellung abzudecken werden 5 Schwellenwertgruppen eingeführt (siehe Bild 71). Diese ergeben sich aus der Definition des Entscheidungsproblems (siehe Bild 52), erweitert um die zeitlichen Aspekte.

- (1) Mindestens eines der beiden Teilbauwerke wurde bereits erneuert.
- (2) Teilbauwerk 2 wurde noch nicht erneuert, Teilbauwerk 3 wurde bereits Not-Instandgesetzt.

- (3) Weder Teilbauwerk 2 noch Teilbauwerk 3 wurden bisher erneuert/verstärkt.
- (4) Monitoring lieferte ein kritisches Ergebnis nach der Verstärkung von Teilbauwerk 3.
- (5) Monitoring lieferte ein kritisches Ergebnis vor der Verstärkung von Teilbauwerk 3.

Die Werte der ordinalen Schwellwerte sind im Entscheidungsbaum in Bild 72 zusammengestellt.

Die Indikatorwerte wurden so festgelegt, dass ein Indikatorwert von 1 mit Schwellenwertgruppe 1, ein Indikatorwert von 2 mit Schwellenwertgruppe 2, und so weiter, assoziiert wird.

Für die Schwelmetalbrücke ist das Sanierungskonzept im Fall „mit Monitoring“ als auch im Fall „ohne Monitoring“ zeitlich fest vorgegeben. Die Verkehrsbetriebsszenarien (VBS) werden deshalb für beide Fälle im Maßnahmenkatalog definiert. Einzig für den Fall eines kritischen Monitoringresultats werden explizit VBS 4 und 3 für die Schwellenwertgruppen 4 und 5 definiert. Weiterhin wird, falls Schwellenwertgruppe 5 aktiviert wird, Maßnahme 4 eingeplant. Für die Schwellenwertgruppen 2 und 3 wurde eine jährliche Versagenswahrscheinlichkeit von jeweils 1E-5 und 1.5E-5 festgelegt. Für die anderen Fälle ist eine Versagenswahrscheinlichkeit von 1E-7 pro Jahr festgelegt worden (siehe Tabelle 11).

Die durch Versagen der Brücke entstehenden Kosten werden pauschal mit 1.0E9 € angesetzt. Dieser

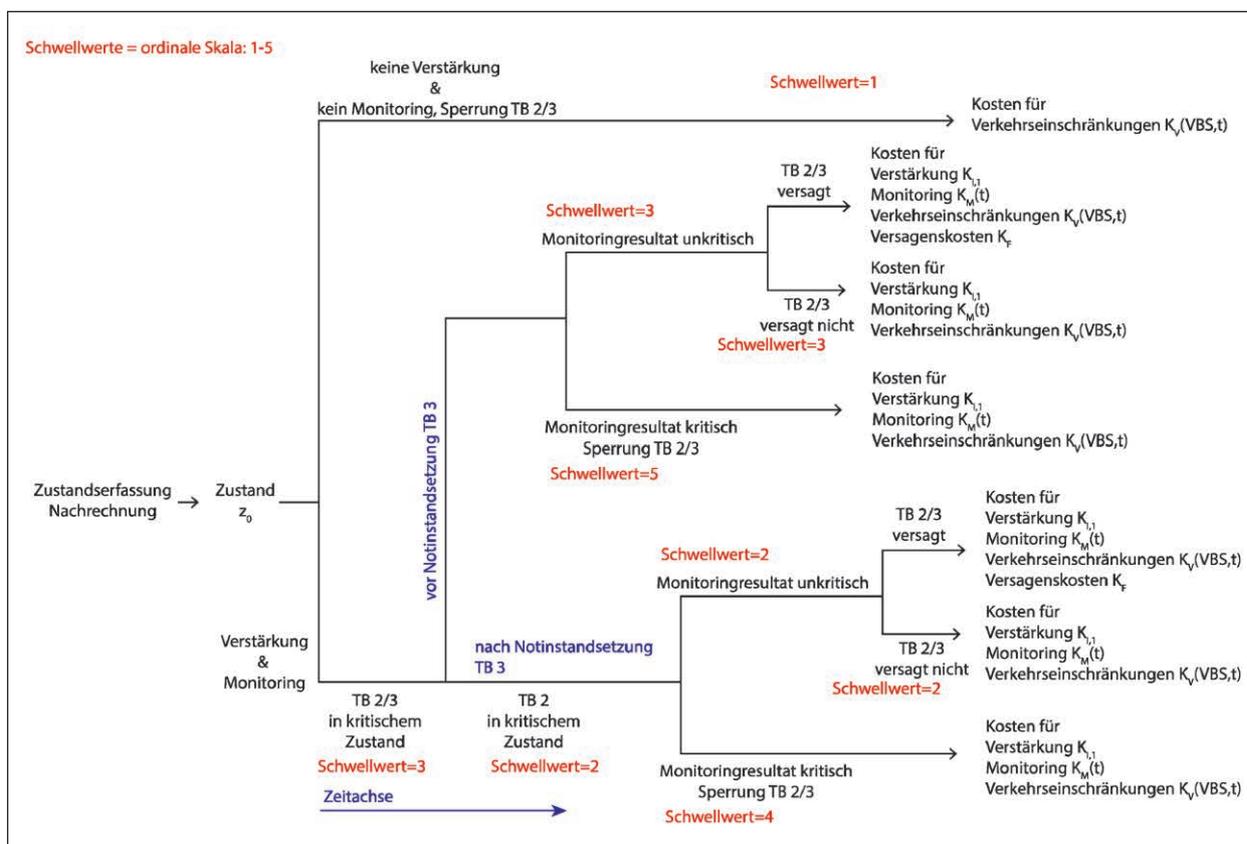


Bild 72: Ereignisbaumdarstellung mit den Schwellwerten für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

Indikatormodell					
ID	Bezeichnung	Modelltyp	Parameter		
1	Monitoring von TB2 und TB3	C	prmon	5,00	1,00
2	Monitoring von TB2	C	prmon	4,00	2,00
3	"kein Monitoring"	C	0,00	20,00	0,00
4					

Bild 73: Eingabe auf der Registerkarte „Indikatormodell“ [eigene Darstellung]

Wert ist hoch gewählt. Die Kosten für Verkehrseinschränkung nach einem Versagen liegen bei rund 288 Mio. € (Annahme 5 Jahre bis zur Fertigstellung des Neubaus). Der Neubau kostet rund 28 Mio. €. Zusätzlich entstehen Kosten durch mögliche Todesfälle und durch Sperrungen an der Bahnlinie, die von der Brücke überquert wird. Ein Wert von 1e9€ ist bewusst sehr hoch gewählt. Folgt man dem Format des Joint Committee on Structural Safety (siehe auch [197]), so lägen die Versagenskosten bei maximal etwa 250 Mio.€. Dies ergibt sich aus der folgenden Formel, in der  $C_0$  die Kosten für einen Neubau sind und  $H$  alle indirekten Kosten die aus dem Versagen resultieren:

$$\rho_{max} = 10 = \frac{C_0 + H}{C_0} \tag{Gl. 58}$$

Bei Werten von  $\rho > 10$  wird davon ausgegangen, dass der Entwurf des Tragwerks nicht robust ist. Die Annahme von 1.0e9 € ist hier als Maximalwert zu verstehen. Er hat jedoch in diesem Beispiel keinen Einfluss auf das Ergebnis.

### 7.6.5 Registerkarte „Indikatormodell“

Die vorliegende Entscheidungssituation wird durch drei Indikatormodelle beschrieben (siehe Bild 73). Alle drei Indikatormodelle basieren auf dem im Excel definierten Modelltyp „C“. D. h., das zugrundeliegende Modell kann zwei Zustände annehmen: Das Monitoringresultat ist entweder unkritisch oder kritisch. Der erste Parameter dieses Modelltyps drückt aus, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Monitoring ein kritisches Resultat liefert, also mit wel-

cher Wahrscheinlichkeit sich der zugrunde liegende Indikatorwert ändert (prmon).

Der zweite Parameter beschreibt den anzusetzenden Indikatorwert im Fall eines kritischen Monitoringresultates (für ID 1 ist dies der Indikatorwert 5). Der dritte Parameter beschreibt das anzusetzende VBS, falls das jeweilige Indikatormodell aktiviert wird. Für die ID 1 ist dies das Szenario 1.

Bei ID 3 findet eine Auswertung in Excel-Tool erst am Ende der Betrachtungszeit statt. In der Zwischenzeit kann sich der Monitoringwert nicht ändern, da kein Monitoring eingesetzt wird. Somit ist der Parameter zu 0 zu setzen. Der zweite Parameter wird künstlich hoch gesetzt auf einen Wert, der grösser ist als der höchste verwendete Wert. Hier wurde ein Wert von 20 gewählt (ein Wert von 6 würde dasselbe Ergebnis liefern), um ein mögliches Fehlverhalten des Tools erkennen zu können. Das VBS kann bei ID 3 auch nicht geändert werden. Somit ist ein Wert von 0 einzutragen. Dies bedeutet, dass diese Eingabe ignoriert wird.

#### **Indikatormodell 1: Monitoring von Teilbauwerk 2 und Teilbauwerk 3**

Dieses Modell wird verwendet, falls die beiden Teilbauwerke Teilbauwerk 2 und 3 gleichzeitig unter Monitoringüberwachung stehen. Dies ist in den ersten 7 Semestern in diesem Beispiel der Fall (siehe Tabelle 25).

Die Wahrscheinlichkeit ein kritisches Monitoringergebnis zu erhalten, entspricht in diesem Fall dem Wert des Parameters „prmon“, welcher auf der Registerkarte „Parameter“ definiert wurde. Falls Monitoring ein kritisches Resultat liefert, wird der Indikatorwert zu 5 gesetzt; d. h., das System wechselt in Schwellenwertgruppe 5 (was heißt, dass Maßnahme 4 eingeplant wird). Wird das Indikatormodell 1 aktiviert, so wird auch VBS 1 aktiviert.

#### **Indikatormodell 2: Monitoring von Teilbauwerk 2**

Dieses Indikatormodell wird verwendet, falls das Monitoringsystem lediglich auf Teilbauwerk 2 aktiv ist (Semester 8-11 im Zeitplan in Tabelle 25).

Die Wahrscheinlichkeit, ein kritisches Monitoringergebnis zu erhalten, entspricht in diesem Fall ebenfalls dem Wert des Parameters „prmon“. Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass beide Teilbauwerke vollständig korreliert sind. Probleme treten stets gleichzeitig und auf beiden Teilbauwer-

ken zusammen auf. Dies ist ein (leicht) konservativer Ansatz, welcher die Modellierung des Problems vereinfacht. Im Fall eines kritischen Monitoringresultates wird der Indikatorwert zu 4 gesetzt; d. h., das System wechselt in Schwellenwertgruppe 4.

Wird das Indikatormodell 2 aktiviert, so wird auch VBS 2 aktiviert.

#### **Indikatormodell 3: „kein Monitoring“**

Dieses Indikatormodell wird verwendet, falls gerade kein Monitoringsystem aktiv ist (Semester 10-24 in Tabelle 25) – und im Fall „ohne Monitoring“. Dementsprechend ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoringresultat kritisch ausfällt auch 0, da in diesem Fall kein Monitoring läuft. Der zweite Parameterwert hat deshalb auch keinen Einfluss auf die Simulation.

#### **7.6.6 Registerkarte „Maßnahmenkatalog“**

Zur Beschreibung des vorliegenden Problems werden 4 Maßnahmen definiert:

- (ID 1) Notinstandsetzung von Teilbauwerk 3 (siehe Semester 8 und 9 im Zeitplan in Tabelle 25),
- (ID 2) Neubau von Teilbauwerk 2 (siehe Semester 12 bis 15 im Zeitplan in Tabelle 25),
- (ID 3) Neubau von Teilbauwerk 3 (siehe Semester 16 bis 19 im Zeitplan in Tabelle 25) und
- (ID 4) gleichzeitiger Neubau von Teilbauwerk 2 und 3 (für den Fall, dass kein Monitoring installiert würde).

Die Eingabe der Maßnahmen im Excel-Tool und die zeitlichen Referenzen sind in Bild 74 und Bild 75 gegeben.

Für den Fall „ohne Monitoring“ wird alleine Maßnahme 4 ausgeführt (ID 4 in Bild 74), d. h. es wird ohne weiteres Monitoring der Neubau der Teilbauwerke durchgeführt. Die Maßnahme startet nach 24 Monaten und dauert 24 Monate. Während der Ausführung der Maßnahme ist VBS ID 3 aktiv (VBS Szenario 2 und 4 siehe Bild 53), d. h. der Verkehr wird nur über Teilbauwerke 1 und 4 geführt. Nach Durchführung der Maßnahme wechselt das VBS auf ID6 (Normalbetrieb ohne Einschränkungen).

Für den Fall „mit Monitoring“ wird zunächst Maßnahme 1 ausgeführt, gefolgt von Maßnahme 2 und 3.

Maßnahmenkatalog								
ID	Bezeichnung der Maßnahme	Kosten [€]	Dauer [Monate]	ID des VBS bei Ausführung	ID des VBS nach Abschluss	Indikator-Wert nach Abschluss	Indikatormodell nach Abschluss	ID Indikatormodell während Ausführung
1	Notinstandsetzung TB3	3.50E+06	12	2	2	2	2	2
2	Neubau TB2	1.40E+07	24	4	5	1	3	
3	Neubau TB3	1.40E+07	24	5	6	1	3	
4	gleichzeitiger Neubau TB2 & TB3	2.80E+07	24	3	6	1	3	
5								
6								
7								

Bild 74: Eingabe der allgemeinen Spalten auf der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

Maßnahmenkatalog							
ID	Bezeichnung der Maßnahme	ohne Monitoring		mit Monitoring			Ende Monitoring
		Beginn von Start [Monate]	Beginn von Start [Monate]	Verzögerung [Monate]	Wiederholung möglich	max. zulässige ID Schwellenwertgruppe bei Ausführung	
1	Notinstandsetzung TB3		42			4	
2	Neubau TB2		66			4	2
3	Neubau TB3		90			4	
4	gleichzeitiger Neubau TB2 & TB3	24		24			1
5							
6							
7							

Bild 75: Eingabe der Zeitplanung auf der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

Die Zeitplanung nach Tabelle 25 wird in dieser Registerkarte über den Beginn von Start abgebildet. Maßnahme 1 wird 42 Monate nach dem Start ausgeführt. Dies entspricht den 7 Semestern in Tabelle 25.

Diese Maßnahmen werden allerdings nur durchgeführt, falls das gleichzeitige Monitoring beider Teilbauwerke nicht kritisch ausgefallen ist, also das System sich nicht in Schwellenwertgruppe 5 befindet. Mit Beginn der Maßnahme 2 wird auch das Monitoring eingestellt. Falls es während dem Monitoring beider Teilbauwerke zu einem kritischen Resultat kommt, werden die beiden Teilbauwerke für den Verkehr gesperrt und es wird der gleichzeitige Neubau der beiden Teilbauwerke mit einer Verzögerung von 24 Monaten eingeleitet.

Während der Durchführung von Maßnahme 1 und nach deren Abschluss wird Indikatormodell 2 aktiviert. Dieses bleibt aktiv, bis Maßnahme 2 gestartet ist.

Die Kosten, die in Bild 74 eingetragen sind, ergeben sich aus den Angaben in Kapitel 7.3. Die Kosten für den Ersatzneubau von Teilbauwerke 2 und 3 von 28 Mio. € werden gleichmäßig mit 14 Mio. € auf die beiden Teilbauwerke aufgeteilt.

Diskontierungsrate [1]	0,02
Monitoring: Installationskosten	9,00E+03
Monitoring: Betriebskosten [€/Monat]	0,00E+00
initialer Indikatorwert für t=0	3,00
ID des initialen Indikatormodell	1
ID des initialen VBS ohne Monitoring	3
ID des initialen VBS mit Monitoring	1
Länge Betrachtungszeitraum [Monate]	114
Länge Zeitschritt [Monate]	1
Anzahl Monte Carlo Samples	1000

Bild 76: Generelle Eingaben zum Projekt in der Registerkarte „Allgemeines“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

### 7.6.7 Registerkarte „Allgemeines“

Die Eingaben auf der Registerkarte „Allgemeines“ sind in Bild 76 und Bild 77 dargestellt. In der Registerkarte „Allgemeines“ werden allgemeine Angaben gemacht. Nach Eingabe der festgelegten Diskontierungsrate werden die Kosten für das Monitoring eingetragen. Die Kosten aus dem laufenden Betrieb des Monitoringsystems sind hier mit 0 € angesetzt. Diese Kosten werden den direkten Kosten für die jeweiligen VBS zugeschlagen. Der Grund hierfür ist, dass sich diese Kosten über die Zeit ändern und dies zeitliche Änderung über die VBS berücksichtigt werden kann.

Expertenschätzung	
Name der Kontrollvariable	prmon
Expertenschätzung: Pr[Monitoring=kritisch]	0.05

Bild 77: Eingabe der Expertenschätzung zur Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoring kritisch ist auf der Registerkarte „Allgemeines“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit	
Grenzwert der Kontrollvariable	0.067382813
untere Schranke (für Grenzwertsuche)	0
obere Schranke (für Grenzwertsuche)	1
zulässiger relativer Fehler [1]	1.00E-04
max. Zahl an zulässigen Iterationsschritten	10

Bild 78: Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit (auf der Registerkarte „Allgemeines“) [eigene Darstellung]

Zusätzlich werden die initialen Indikatormodelle eingegeben. Das anfänglich aktive Indikatormodell ist 1. Der initiale Indikatorwert wird so gewählt, dass das System anfänglich in Schwellenwertgruppe 3 eingestuft wird.

Für den Fall „mit Monitoring“ wird VBS ID 1 aktiviert; ansonsten VBS ID 3. Die Länge des Betrachtungszeitraums ergibt sich mit 114 Monaten aus dem Fall „mit Monitoring“ bei kritischem Monitoringbefund, der einen Neubau zum spätmöglichen Zeitraum auslöst.

Der Wert der Kontrollvariable „prmon“ wurde bereits auf der Registerkarte „Parameter“ festgelegt. Eine bequeme Möglichkeit diesen Wert über die Registerkarte „Allgemeines“ zu verändern, findet sich unter Punkt „Expertenschätzung“. Hierzu wird „prmon“ als Name der Kontrollvariable eingetragen. Bei einer Eingabe eines Wertes im Feld „Expertenschätzung“ wird der Wert des Parameters „prmon“ auf der Registerkarte „Parameter“ automatisch gesetzt und die Simulation mit eben diesem Wert gestartet. In dieser Wahrscheinlichkeit stecken viele Faktoren und kann als das Integral über die Einschätzungen, die Zustandsentwicklung und die Unsicherheit in Bezug auf den Zustand gesehen werden. Diese Wahrscheinlichkeit wurde in diesem Bericht nicht von den Experten/Entscheidungsträgern geschätzt, sondern hier beispielhaft von den Autoren zu 0.05 angenommen. In einer Praxisanwendung würde ein Wert von 0.05 konkret bedeuten, dass der Entscheidungsträger die Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoring ein kritisches Ergebnis liefert, als sehr klein einschätzt.

Expertenschätzung	
Name der Kontrollvariable	prmon
Expertenschätzung: Pr[Monitoring=kritisch]	0,05
Erwarteter Vorteil Monitoring	4,84E+06
Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit	
Grenzwert der Kontrollvariable	0,067382813
untere Schranke (für Grenzwertsuche)	0
obere Schranke (für Grenzwertsuche)	1
zulässiger relativer Fehler [1]	1,00E-04

Bild 79: Ergebnisse auf der Registerkarte „Allgemeines“ [eigene Darstellung]

Auf der Registerkarte „Allgemeines“ wird unter „Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit“ die Ermittlung der Grenzwahrscheinlichkeit gestartet (siehe Bild 78).

## 7.7 Ergebnis und Diskussion

Startet man die Optimierung und bestimmt so die Grenzwahrscheinlichkeit, mit der das Monitoringergebnis einen kritischen Wert liefern könnte, damit die Anwendung noch wirtschaftlich ist, so ergibt sich der Wert der Grenzwahrscheinlichkeit zu 0.067 (siehe Bild 78). Da dieser Wert knapp größer ist als der Wert der Expertenschätzung von  $\text{Pr}[\text{Monitoring kritisch}] = 0.05$ , ist in diesem Fall das Monitoring als wirtschaftlich zu bewerten und die Anwendung zu empfehlen.

Aus der Grenzwahrscheinlichkeit kann abgelesen werden, bis zu welcher Wahrscheinlichkeit eines kritischen Monitoringergebnisses sich das Monitoring wirtschaftlich lohnt.

Im vorliegenden Beispiel ist diese Wahrscheinlichkeit klein und es kann zumindest hinterfragt werden, ob sich bei einer so kleinen Wahrscheinlichkeit ein Entscheidungsträger für das Monitoring entschieden hätte, bzw. eine so kleine Wahrscheinlichkeit geschätzt hätte. In dem vorliegenden Fall kann hiervon ausgegangen werden, da die Kompensationsmaßnahmen (und die Notinstandsetzung) bereits eine deutliche Reduktion der Gefährdung bedeutet.

Der monetäre Vorteil aus der Anwendung des Monitorings bei einer Expertenschätzung von  $\text{Pr}[\text{Monitoring kritisch}] = 0.05$  ergibt sich zu knapp 5 Mio. €, wie aus Bild 79 zu erkennen ist.

Simulationsergebnis: erwartete Kosten			
	ohne Moni	mit Moni	Differenz
total (Summe direkt+indirekt+Versagen)	2,24E+08	2,19E+08	4,84E+06
direkte Kosten	2,64E+07	2,59E+07	4,16E+05
indirekte Kosten	1,97E+08	1,93E+08	4,43E+06

Bild 80: Ergebnisse der geschätzten Kosten [eigene Darstellung]

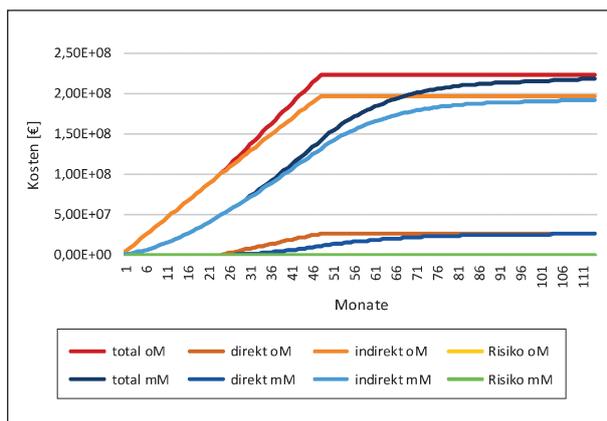


Bild 81: Zeitliche Entwicklung der Kosten im Beispiel der Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

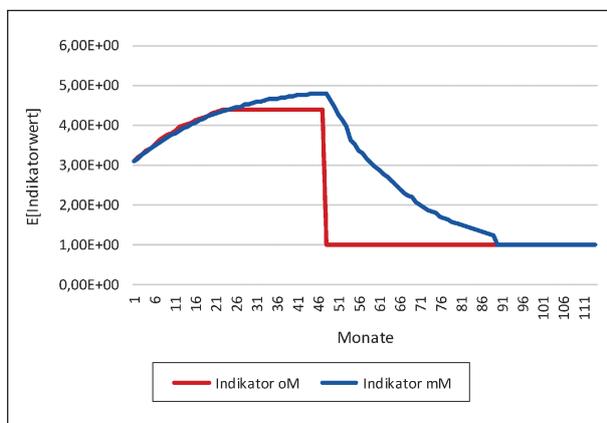


Bild 82: Zeitliche Entwicklung des Schadensindicators im Beispiel der Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]

Es sollte bei der Bewertung des Ergebnisses beachtet werden, dass hier von einer sehr langen Planungsphase ausgegangen wurde, was für das Monitoring eher ungünstig ist. Es wurde mit der tatsächlichen Umsetzungsdauer gerechnet und nicht mit der ursprünglichen Planungsdauer, über die wenig Informationen zur Verfügung standen. Die Verzögerungen im Projekt hängen vermutlich auch mit den positiven Monitoring Ergebnissen zusammen.

In Bild 80 sind erwartete Kosten zusammengestellt. Aus der Differenz kann der Nutzen des Monitorings abgelesen werden. Die indirekten Kosten sind um

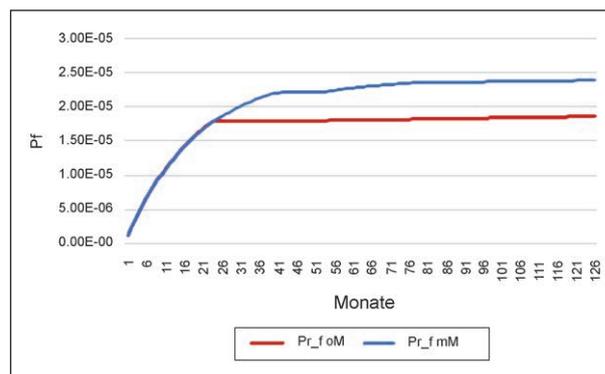


Bild 83: Kumulative Versagenswahrscheinlichkeit [eigene Darstellung]

den Faktor 6 grösser als die direkten Kosten. Diese dominieren die Entscheidung. Die Kosten für das Monitoring spielen daher nur eine geringe Rolle in der Entscheidungsfindung.

Die zeitliche Entwicklung der Kosten ist Bild 81 dargestellt. Auch dort kann gesehen werden, dass die indirekten Kosten die Entscheidungsfindung dominieren.

Die zeitliche Entwicklung des Erwartungswertes des Schadensindicators ist in Bild 82 dargestellt. Ohne Monitoring wird nach 24 Monaten der Neubau realisiert. Nach dem Bau ist der Schadensindikator 1. Im Fall mit Monitoring entwickelt sich der Schadensindikator weiter bis zur Notinstandsetzung nach 48 Monaten. Danach nimmt der Schadensindikator ab, bis beide Teilbauwerke ersetzt wurden.

Bild 83 zeigt die kumulative Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass das Tragwerk innerhalb von n-Monaten versagt. Es ist nur die Versagenswahrscheinlichkeit des geschädigten Tragwerks dargestellt. Hierfür ist Versagenswahrscheinlichkeit nach dem Neubau auf Null gesetzt worden. Die Versagenswahrscheinlichkeit für den Fall mit Monitoring ist leicht grösser als beim Fall ohne Monitoring. Der Grund ist, dass mit Monitoring das geschädigte Tragwerk länger im Einsatz ist und der Neubau später erfolgt.

Das Excel-Tool erlaubt es, auch Sensitivitäten von Eingaben in Bezug auf das Ergebnis zu bestimmen.

In der Registerkarte „Schwellwertgruppe“ wurden Annahmen in Bezug auf die Versagenswahrscheinlichkeiten getroffen worden. Dort wurden Versagenswahrscheinlichkeiten von rund  $10^{-5}$  pro Jahr festgelegt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Risiko infolge Versagens im vorliegenden Beispiel nicht zur Entscheidungsfindung beiträgt. Auch wenn die Versagenswahrscheinlichkeit in einer Größenordnung von  $10^{-3}$  liegen würde, würde sich das Ergebnis in diesem Beispiel nicht verändern.

In Bild 84 ist die Abhängigkeit des erwarteten monetären Vorteils des Monitoringsystems in Abhängigkeit der Einschätzung von  $pr_{mon}$  und des gewählten Diskontierungssatzes dargestellt.

Der Diskontierungssatz spielt eine entscheidende Rolle und die Ergebnisse sind in diesem Beispiel sehr sensitiv in Bezug auf die Wahl des Diskontierungssatzes. Setzt man einen Diskontierungssatz von 2 % an, so liegt die Grenzwahrscheinlichkeit bei etwas über 0,06. Die Grenzwahrscheinlichkeit entspricht dem Nulldurchgang auf der X-Achse in Bild 84. Setzt man einen Diskontierungssatz von 4 % an, so ist bei gegebenen Kosten das Monitoring immer wirtschaftlich, unabhängig vom möglichen Monitoringergebnis. Der erwartete Vorteil durch das Monitoringsystem ist immer positiv.

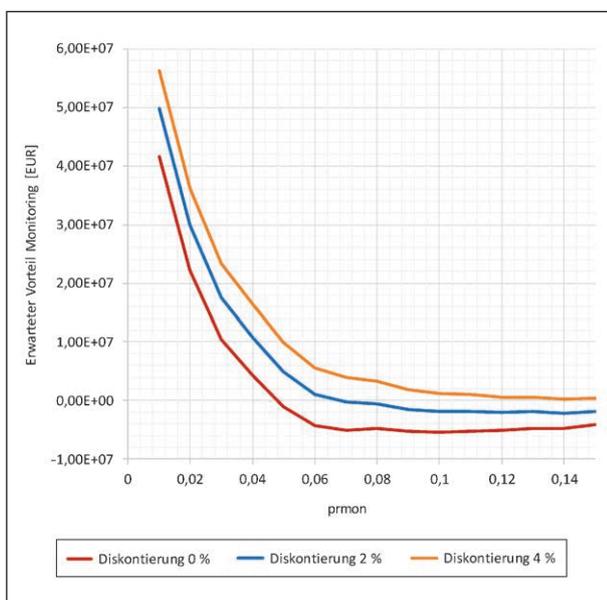


Bild 84: Einfluss des Diskontierungssatzes auf die Grenzwahrscheinlichkeit und die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit [eigene Darstellung]

Dieses Beispiel ist sehr sensitiv in Bezug auf die Einschätzung des Experten und in Bezug auf die Diskontierung.

Bei der Schwelmetalbrücke fallen in beiden Fällen nahezu die gleichen Kosten an. Diese Kosten fallen jedoch in den beiden Fällen (mit und ohne Monitoring) zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten an. Eine Änderung der Diskontierungsrate hat folglich einen entscheidenden Einfluss.

In der Nutzenbestimmung ist der Restwert des Tragwerks in keinem der hier gezeigten Beispiele (siehe auch Kapitel 8) berücksichtigt worden. Eine Berücksichtigung kann erfolgen und führt dazu, dass ein Monitoring eher wirtschaftlich wird.

Ebenso sind die Baukosten über die Bauzeit verteilt. Um den Effekt einer späteren Realisierung berücksichtigen zu können könnte mit dem Baukostenindex gerechnet werden.

## 8 Anwendungsbeispiel Autobahnbrücke Duisburg-Beeck

Als zweites Anwendungsbeispiel wird eine Autobahnbrücke in Duisburg-Beeck betrachtet (siehe Bild 85). Der Querschnitt der Brücke ist schematisch in Bild 86 dargestellt.

Die betrachtete Autobahnbrücke führt über die L 287 (Friedrich-Ebert-Straße) in Duisburg-Beeck (Bauwerksnummer 4506990). Die Brücke wurde 1980 als zweiteiliger Betonhohlkasten über 5 Felder erstellt. Die Brücke wurde in 3 Bauabschnitten mit vollgestoßenen Spanngliedern (100%-Stoß) je Richtungsfahrbahn errichtet.



Bild 85: Autobahnbrücke in Duisburg-Beeck [188]

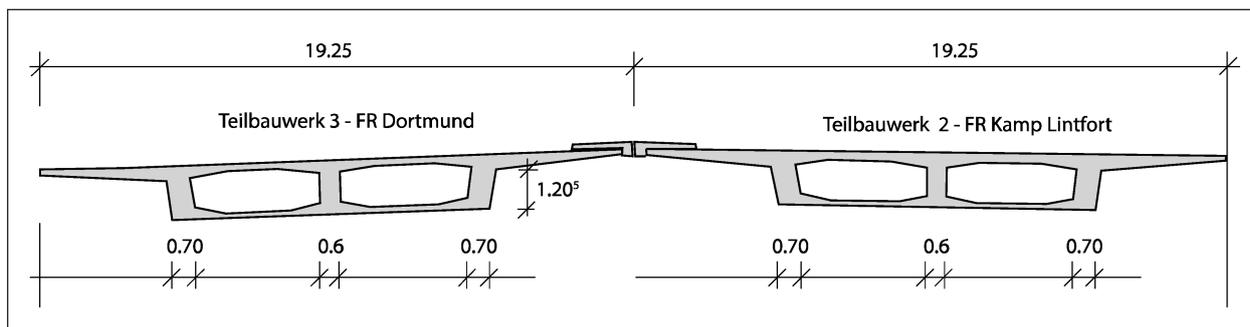


Bild 86: Querschnitt der Brücke in Duisburg-Beeck [188]

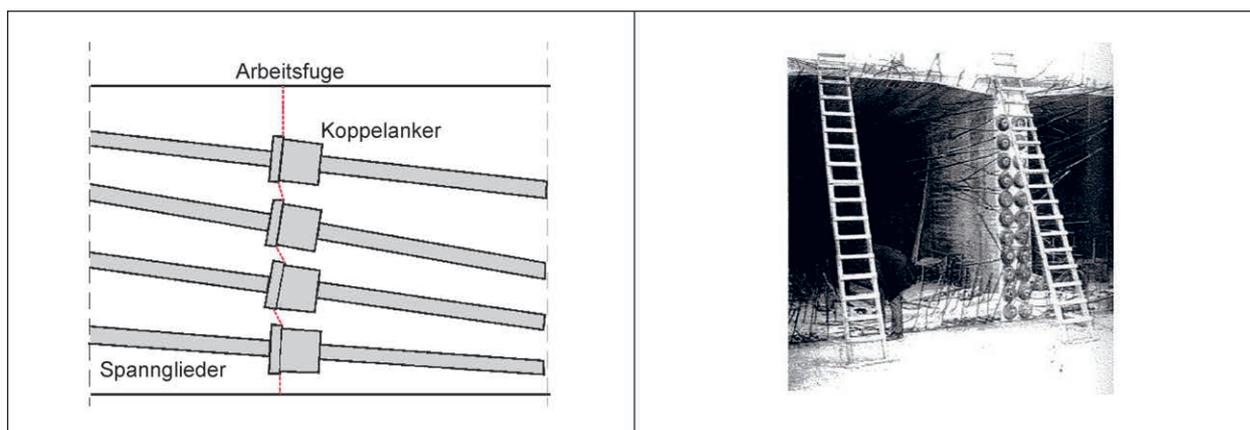


Bild 87: Illustration einer vollgestoßenen Koppelfugen [192]

Die Einzelstützweiten der insgesamt 127 m langen Brücke variieren zwischen 17,70 m und 38,10 m. Die Autobahnbrücke hat eine Gesamtfläche von 2.411 m<sup>2</sup> [188].

Beim Bau der Brücke wurden an den 6 Arbeitsfugen (3 Bauabschnitte je Richtung) alle Spannglieder voll gestoßen und entsprechende Spanngliedkopplungen eingefügt. Zur Bauzeit war es üblich, die Spannglieder an den Arbeitsfugen voll zu stoßen (siehe Bild 87). An diesen Stellen wird an den bereits erhärteten Beton der neue Abschnitt anbetoniert. In der Koppelfuge werden die Vorspannkkräfte als konzentrierte Last über die Spanngliedkopplungen eingetragen.

Damit ist die rechnerische Annahme eines linearen Verlaufs der Normalspannungen nicht mehr gültig. Die mit der technischen Biegetheorie ermittelten Längsspannungen in der Koppelfuge weichen deutlich von den realen Längsspannungen ab. Als Folge von erhöhten lokalen Spannungen können sich Risse in den Koppelfugen bilden. Die Rissbildung wiederum führt zu Reduktion der Spannungen im Beton und zu einer Vergrößerung der Spannungen im Stahl. Neben den höheren Absolutwerten der Span-

nungen im Stahl wachsen auch die Spannungsschwankungen im Spannstahl und damit die potenzielle Ermüdungsbelastung (siehe auch [196]).

Die Kopplungen werden zumeist in den Momentennullpunkten angeordnet, also in den Bereichen, die planmäßig aus ständigen Lasten keine bzw. nur sehr geringe Biegebeanspruchungen aufweisen [189].

Allerdings können auch in diesen Bereichen bspw. Zwangsbeanspruchung aus Temperatur und Stützensenkung, Systemumlagerungen bei feldweisem Vorbau oder Streuungen des Eigengewichts erhebliche außerplanmäßige Biegemomente bewirken [189].

Zur Bauzeit waren mögliche Probleme mit der Spanngliedführung an den Koppelfugen bereits bekannt. Eine Analyse und Handlungsempfehlung fehlten jedoch noch [198], [199]. Die Probleme mit den Koppelfugen werden heute vermieden, in dem ein Teil der Spannglieder umgestoßen durchlaufen.

## 8.1 Verkehr und Verkehrsführung

Der Verkehr wird auf der Brücke mit 3 Spuren in Fahrtrichtung Kamp-Lintfort und mit 3 Spuren in Fahrtrichtung Dortmund geführt. In Richtung Kamp-Lintfort befindet sich die Rheinbrücke zwischen Duisburg-Baerl und Duisburg-Beeckerwerth in einer Entfernung von rund 3 km.

Die Verkehrsbelastung auf der A 42 liegt im Bereich des Bauwerkes bei bis zu 58.000 Kfz/d und einem Schwerlastanteil von 6.000 Kfz SV/d.

## 8.2 Schädigungen und Abweichungen von der Norm

Alle Spannglieder wurden an den 6 Arbeitsfugen gestoßen und die Spannglieder entsprechend gekoppelt (100%-Stoß). Die Problematik der voll gestoßenen Koppelfugen an der Brücke wird durch den schlechten Untergrund noch verschärft. Die Lager haben sich verschoben, was zu einer Umlagerung der Momente geführt hat. An zwei der Koppelfugen im Bauwerk wurden bei der periodischen Hauptprüfung 2004 Risse festgestellt [200], die sich jedoch bis 2010 nicht verändert haben. In Bild 88 sind die gerissenen Koppelfugen dargestellt.

Im Jahr 2014 wurde eine Nachrechnung durchgeführt. Eine Erbringung des Nachweises der Tragfähigkeit ohne Verstärkungen war nicht möglich. Ein rechnerischer Nachweis ohne Verstärkung ist bei Brücken mit voll gestoßenen Arbeitsfugen nach [195] i. d. R. nicht möglich, wie [189] zu entnehmen ist.

Aus der Nachrechnung wurde ein Konzept für die Verstärkung entwickelt. Ziel war es, die Brücken-

klasse 60 (BK 60) zu erreichen, insbesondere, da die Brücke ein Zubringer zur Rheinbrücke ist.

Durch die spezielle Geometrie der Brücke (flacher Hohlkasten siehe Bild 86) war es nur möglich, eine zusätzliche externe Vorspannung von max. 18 MN aufzubringen. Trotz dieser zusätzlichen externen Vorspannung konnte der rechnerische Nachweis der BK 60 nicht erbracht werden, es konnte lediglich BK 45 nachgewiesen werden. Bei der BK 45 kann der normale Pkw- und Lkw-Verkehr die Brücke uneingeschränkt nutzen, nur genehmigungspflichtige Großraum und Schwertransporte benötigen eine Bewilligung zur Befahrung der Brücke im Einzelfall.

Neben der Koppelfugenproblematik sind an der Brücke andere Schäden vorhanden, die es erforderlich machen, die Brücke instandzusetzen. Für die Instandsetzung muss eines der Teilbauwerke für den Verkehr gesperrt werden und der gesamte Verkehr in einer 4+0 Verkehrsführung über das andere Teilbauwerk geleitet werden.

## 8.3 Entscheidungssituation

Ziel ist, dass alle Brücken im Autobahnnetz die Anforderungen an die BK 60 erfüllen. Dies war bei der Brücke in Duisburg-Beeck trotz der Verstärkung nicht gegeben. Bei den letzten beiden Hauptprüfungen wurde gesehen, dass sich die Risse nicht verändern. Dies könnte ein Hinweis sein, dass die Schädigung gestoppt wurde. Wenn nachgewiesen werden könnte, dass es in der Koppelfuge keine ermüdungsrelevanten Spannungsspiele, dann könnte die Freigabe für die BK 60 erfolgen. Dieser Nachweis könnte mit einem Monitoring System erbracht werden.



Bild 88: Gerissene Koppelfugen: Querrisse, Breite 0,1 mm, Länge: 40,0 cm an zwei Koppelfugen [200]



	FR	Verkehr	Teilbauwerk	
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 60
FR Kamp Lintfort	←	Pkw	2	BK 60
FR Dortmund	→	Pkw	2	BK 60
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	2	BK 60
	○		3	
	○		3	
	○		3	

Bild 91: Verkehrsszenario 7 während des Neubaus des südlichen Teilbauwerks [eigene Darstellung]

	FR	Verkehr	Teilbauwerk	BK
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 60
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 60
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 60
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 60
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 60
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 60

Bild 92: Verkehrsszenario 1 nach einem möglichen Neubau der Autobahnbrücke [eigene Darstellung]

	FR	Verkehr	Teilbauwerk	BK
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 45
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 45
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 45
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 45
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 45
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 45

Bild 93: Verkehrsszenario 2 während der Verstärkung der Brücke (noch ohne Instandsetzung und Monitoring) [eigene Darstellung]

	Monate																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Verstärkung (externe Vorspannung)																												
Instandsetzung südlicher Teil (TB 3)																												
Instandsetzung nördlicher Teil (TB 2)																												
Monitoring																												
Verkehr	6 spurig, BK 45						4+0, BK 45						4+0, BK 45						6 spurig, BK 45						6 spurig, BK 60			
Szenario	Szenario 2						Szenario 3						Szenario 4						Szenario 2						Szenario 1			

Tab. 35: Zeitplan mit den verschiedenen Verkehrsszenarien [eigene Darstellung]

### 8.3.2 Entscheidungssituation – Monitoring

Trifft man die Entscheidung für das Monitoring und die Verstärkung, so ergibt sich das folgende Vorgehen und folgender Zeitplan (Tabelle 35).

Zunächst ist geplant die Brücke mit externer Vorspannung zu verstärken. Die Verstärkungsmaßnahme kann in einem Zeitraum von 6 Monaten umgesetzt werden. Die Verstärkungsmaßnahme kann unter Verkehr erfolgen. In dieser Zeit ist die Brücke in BK 45 eingestuft, d. h. es gibt Einschränkungen

für genehmigungspflichtige Großraum und Schwertransporte. Das Verkehrsszenario ist in Bild 93 dargestellt.

Anschließend wird der südliche Teil der Brücke instandgesetzt und der Verkehr wird über den nördlichen Teil mit einer 4+0 Verkehrsführung geführt. Die Instandsetzung dauert rund 6 Monate. In dieser Zeit beginnt das Monitoring. Das Verkehrsszenario für diese Zeit ist in Bild 94 dargestellt. In dieser Zeit ist das Monitoringsystem installiert und die Rissbreiten in den Koppelfugen werden überwacht.

	FR	Verkehr	Teilbauwerk	BK
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 45
FR Kamp Lintfort	←	Pkw	2	BK 45
FR Dortmund	→	Pkw	2	BK 45
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	2	BK 45
	○		3	
	○		3	
	○		3	

Bild 94: Verkehrsszenario 3 während der Instandsetzung südlicher Teil (Monitoring) [eigene Darstellung]

	FR	Verkehr	Teilbauwerk	BK
	○		2	
	○		2	
	○		2	
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	3	BK 45
FR Kamp Lintfort	←	Pkw	3	BK 45
FR Dortmund	→	Pkw	3	BK 45
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 45

Bild 95: Verkehrsszenario 4 während der Instandsetzung nördlicher Teil (Monitoring) [eigene Darstellung]

	FR	Verkehr	Teilbauwerk	BK
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 45
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 45
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 45
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 45
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 45
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 45

Bild 96: Verkehrsszenario 2 nach Abschluss der Arbeiten mit weiterer Überwachung (Monitoring) [eigene Darstellung]

	FR	Verkehr	Teilbauwerk	BK
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 60
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 60
FR Kamp Lintfort	←	Pkw + Lkw	2	BK 60
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 60
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 60
FR Dortmund	→	Pkw + Lkw	3	BK 60

Bild 97: Verkehrsszenario 1 nach Abschluss der Arbeiten und erfolgreichem Monitoring [eigene Darstellung]

Nach erfolgreicher Instandsetzung des südlichen Teils wird über einen Zeitraum von 6 Monaten der nördliche Teil der Brücke instandgesetzt und der Verkehr wird über den nördlichen Teil geleitet. Das Verkehrsszenario ist in Bild 95 gezeigt.

Sind beide Teilbauwerke instandgesetzt, so kann die Brücke wieder mit 6 Spuren an den Verkehr übergeben werden. Zu diesem Zeitpunkt ist die BK

60 noch nicht erreicht. Die Koppelfugen werden weitere 5 Monate überwacht (Bild 96).

Bei einem erfolgreichen Monitoring, d. h. es ist nachgewiesen, dass es keine ermüdungsrelevanten Spannungsschwankungen im Tragwerk gibt, kann die Brücke in BK 60 eingestuft werden und es bestehen keine Einschränkungen für den Verkehr (Bild 97).

Der zuvor dargestellte Zeitplan geht davon aus, dass das Monitoring erfolgreich ist. Dies ist jedoch a priori nicht bekannt. Es besteht demnach eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoring zeigt, dass ermüdungsrelevante Spannungen vorhanden sind und das Ziel nicht erreicht wird.

Wenn das Monitoring zeigen würde, dass ermüdungsrelevante Rissöffnungen vorhanden sind, hätte man z. B. die Lasten ab einer bestimmten Temperatur (z. B. 30 °C) oder dauerhaft für den Schwerverkehr sperren müssen, oder den Schwerverkehr auf spät abends/nachts verlagern wo die Temperaturen niedriger sind. Das wäre jedoch nur eine mittelfristige Lösung gewesen, da die Brücke ein Zubringer auf die Rheinbrücke ist und damit von hoher Bedeutung. Bei ermüdungsrelevanten Rissöffnungen wäre ein Neubau alternativlos gewesen.

Für diesen Fall würde im Zeitplan, der in Tabelle 35 dargestellt ist, nach Monat 23 die Einschränkung bei BK 45 bleiben. Anschließend müsste der Neubau geplant und umgesetzt werden. Für die Planungsphase wird eine Dauer von einem Jahr angenommen, die Bauausführung dauert drei Jahre. Die Umsetzung erfolgt daher analog zum Zeitplan in Tabelle 34.

### 8.3.3 Bautechnische Kosten und Monitoringkosten<sup>20</sup>

Zusammen mit Aufwendungen für Verkehrsführung, Baustelleneinrichtung usw. ergeben sich geschätzte Kosten für die Verstärkung und Instandsetzung von 2.793.000 €. Für das Monitoring fallen Installationskosten von 79.800 € an und für den Unterhalt, Ablesen und die Dokumentation nochmal 5.950 € im Monat.

Die Kosten für einen Ersatzneubau inkl. Abriss und Entsorgung des bestehenden Tragwerks für Teilbauwerk 2 und 3 betragen geschätzt 12,45 Mio. €. Die Kosten für den Ersatzneubau sind hier vergleichsweise hoch. Ein Grund hierfür sind die schwierigen Gründungsverhältnisse.

Es wird ein Zinssatz verwendet, der die Zeitpräferenz berücksichtigt. Dieser liegt derzeit bei etwa 1,7 – 2 %. Daher wird diesem Beispiel wird ein Zinssatz von 2 % verwendet.

## 8.4 Volkswirtschaftliche Kosten aus Verkehrseinschränkungen

Für die Brücke in Duisburg-Beeck werden die Kosten aus Verkehrseinschränkungen genauso berechnet, wie im Beispiel der Schwelmetalbrücke. Es wird in den meisten folgenden Kapiteln daher auf die entsprechenden Kapitel im Beispiel Schwelmetalbrücke verwiesen.

### 8.4.1 Datengrundlage: Verkehrsmodell PTV Visum

Die Datengrundlage ist in Kapitel 7.4.2 beschrieben.

Im Netz sind für die Brücke in Duisburg-Beeck je die Teilbauwerksstrecken gekennzeichnet, auf denen die Kapazität, Höchstgeschwindigkeit sowie erlaubte Verkehrsträger eingestellt werden können und je nach Szenario modifiziert werden (siehe Tabelle 36).

### 8.4.2 Operationalisierung der identifizierten Maßnahmen als Szenarien im Verkehrsmodell

Die in den Bildern 90 bis Bild 97 sowie in Tabelle 35 definierten Verkehrsszenarien sind in Tabelle 36 für das Verkehrsmodell operationalisiert.

### 8.4.3 Berechnung der gesamtwirtschaftlichen Kosten unterschiedlicher Szenarien

Die Berechnungsvorschriften der einzelnen Indikatoren werden in Kapitel 7.4.3 beschrieben und werden hier nicht nochmal beschrieben, wenn diese gleichbleiben.

Für die Erreichbarkeit ergibt sich die Spinnenbetrachtung der Wege über die Bauwerke und der geografischen Lage der Bezirke über folgende Beziehungen, die in die Bewertung mit einbezogen werden:

Brücke Duisburg – Beeck
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Duisburg → Krefeld</li> <li>• Wesel → Krefeld</li> <li>• Oberhausen → Krefeld</li> <li>• Recklinghausen → Krefeld</li> </ul>

Es wurden nur die Szenarien mit den stärksten verkehrlichen Auswirkungen betrachtet.

<sup>20</sup> Die in diesem Beispiel verwendeten Kosten sind von Straßen.NRW für dieses Projekt zur Verfügung gestellt worden.

A42/L287, AS Duisburg-Beeck (5)					
Verkehrsführung		Anzahl Fahrspuren je Richtung	Kapazität (in Pkw-E/h und Richtung)	Zul. Höchst- geschwindigkeit	Fahrverbote und Sonstiges
Szenario 1 (Basisfall)	FR Kamp-Lintfort	3	5250	120	--
	FR Dortmund	3	5250		--
Bestehende Verkehrs- einschränkungen		Keine			
Szenario 2	FR Kamp-Lintfort FR Dortmund	3 3	5250 5250	120	Teilbauwerk 2 und 3: Sperrung für Sonder- schwertransport bei hohen Temperaturen
Szenario 3	FR Kamp-Lintfort FR Dortmund	2 2	2975 2975	80	Teilbauwerk 3 komplett gesperrt; Sperrung für Sonderschwertransport
Szenario 4	FR Kamp-Lintfort FR Dortmund	2 2	2975 2975	80	Teilbauwerk 2 komplett gesperrt
Szenario 5	FR Kamp-Lintfort FR Dortmund	3 3	5250 5250	120	Teilbauwerk 2 und 3: Sperrung für Sonder- schwertransport
Szenario 6	FR Kamp-Lintfort FR Dortmund	2 2	2975 2975	80	Sperrung Teilbauwerk 2 + Sperrung Teilbauwerk 3 für Sonderschwertrans- port
Szenario 7	FR Kamp-Lintfort FR Dortmund	2 2	2975 2975	80	Teilbauwerk 3 komplett gesperrt

Tab. 36: Verkehrsszenarien für AS Duisburg-Beeck (5) [eigene Darstellung]

#### 8.4.4 Ergebnisse des Verkehrsmodells für die Brücke in Duisburg-Beeck

Bei der Brücke Duisburg-Beeck wurde die (teilweise) Sperrung des Sonderschwertransportes nicht im Verkehrsmodell abgebildet, sondern im Nachgang mit den Kosten für den Lkw-Transport verrechnet. Dies wurde durchgeführt, indem aus den Ergebnissen des Szenario 3 die Kosten einer Brückenteilspernung für den Lkw-Verkehr hochgerechnet und wiederum davon ein Anteil von 0,18 % für den Sonderschwerverkehr abgespalten wurde, da

keine genauen Daten zu Fahrten des Sonderschwerverkehrs über die Brücke Duisburg-Beeck ermittelt werden konnten. Der Wert von 0,18 % ist aus [201] abgeleitet worden. In [201] ist für eine Spannbetonbrücke mit Plattenbalkenquerschnitt im Zuge der BAB A 3 der Anteil des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs ermittelt worden.

Für die jeweiligen Szenarien bleiben somit die Kosten für den Pkw und Lkw (außer Sonderschwerverkehr) identisch, und es kommen nur die zusätzlichen Kosten für die Umwegfahrten des Sonder-

schwertransports hinzu. Die Tabelle 37 gibt einen Überblick über die Tageswerte der Kosten für die Brücke Duisburg-Beeck. Auch hier ist der Anteil der Lärmkosten deutlich geringer im Vergleich zu den anderen Indikatoren.

Wie der Vergleich der Kostenveränderung der Szenarien zum Basisfall (Szenario 1) in Bild 98 verdeutlicht, gibt es nur leichte Veränderungen im Szenario 2 und 5, da dort lediglich (teilweise) Sperrungen für den Sonderschwerverkehr als verkehrliche Einschränkungen eingesetzt werden, während im Szenario 3, 4 und 6 ein Teilbauwerk kom-

plett gesperrt und dadurch die Kapazität der Fahrstreifen reduziert wird. Die Szenarien unterscheiden sich jedoch nicht in ihren Kosten, da keine Richtungssperrung vorliegt und bei allen Szenarien dieselbe Anzahl an Fahrspuren und Kapazität für beide Fahrrichtungen verbleiben. Das Ausmaß der Kostenveränderung ist zudem kaum spürbar, da hier lediglich eine zusätzliche Sperrung des Sonderschwerverkehrs vorgenommen wurde und der Anteil dieses Verkehrs am täglichen Lkw-Verkehr nur sehr gering ist.

Brücke Duisburg-Beeck							
Indikator	Kosten in (€)						
	Szenario 1 (Basisfall)	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6	Szenario 7
Reisezeit	49.516.130	49.516.205	49.548.085	49.548.085	49.516.205	49.548.085	49.548.010
Betriebskosten	69.122.027	69.122.585	69.133.348	69.133.348	69.122.585	69.133.348	69.132.790
Klimaschutz/Luftverschmutzung	11.541.287	11.541.965	11.556.861	11.556.861	11.541.965	11.556.861	11.556.183
Unfälle	11.351.592	11.351.591	11.352.612	11.352.612	11.351.591	11.352.612	11.352.613
Lärmschutz	2.051.329	2.051.314	2.050.996	2.050.996	2.051.314	2.050.996	2.051.010
<b>Summe</b>	<b>143.582.365</b>	<b>143.583.661</b>	<b>143.641.902</b>	<b>143.641.902</b>	<b>143.583.661</b>	<b>143.641.902</b>	<b>143.640.606</b>
Differenz zum Basisfall	0	1.296	59.537	59.537	1.296	59.537	58.241

Tab. 37: Absolute Tageswerte der Kosten für die Szenarien der Brücke Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

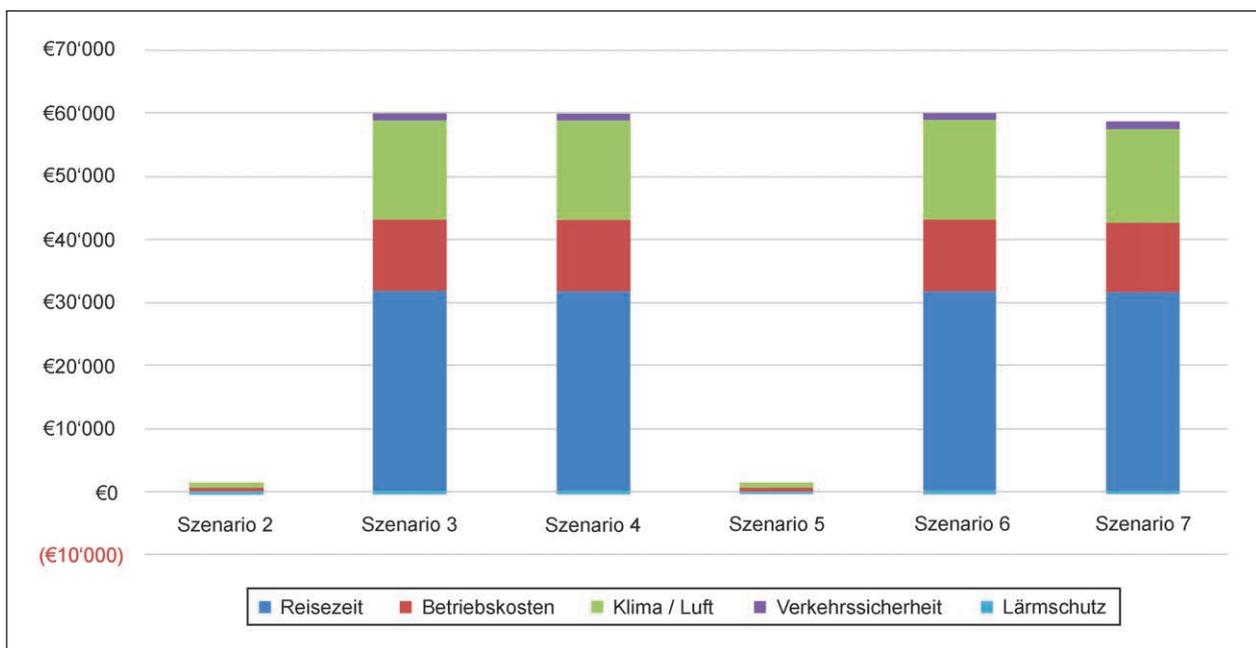


Bild 98: Kostenveränderung zwischen den Szenarien und dem Basisfall (keine verkehrliche Einschränkung) der Brücke Duisburg-Beeck pro Tag [eigene Darstellung]

### 8.4.5 Veränderungen der Erreichbarkeiten

Wie bereits erwähnt, wurde die Veränderung der Erreichbarkeiten zwischen dem Szenario Basisfall und dem Szenario mit den stärksten verkehrlichen Einschränkungen berechnet. Dadurch, dass die Brücke nur Teilspernungen und keine Vollsperrungen aufweisen, sind die Veränderungen der Erreichbarkeiten erwartungsgemäß gering.

Als Gewichtung wurden beim Personenverkehr die Einwohnerzahlen herangezogen und beim Güterverkehr das Bruttoinlandsprodukt je Stadt in Mio. €. Bei der Berechnung der Erreichbarkeit ist es ebenfalls möglich, mit anderen Zahlen die Reisezeit zu gewichten. Es muss jedoch immer beachtet werden, dass von einer potenziellen Größe bzw. Erreichbarkeit ausgegangen wird.

Bild 99 zeigt die geografischen Positionen der einzelnen Oberzentren und die Brücke. Die Werte sind jeweils als Tageswerte eines durchschnittlichen Werktags zu verstehen (Tabelle 38).

Bei der Teilspernung, die im Verkehrsmodell durchgeführt wurde, ergaben sich nur geringfügige Veränderungen in der Reisezeit zwischen Krefeld und den weiteren Oberzentren, wie Bild 100 verdeutlicht. Tabelle 38 stellt den Input aus dem Verkehrs-

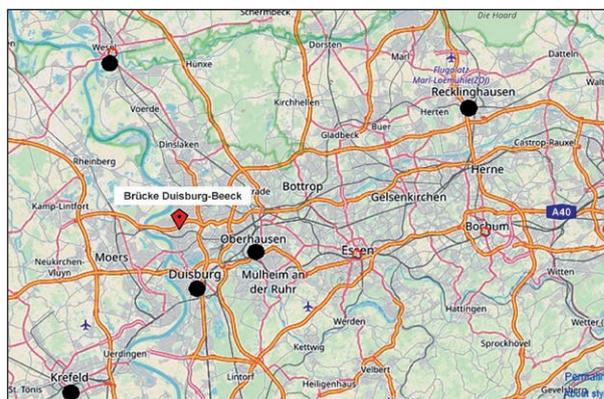


Bild 99: Oberzentren für die Brücke Duisburg-Beeck [Quelle: ©OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA]

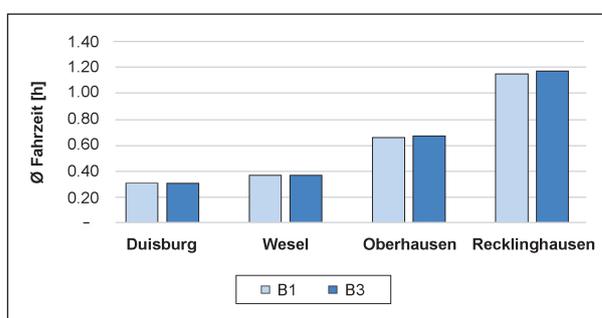


Bild 100: Vergleich der durchschnittlichen Fahrzeit in den Szenarien B1 (Basisszenario) und B3 (Teilspernung) von Krefeld zu den jeweiligen Oberzentren [eigene Darstellung]

	Pkw			
	Von	Nach	Anzahl	Zeit (Fz/h)
B1	Krefeld	Duisburg	12.859,31	3.927,73
	Krefeld	Wesel	13.021,42	4.762,17
	Krefeld	Oberhausen	510,28	337,39
	Krefeld	Recklinghausen	449,72	516,06
B3	Krefeld	Duisburg	12.859,31	3.956,52
	Krefeld	Wesel	13.021,42	4.756,79
	Krefeld	Oberhausen	510,28	343,72
	Krefeld	Recklinghausen	449,72	524,82
	Lkw			
	Von	Nach	Anzahl	Zeit (Fz/h)
B1	Krefeld	Duisburg	1.143,60	599,32
	Krefeld	Wesel	663,21	397,25
	Krefeld	Oberhausen	49,97	38,9
	Krefeld	Recklinghausen	241,31	315,49
B3	Krefeld	Duisburg	1.143,60	601,11
	Krefeld	Wesel	663,21	395,48
	Krefeld	Oberhausen	49,97	39,07
	Krefeld	Recklinghausen	241,31	315,89

Tab. 38: Anzahl der Pkw- und Lkw-Fahrten sowie Reisezeit in Fz/h aus Visum zwischen den Oberzentren für die Brücke Duisburg-Beeck und alle betrachteten Szenarien [eigene Darstellung]

	von	nach	Einwohner	BIP (Mio. €)	Ø Fahrzeit Pkw	Ø Fahrzeit Lkw
B1	Krefeld	Duisburg	491.231	16.667	0,31	0,52
		Wesel	60.750	12.763	0,37	0,60
		Oberhausen	210.934	5.864	0,66	0,78
		Recklinghausen	114.330	15.118	1,15	1,31
Erreichbarkeitsmaß B1 (Basisszenario)					0,505	0,046

Tab. 39: Erreichbarkeitsmaß für Pkw und Lkw für das Szenario B1 der Brücke Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

	von	nach	Einwohner	BIP (Mio. €)	Ø Fahrzeit Pkw	Ø Fahrzeit Lkw
B3	Krefeld	Duisburg	491.231	16.667	0,31	0,53
		Wesel	60.750	12.763	0,37	0,60
		Oberhausen	210.934	5.864	0,67	0,78
		Recklinghausen	114.330	15.118	1,17	1,31
Erreichbarkeitsmaß B3 (Teilspernung)					0,512	0,046

Tab. 40: Erreichbarkeitsmaß für Pkw und Lkw für das Szenario B3 der Brücke Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

modell dar, der zu Berechnung des Erreichbarkeitsmaß verwendet wurde. Dadurch, dass die (gewichtete) Reisezeit in der Erreichbarkeitsberechnung berücksichtigt wird, ergibt sich nur eine kleine (bei Pkw) bis keine Veränderung im Erreichbarkeitsmaß, wie die Tabelle 39 und Tabelle 40 darstellen. Die Lage der Brücke Duisburg-Beeck lässt vermuten, dass ausreichend Ausweichrouten vorhanden sind, die genutzt werden können, um von Krefeld zu den jeweiligen betrachteten Oberzentren zu gelangen.

## 8.5 Monitoring

Der rechnerische Nachweis der Ermüdungsfestigkeit allein auf Basis von Normwerten führt oftmals zu einem Negativbefund, der durch das tatsächliche Tragverhalten widerlegt wird [189]. Daher ist es sinnvoll, die rechnerische Nachweisführung auf Grundlage von am Bauwerk ermittelten Messwerten zu führen [189].

Für einen rechnerischen Nachweis der Koppelfugen ist die Kenntnis der auftretenden Spannungsschwingbreiten und insbesondere deren Auftretenshäufigkeit erforderlich. Nur falls das Bauteil in diesem Bereich in den gerissenen Zustand (Zustand II) übergeht, wird die Belastung ermüdungsrelevant [189]. Deshalb sind lediglich die Schwingspiele bei einer gerissenen Koppelfuge ermüdungsrelevant. Das primäre Ziel ist es demnach festzustellen, in

welchen Zeiträumen die Fugen geöffnet sind und wie viele Schwerverkehrsüberfahrten in diesen Zeiträumen stattgefunden haben [189].

Ob eine Fuge tatsächlich geöffnet ist, lässt sich über eine Doppelmessung feststellen. Dabei werden Wegaufnehmer direkt über der Koppelfuge appliziert und mit Wegaufnehmern aus einem unmittelbar danebenliegenden ungerissenen Bereich verglichen. Bei einer geöffneten Koppelfuge sind die Messwerte um ein Vielfaches höher als in den ungerissenen Bereichen. Hieraus lässt sich die Rissöffnung ableiten.

Für das Monitoring wird das Rissöffnungsverhalten der Koppelfugen mit einer Monitoringanlage bestehend aus 26 Temperatursensoren und 18 Wegaufnehmern überwacht. Die rechnerische Schwingbreite und Rissdoppelamplitude ist abhängig vom Grundmoment. Die Temperatursensoren sind notwendig, um später das tatsächliche Grundmoment zu ermitteln [189].

## 8.6 Berechnungen unter Verwendung des Excel-Tools

Mit den zuvor zusammengestellten Informationen wird die Wirtschaftlichkeit der Monitoringmaßnahme unter Verwendung des Excel-Tools beurteilt. In den folgenden Kapiteln wird die Eingabe des Beispiels und die Berechnung dargestellt.

### 8.6.1 Registerkarte „Einstellungen“

Um die Vergleichbarkeit der berechneten Ergebnisse sicherzustellen, wird das Feld „Seed Random Number Generator“ auf der Registerkarte „Einstellungen“ mit 543 belegt.

### 8.6.2 Registerkarte „Parameter“

Zur Modellierung der Brücke in Duisburg-Beeck wird wie bei der Schwelmebrücke ebenfalls nur ein Parameter benötigt. Dieser Parameter beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit welcher das Monitoringsystem je Zeitschritt ein kritisches Ergebnis liefert. Der Mittelwert von 0,07 ist ein erster Wert, welcher später im Ergebnis berechnet wird (siehe Bild 101).

### 8.6.3 Registerkarte „Verkehrsbetriebsszenario“

In dieser Registerkarte sind die Verkehrsbetriebsszenarien, die für dieses Beispiel definiert wurden, eingetragen (Bild 102). Die VBS entsprechen den Szenarien aus Bild 90 bis Bild 97 sowie Tabelle 35.

Die indirekten Kosten ergeben sich aus den Verkehrseinschränkungen. Diese Kosten ergeben sich aus Tabelle 37 aus der Differenz der Kosten der einzelnen Szenarien zum Basisfall. Tabelle 37 sind Tageswerte gegeben, die durch Multiplikation mit dem Faktor 30 auf Monatswerte umgerechnet werden.

Die direkten laufenden Kosten entsprechen den monatlichen Kosten für das Monitoring von 5.950 € (siehe Kapitel 8.3.3). Diese Kosten sind denjenigen Verkehrsbetriebsszenarien zugeordnet, in denen das Monitoring betrieben wird. Da das Monitoring nicht durchgehend betrieben wird, wird auch in diesem Beispiel das Feld zur Beschreibung der monatlichen Kosten auf der Registerkarte „Allgemeines“ nicht verwendet. Stattdessen werden die monatlichen Betriebskosten über die Verkehrsbetriebsszenarien erfasst.

Speziell ist, dass das Monitoring an das Szenario 2 und 4 geknüpft ist. Szenario 4 tritt nur in Verbindung mit Monitoring auf; die monatlichen Kosten aus Monitoring werden hier als direkte Kosten angesetzt. Szenario 2 tritt sowohl mit als auch ohne Monitoring auf. Deshalb wird das Szenario 2 zweimal (mit ID 2 und ID 5) definiert. Nur für das VBS mit ID 5 werden die anfallenden Monitoringkosten angesetzt.

### 8.6.4 Registerkarte „Schwellenwertgruppe“

Um die vorliegende Problemstellung abzudecken werden 3 Schwellenwertgruppen eingeführt, die ordinal die Schwere der Schädigung zuordnen. Die folgenden 3 Schwellenwerte sind definiert worden (siehe auch Bild 103):

- (1) Es liegt kein Problem vor, weil entweder das Monitoring erfolgreich abgeschlossen wurde oder weil der Ersatzneubau fertiggestellt wurde.

Parameter & Zufallsvariablen				
ID	Bezeichnung	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung
prmon	Pr[Monitoringergebnis=kritisch]	fix	0.07	0.00

Bild 101: Eingabe in der Registerkarte „Parameter“ für die Autobahnbrücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

Verkehrsbetriebsszenario				
ID	Bezeichnung	einmalige Kosten [€]	laufende Kosten [€/Monat]	
			direkt	indirekt
1	S1: Normalbetrieb ohne Einschränkungen	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	S2a: externe Vorspannung	0.00E+00	0.00E+00	3.89E+04
3	S3: Instandsetzung (Süd)	0.00E+00	0.00E+00	1.79E+06
4	S4: Instandsetzung (Nord)	0.00E+00	6.00E+03	1.79E+06
5	S2b: Verkehr unter Monitoring	0.00E+00	6.00E+03	3.89E+04
6	S5: Sperrung Schwerverkehr bis Neubau	0.00E+00	0.00E+00	3.89E+04
7	S6: Neubau erster Überbau	0.00E+00	0.00E+00	1.79E+06
8	S7: Neubau zweiter Überbau	0.00E+00	0.00E+00	1.75E+06

Bild 102: Eingabe in der Registerkarte „Verkehrsbetriebsszenario“ für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

Schwellenwertgruppen für den Fall mit Monitoring						
ID	Bezeichnung (Zustand)	Indikator Wert	Pf	VBS ID	Maßnahme 1 ID	Maßnahme 2 ID
1	kein Problem / kein Handlungsbedarf			0		
2	Instandhaltung / Monitoring	2		0		
3	Monitoringergebnis kritisch: akuter Handlungsbedarf erforderlich (z.B. Neubau)	3		6	6	7

Bild 103: Eingabe auf der Registerkarte „Schwellenwertgruppen“ für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

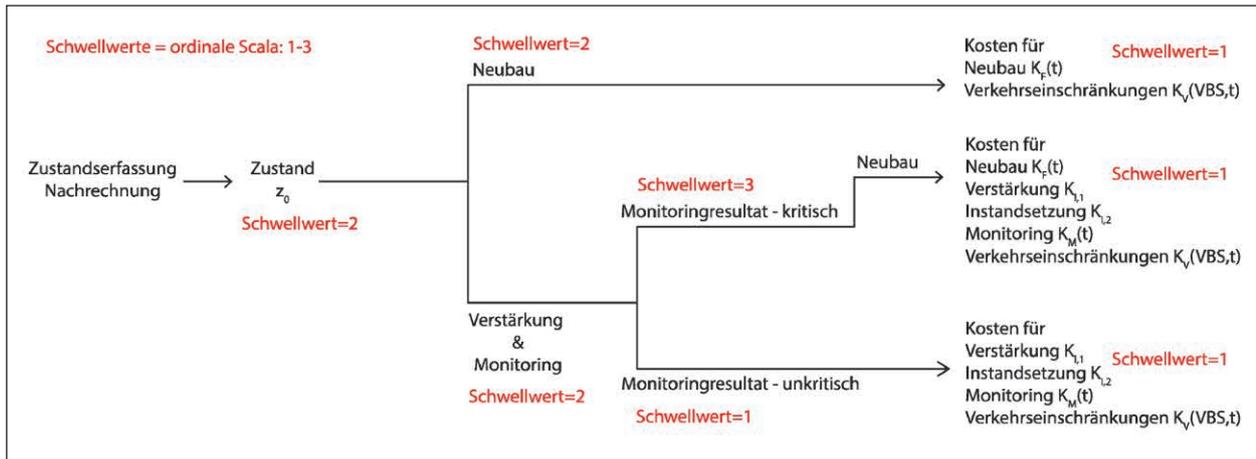


Bild 104: Darstellung der ordinalen Schwellenwertgruppen im Ereignisbaum für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

- (2) Aktive Schwellenwertgruppe vor dem Abschluss des Monitorings. Diese Gruppe repräsentiert den Status Quo für den Fall, dass es keine Änderung gegeben hat.
- (3) Das Monitoring hat ein kritisches Ergebnis geliefert und folglich wird ein Neubau erforderlich.

Die Schwellenwerte als ordinale Skala sind auch in Bild 104 in Verbindung mit dem Ereignisbaum dargestellt.

Die Indikatorwerte wurden so festgelegt, dass ein Indikatorwert von 1 mit Schwellenwertgruppe 1, ein Indikatorwert von 2 mit Schwellenwertgruppe 2, und ein Indikatorwert von 3 mit Schwellenwertgruppe 3 assoziiert wird.

Das Sanierungskonzept im Fall „mit Monitoring“ als auch im Fall „ohne Monitoring“ ist zeitlich fest vorgegeben (siehe Tabelle 34 und Tabelle 35). Die VBS werden deshalb für beide Fälle im Maßnahmenkatalog definiert. Einzig für den Fall eines kritischen Monitoringresultats wird explizit VBS 6 für die Schwellenwertgruppe 3 definiert. Weiterhin werden, falls Schwellenwertgruppe 3 vorliegt, Maßnahmen 6 und 7 (Neubau Teil 1 und Teil 2) eingeplant. Die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit wird in allen Schwellenwertgruppen vernachlässigt. Das heißt, dass in diesem Beispiel die erwarteten Kosten aus Versagen nicht berücksichtigt werden.

Im Fall „ohne Monitoring“ werden die beiden betroffenen Bauwerke gesperrt. Ein Versagen unter Verkehr ist somit ausgeschlossen. Auch im Fall mit Monitoring wurde die Instandhaltungsstrategie konservativ gewählt. Das der Brücke zugrundeliegende Problem ist eine mögliche Ermüdung unter ungünstigen Bedingungen. Dies kann langfristig die Zuverlässigkeit der Brücke durchaus beeinträchtigen. Kurzfristig (im relevanten Betrachtungszeitraum) ist nicht mit einer nennenswerten Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit zu rechnen. Das Risiko aus Versagen hätte auch unter sehr konservativen Annahmen keinen nennenswerten Einfluss auf die Entscheidungsfindung, und wird deshalb nicht berücksichtigt.

### 8.6.5 Registerkarte „Indikatormodell“

Die vorliegende Problemstellung kann durch zwei Indikatormodelle beschrieben werden. Die eingesetzten Modelle sind im Folgenden näher beschrieben (siehe auch Bild 105).

Die beiden Indikatormodelle basieren auf dem Modelltype „C“ im Excel-Tool; d. h., das zugrundeliegende Modell kann zwei Zustände annehmen: Das Monitoringresultat ist entweder unkritisch oder kritisch. Der erste Parameter dieses Modelltyps drückt aus, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Monitoring ein kritisches Resultat liefert, also mit welcher Wahr-

scheinlichkeit sich der zugrunde liegende Indikatorwert ändert. Dieser ist hier mit prmon bezeichnet für den Fall, dass das Monitoringsystem installiert ist, ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoringresultat kritisch ausfällt auch 0.

Der zweite Parameter beschreibt den anzusetzenden Indikatorwert im Fall eines kritischen Monitoringresultates. Für den Fall mit Monitoring ist dieser Indikatorwert 3 (siehe auch die festgelegten Schwellwertgruppen in Bild 103), das System wechselt in Schwellwertgruppe 3.

Für den Fall ohne Monitoring hat dieser keinen Einfluss auf die Simulation.

Der dritte Parameter beschreibt das anzusetzende VBS bei Aktivierung des Indikatormodells. Hier wird für beide Modelle eine Null eingetragen. Dies heißt, dass die Eingabe ignoriert wird. Im Gegensatz zum Beispiel „Schwelmetalbrücke“, werden die Verkehrsbetriebsszenarien vollständig über die Registerkarten „Schwellwertgruppen“ und „Maßnah-

menkatalog“ zugeordnet. Im Beispiel „Schwelmetalbrücke“ waren zwei der drei Indikatormodelle direkt mit einem VBS verknüpft. Dies ist hier nicht der Fall. Die Indikatormodelle werden unter verschiedenen VBS ausgeführt. Deshalb darf das Indikatormodell nicht direkt mit einem VBS verknüpft werden – es muss als dritter Parameter also eine Null eingetragen werden.

### 8.6.6 Registerkarte „Maßnahmenkatalog“

Die Registerkarte Maßnahmenkatalog im Excel-Tool ist in Bild 106 und Bild 107 gezeigt. Hier erfolgt die Eingabe, die im Folgenden erläutert wird.

An der Brücke in Duisburg-Beeck werden die folgenden 7 Maßnahmen definiert:

- (ID 1) Aufbringen der externen Vorspannung,
- (ID 2) Instandsetzung südlicher Teil,
- (ID 3) Instandsetzung nördlicher Teil,

Indikatormodell					
ID	Bezeichnung	Modelltyp	Parameter		
1	kein aktives Monitoring im zugehörigen Zeitschritt	C	0.00	20.00	0.00
2	aktives Monitoring im aktuellen Zeitschritt (einmalige Auswertung)	C	prmon	3.00	0.00

Bild 105: Eingabe auf der Registerkarte „Indikatormodell“ für das Beispiel Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

Maßnahmenkatalog								
ID	Bezeichnung der Maßnahme	Kosten [€]	Dauer [Monate]	ID des VBS bei Ausführung	ID des VBS nach Abschluss	Indikator-Wert nach Abschluss	Indikatormodell nach Abschluss	ID Indikatormodell während Ausführung
1	externe Vorspannung	1.00E+06	6	2	3			
2	Instandsetzung (Süd)	1.40E+06	6	3	4			
3	Instandsetzung (Nord)	1.40E+06	6	4	5			
4	Monitoring	0.00E+00	5	5	5		2	
5	Auswertung Monitoring	0.00E+00	1	1	1	1	1	
6	Neubau Teil 1	6.20E+06	18	7	8			
7	Neubau Teil 2	6.20E+06	18	8	1	1	1	

Bild 106: Eingabe der allgemeinen Spalten auf der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

Maßnahmenkatalog							
ID	Bezeichnung der Maßnahme	ohne Monitoring		mit Monitoring			Ende Monitoring
		Beginn von Start [Monate]	Beginn von Start [Monate]	Verzögerung [Monate]	Wiederholung möglich	max. zulässige ID Schwellwertgruppe bei Ausführung	
1	externe Vorspannung		0				
2	Instandsetzung (Süd)		6				
3	Instandsetzung (Nord)		12				
4	Monitoring		18				
5	Auswertung Monitoring		24			2	2
6	Neubau Teil 1	12		12			1
7	Neubau Teil 2	30		30			

Bild 107: Eingabe der Zeitplanung auf der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

- (ID 4) Monitoringphase,
- (ID 5) Auswertung Monitoring,
- (ID 6) Neubau Teil 1, und
- (ID 7) Neubau Teil 2.

Diese Maßnahmen orientieren sich an den Zeitplänen, die in Tabelle 34 und Tabelle 35 gegeben sind.

Für den Fall „mit Monitoring“ wird zunächst Maßnahme 1 ausgeführt, gefolgt von Maßnahme 2, 3 und 4. Maßnahme 4 ist eine Hilfsmaßnahme, um das Monitoring in diesem Beispiel abzubilden. Zu beachten ist, dass das Monitoringresultat in diesem Beispiel einmal nach Ende der Monitoringphase ausgewertet wird.

Dies ist in diesem Beispiel speziell, da nach Abschluss der Monitoringphase erst entscheiden wurde, ob die BK 60 nachgewiesen werden kann. Eine laufende Auswertung der Resultate (wie bei der Schwelmetalbrücke) ist hier nicht erfolgt. Der Durchlauf einer Sommerperiode mit entsprechenden Temperaturverläufen ist für die Entscheidungsfindung notwendig.

Die Maßnahme 4 wird benötigt, um das Indikatormodell mit ID 2 nach Ende der Monitoringphase zu aktivieren. Ebenso wird Maßnahme 5 benötigt, um das Indikatormodell nach einem Monat Monitoring wieder auf ID 1 zu setzen. Dies geschieht allerdings nur, falls das Monitoringresultat unkritisch war. Die entsprechende Eingabe im Excel-Tool ist in Bild 106 und Bild 107 dargestellt.

Falls das Monitoringergebnis kritisch ist, dann wird ein Neubau durch Aktivierung der Maßnahmen 6 und 7 eingeleitet.

Für den Fall „ohne Monitoring“ werden Maßnahmen 6 und 7 ausgeführt (siehe auch Tabelle 34). Die erste Maßnahme startet nach 12 Monaten und dauert 18 Monate. Die zweite Maßnahme startet nach Abschluss der vorherigen Maßnahme und dauert ebenfalls 18 Monate. Während der Durchführung der Maßnahmen sind VBS 7 und 8 aktiv. Nach Abschluss beider Maßnahmen wird VBS 1 aktiviert.

**8.6.7 Registerkarte „Allgemeines“**

Die Eingaben, die auf der Registerkarte „Allgemeines“ zu tätigen sind, sind in Bild 108 und Bild 109 zusammengestellt. Die Diskontierungsrate ist mit 2 % festgelegt. Installationskosten für das Monitoring betragen 79.800 € (siehe Kapitel 8.3.3). Die Betriebskosten für das Monitoring sind in den Maßnahmenkosten berücksichtigt, da diese zeitlich begrenzt sind.

Der initiale Indikatorwert wird so gewählt, dass das System anfänglich in Schwellenwertgruppe 2 eingestuft wird.

Für den Fall „mit Monitoring“ wird VBS 2 aktiviert; ansonsten VBS 6. Das anfänglich aktive Indikatormodell ist 1. Die Länge des Betrachtungszeitraums ergibt sich mit 72 Monaten aus dem Fall „mit Monitoring“ kritischem Monitoringbefund, der einen Neubau auslöst.

Der Wert der Kontrollvariable „prmon“ wurde bereits auf der Registerkarte „Parameter“ festgelegt. Eine bequeme Möglichkeit, diesen Wert über die Registerkarte ‚Allgemeines‘ zu verändern, findet sich unter Punkt „Expertenschätzung“.

Hierzu wird „prmon“ als Name der Kontrollvariable eingetragen. Bei einer Eingabe eines Wertes im Feld „Expertenschätzung“ wird der Wert des Parameters „prmon“ auf der Registerkarte „Parameter“ automatisch gesetzt und die Simulation mit eben diesem Wert gestartet.

Diskontierungsrate [1]	0.02
Monitoring: Installationskosten	8.00E+04
Monitoring: Betriebskosten [€/Monat]	0.00E+00
initialer Indikatorwert für t=0	2.00
ID des initialen Indikatormodell	1
ID des initialen VBS ohne Monitoring	6
ID des initialen VBS mit Monitoring	2
Länge Betrachtungszeitraum [Monate]	72
Länge Zeitschritt [Monate]	1
Anzahl Monte Carlo Samples	1000

Bild 108: Generelle Eingaben zum Projekt in der Registerkarte „Allgemeines“ für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

<b>Expertenschätzung</b>	
Name der Kontrollvariable	prmon
Expertenschätzung: Pr[Monitoring=kritisch]	0.05
Erwarteter Vorteil Monitoring	4.44E+07

Bild 109: Berücksichtigung einer Expertenschätzung (auf der Registerkarte „Allgemeines“) für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

Der Parameter ‚prmon‘ stellt die Wahrscheinlichkeit dar, mit der das Monitoring in jedem Zeitschritt ein kritisches Ergebnis liefert. Der Wert dieses Parameters kann daher nur zwischen Null und 1 liegen. Als obere bzw. untere Schranke wird im Excel-Tool deshalb 0 bzw. 1 eingetragen.

Basierend auf dem Resultat wird eine Empfehlung für oder gegen die Installation des Monitoringsystems ausgesprochen. Auch in diesem Beispiel wurde keine Schätzung von Experten abgegeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Monitoringsystem einen kritischen Zustand anzeigt. Diese Wahrscheinlichkeit wurde von den Autoren (willkürlich) zu 5 % festgelegt. D. h. die Autoren schätzen die Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoring einen kritischen Zustand anzeigt, als sehr klein ein.

Dieser Wert wird mit der ermittelten Grenzwahrscheinlichkeit verglichen, um zu beurteilen, ob das Monitoring wirtschaftlich ist. Das Ergebnis ist in Bild 110 gegeben.

Aus Bild 110 kann gesehen werden, dass selbst bei einer Übergangswahrscheinlichkeit von 0.66, der Einsatz eines Monitoringsystems wirtschaftlich wäre. Diese Wahrscheinlichkeit ist relativ hoch. Der erwartete monetäre Vorteil beim Einsatz des Monitoringsystems ist abhängig von der Einschätzung des Experten, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass das Monitoring einen kritischen Wert zurückgibt. Bei einer angenommenen Wahrscheinlichkeit von 5 % ist der monetäre Vorteil relativ hoch, wie aus Bild 109 abgelesen werden kann.

Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit	
Grenzwert der Kontrollvariable	0.659179688
untere Schranke (für Grenzwertsuche)	0
obere Schranke (für Grenzwertsuche)	1
zulässiger relativer Fehler [1]	1.00E-04
max. Zahl an zulässigen Iterationsschritten	10

Bild 110: Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit (auf der Registerkarte „Allgemeines“) für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

geschätzte Erwartungswerte			
	ohne Moni	mit Moni	Differenz
total (Summe direkt+indirekt+Versagen)	7.28E+07	2.83E+07	4.44E+07
direkte Kosten	1.18E+07	4.37E+06	7.42E+06
indirekte Kosten	6.10E+07	2.40E+07	3.70E+07

Bild 111: Zusammenstellung der erwarteten Kosten für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]

## 8.7 Ergebnis und Diskussion

Die Ergebnisse für das Beispiel in Duisburg-Beeck sind in Bild 111 zusammengestellt. Erkennbar ist, dass auch in diesem Beispiel die Entscheidungsfindung von den indirekten Kosten dominiert wird. Diese sind deutlich höher als die erwarteten direkten Kosten.

Die Annahme der Wahrscheinlichkeit ist im vorliegenden Beispiel willkürlich gewählt und der monetäre Vorteil (und damit auch die Entscheidung, ob ein Monitoringsystem installiert werden sollte), ist von diesem Wert abhängig und muss in der Praxis sorgfältig festgelegt werden. In diesem Beispiel resultiert aus dieser Annahme ein relativ großer monetärer Vorteil.

Hat man keine Information und kann nicht einschätzen, ob das Monitoring einen kritischen Wert liefert oder nicht, kann auch eine nicht-informative a-priori Wahrscheinlichkeit von 0.5 verwendet werden. Auch in diesem Fall wäre das Monitoringsystem an der Brücke in Duisburg-Beeck wirtschaftlich und sinnvoll.

Bei der Brücke in Duisburg-Beeck besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem erwarteten monetären Vorteil und der Einschätzung des Experten wie in Bild 112 zu sehen ist. Bei einer Wahrscheinlichkeit prmon von 0.5 besteht immer noch ein signifikanter erwarteter monetärer Vorteil.

Es ist aus Bild 112 erkennbar, dass in diesem Beispiel die Diskontierungsrate keinen großen Einfluss

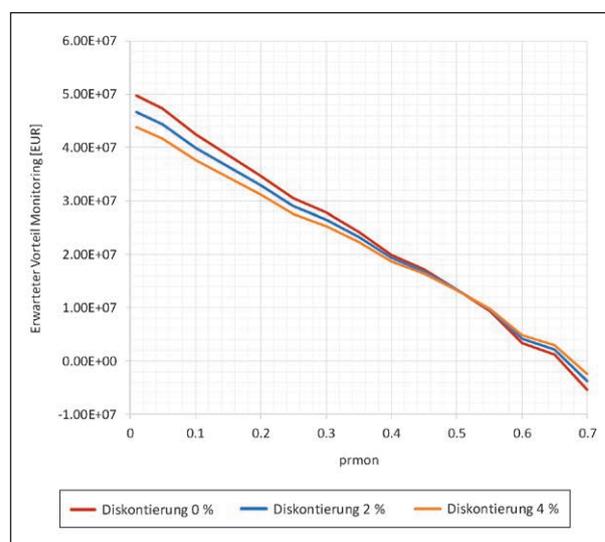


Bild 112: Erwarteter monetärer Vorteil in Abhängigkeit von der Diskontierungsrate und der Experteneinschätzung [eigene Darstellung]

auf das Ergebnis hat. Die Kosten in diesem Beispiel sind in den Fällen „mit Monitoring“ und „ohne Monitoring“ sehr unterschiedlich. Der Neubau wird im Fall „mit Monitoring“ standardmäßig eigentlich nicht umgesetzt. D. h. die anfallenden Kosten unterscheiden sich deutlich. Die Diskontierung hat hier keinen entscheidenden Einfluss.

Im Fall Duisburg haben die Gesamtkosten als Funktion von „prmon“ stark unterschiedliche Steigungen, liegen teilweise sehr weit auseinander. Eine Änderung der Diskontierungsrate hat eine geringe Änderung der Steigungen der Kurven zur Folge. Der Schnittpunkt der beiden Kurven ist aber hiervon kaum betroffen.

Vergleicht man die Resultate der Brücke Duisburg-Beeck mit den Ergebnissen der Schwelmetalbrücke so zeigt sich, dass die Entscheidung für das Monitoring an der Brücke in Duisburg-Beeck eindeutiger ist als an der Schwelmetalbrücke.

## 9 Schlussfolgerungen

Die Sicherstellung der Funktionalität des Straßensystems ist eine der Hauptmanagementaufgaben der Straßenbauverwaltungen. Herausforderungen ergeben sich aus alternder Infrastruktur, aber auch aus Änderungen in den Anforderungen an die Infrastruktur. Um die Funktionalität sicherzustellen sind Entscheidungen zu treffen und es muss entschieden werden, zu welchem Zeitpunkt alternde Infrastrukturen instandgesetzt werden, ersetzt werden müssen oder ob sie sicher weiter genutzt werden können. Die Entscheidungen müssen auf der Basis der vorhandenen Informationen getroffen werden. Monitoring liefert zusätzliche Informationen, die die Entscheidung unterstützen kann.

Die Entscheidung für ein Monitoringsystem ist mit Kosten verbunden. Ein Monitoring sollte nur eingesetzt werden, wenn die Informationen, die man durch das Monitoringsystem erhält, einen Nutzen haben, der die Kosten für das Monitoring übersteigt. Es muss also bekannt sein, welchen Nutzen das Monitoring bringt, noch bevor das Monitoringsystem installiert wird.

Die Quantifizierung des Wertes der Information, die ein Monitoringsystem liefert, ist nicht trivial. Die theoretischen wissenschaftlichen Grundlagen sind entwickelt, Anwendungen in der Praxis sind noch selten.

Ein Ansatz für die Anwendung dieser Grundlagen in der Praxis ist in diesem Forschungsprojekt entwickelt worden. Dabei ist insbesondere berücksichtigt worden, welche Informationen zum Zeitpunkt der Entscheidung in den Straßenbauverwaltungen verfügbar sind.

Quantifiziert wird der Wert der Information unter Verwendung von probabilistischen Modellen. Um die Anwendung in den Verwaltungen zu ermöglichen, sind die probabilistischen Modelle in einem Excel-Tool implementiert worden, sodass der Anwender keine spezifischen Kenntnisse in der probabilistischen Modellierung benötigt, um das entwickelte Verfahren anzuwenden.

Das entwickelte Verfahren ist nicht schadensspezifisch und somit allgemein auf Fragestellungen anwendbar, bei der ein Schwellwertmonitoring zum Einsatz kommen kann. Auch wurde versucht, den Aufwand einer Analyse für den Entscheidungsträger zu minimieren.

In Kapitel 7 und 8 ist die einfache Anwendbarkeit des Verfahrens an zwei realen Beispielen aus der Praxis gezeigt worden. Es benötigt für die Anwendung einige Annahmen und Abschätzungen, die jedoch leicht getroffen werden können. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass die Entscheidungssituation explizit formuliert werden muss. In der Praxis kann dies bereits helfen, um Konsequenzen aus Entscheidungen zu erkennen und frühzeitig Maßnahmen zu treffen. Mögliche Szenarien müssen definiert und in Bezug auf ihre Kritikalität ordinal geordnet werden.

Die Beispiele haben gezeigt, dass das Konzept von den Straßenverwaltungen angewendet werden kann, und dass bewertet werden kann, ob sich ein Monitoring für die vorliegenden Fragestellungen lohnt. In beiden Beispielen hat sich das Monitoringsystem gelohnt. Die Beispiele haben auch gezeigt, dass dies nicht immer der Fall sein muss, wenn es bereits eine Schädigung gibt. Die Methode ist sensitiv in Bezug auf die Eingangsparameter und lässt es somit zu, dass eine tatsächliche Bewertung vorgenommen werden kann. Es ist also nicht a-priori so, dass ein Monitoringsystem sich immer lohnt, bzw. nie.

Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist, dass es auch Sensitivitätsanalysen in Bezug auf getroffene Annahmen zulässt. Es können auch Einflüsse von Projektverzögerungen untersucht werden.

Eine Erkenntnis aus den beiden Beispielen ist, dass der Aufwand der Analyse durch die Bestimmung der indirekten Kosten dominiert wird.

Wie Kapitel 2.10 verdeutlicht, ist sich Wissenschaft und Praxis einig, dass indirekte Wirkungen von verkehrseinschränkenden Maßnahmen in der Betrachtung der Nutzen und Kosten aufzunehmen und nicht zu vernachlässigen sind. Die hier vorgestellten Indikatoren zur Berechnung von sozio-ökonomischen Folgen verdeutlicht die Komplexität der Berücksichtigung solcher Kosten. Beispielhaft wurden in diesem Projekt sieben Kenngrößen betrachtet, von dem der Indikator Erreichbarkeit als plakative Größe gilt und nicht monetarisierbar ist, daher der Nutzen-Kosten-Analyse als finanzielle Dimension nicht zugeführt werden kann. Wie die hier dargestellten Brücken-Beispiele aufgezeigt haben, sind die Effekte auf die Erreichbarkeit bei kleineren Auswirkungen vernachlässigbar, bei größeren jedoch eine interessante Potenzialgröße, um die Tragweite stärkerer verkehrlicher Einschränkungen zu verdeutlichen. Dasselbe gilt für den Indikator Lärm, der im vorliegenden Projekt nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamtkosten der indirekten Wirkungen ausmacht, sodass auch dieser bei kleineren Auswirkungen, die insbesondere Außerortsstrecken betreffen, verzichtbar ist. Im Gegensatz dazu stellt die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im umwelt- und verkehrspolitischen Kontext eine der wichtigsten Kenngrößen dar. Die Vielschichtigkeit der Ermittlung der Klimaschutz- und Luftverschmutzungskosten stellt das Mengengerüst für die Berechnung aller weiteren hier betrachteten Indikatoren. Das Kapitel 5 gibt hierzu Hinweise, Komplexität durch Aggregation und Vereinfachung zu reduzieren. Sofern die zuständige Kommune über einen Verkehrsfachmann verfügt, der Verkehrsmodelle bedient, welche das notwendige Mengengerüst zur Bestimmung der indirekten Kosten zur Verfügung stellt, können mit Zuhilfenahme des erwähnten Kapitels 5 durch die Beschreibung der grundlegenden Handlungsweise, kleinere Berechnungen in Excel umgesetzt werden. Sofern dies nicht zur Verfügung steht, muss sich die Kommune Expertise einkaufen. Insbesondere dann sollte das Verkehrsmodell zur erleichterten Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit der aktuellen Version des „Handbuchs Emissionsfaktoren (HBEFA)“ verknüpft sein.

## Literatur

- [1] Deutscher Bundestag Drucksache (2011): 17/5325. „Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Uwe Beckmeyer, Sören Bartol, Martin Burkert, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD“, Drucksache 17/4908, Zustand von Brücken im Zuge von Bundesfernstraßen in Deutschland
- [2] BMVBS (2013): „Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten“, Dokumentation 2013, Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Referat StB 17
- [3] SCHNELLENBACH-HELD M., PEETERS M., MIEDZINSKI G. (2015): „Schadigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton“, Intelligente Brücke, BASt, Bergisch Gladbach
- [4] NAUMANN J., HAHN S. (2003): „Das Management der Straßenerhaltung in Deutschland“, Straße und Autobahn Heft März
- [5] STRAUB D. (2013): „Value of Information Analysis with Structural Reliability Methods“, Journal of Structural Safety
- [6] BENJAMIN J., CORNELL C.A. (1970): „Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers“, McGraw-Hill
- [7] KROESE D.P., TAIMRE T., BOTEV Z.I. (2011): „Handbook of Monte Carlo Methods“, John Wiley and Sons
- [8] TANG W. (1973): „Probabilistic updating of flaw information“, Journal of Testing and Evaluation; 1:459-67
- [9] STRAUB D., FABER M.H. (2004): „System effects in generic risk-based inspection planning“, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering
- [10] STRAUB D, FABER M.H. (2005): „Risk based inspection planning for structural systems“, Journal of Structural Safety
- [11] POZZI M., DER KIUREGHIAN A. (2011): „Assessing the value of information for long-term structural health monitoring“, Proceedings the International Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers

- [12] POZZI M., DER KIUREGHIAN A. (2012): „Assessing the value of alternative bridge health monitoring systems“, 6<sup>th</sup> International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS
- [13] THÖNS S., FABER M.H. (2013): „Assessing the Value of Structural Health Monitoring“, 11<sup>th</sup> International Conference on Structural Safety & Reliability, ICOSSAR 2013. Columbia University
- [14] KRAUSE A. (2008): „Optimizing Sensing – Theory and Applications“, PhD thesis: School of Computer Science, Carnegie Mellon University, USA
- [15] ZHANG J., ZHANG L., TANG W.H. (2009): „Bayesian framework for characterizing geotechnical model uncertainty“, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering
- [16] DEMIRMEN F. (1996): „Use of „Value of Information“ Concept in Justification and Ranking of Subsurface Appraisal“, SPE Annual Technical Conference and Exhibition
- [17] YOKOTA F., THOMPSON K.M. (2004): „Value of information analysis in environmental health risk management decisions: Past, present, and future“, Risk Analysis
- [18] SCHUBERT M. (2009): „Konzepte zur informierten Entscheidungsfindung im Bauwesen“, Dissertation an der ETH Zürich, DISS. ETH Nr. 18572
- [19] JCSS (2009) „Risk assessment in Engineering, Joint Committee on Structural Safety“, Edited by M. H. Faber. Available online: <http://www.jcss.byg.dtu.dk/publications>, besucht am: 15.03.2019
- [20] FABER M.H. (2012): „Statistics and Probability Theory, In Pursuit of Engineering Decision Support“, ISBN 978-94-007-4056-3, Springer Netherlands
- [21] KÜBLER O. (2007): „Applied decision-making in civil engineering“, Dissertation an der ETH Zürich, Nr. 16394
- [22] LUCE R.D., RAIFFA H. (1957): „Games and decisions: Introduction and critical survey“, John Wiley & Sons
- [23] Von NEUMANN J., MORGENSTERN O. (1944): „Theory of games and economic behavior“, Princeton University Press
- [24] RAIFFA H., SCHLAIFER R. (1961): „Applied statistical decision theory“, Boston: Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University, USA
- [25] SCHUBERT M., FABER, M.H. (2008): „Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten“, Bundesamt für Straßenwesen ASTRA, Forschungsauftrag AGB2002/020 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)
- [26] ANG A., TANG W. (2006): „Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering“, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons
- [27] Sturel, Sturel Produkt-Webseite: [www.sturel.de](http://www.sturel.de), besucht am: 15.03.2019
- [28] OpenTurns, Produkt Webseite: <http://www.openturns.org/>, besucht am: 15.03.2019
- [29] Ferum Produkt Webseite: <http://projects.ce.berkeley.edu/ferum/>, besucht am: 15.03.2019
- [30] MAHMOUD K. (2009): „Safety and Reliability of Bridge Structures“, CRC Press, Taylor & Francis Group
- [31] MELCHERS R. E. (2002): „Structural Reliability Analysis and Prediction“, John Wiley & Sons
- [32] MADSEN H. O., KRENK S., LIND N. C. (1986) „Methods of Structural Safety“, Pentice-Hall
- [33] FABER, M. H. (2006): „Risk and Safety in Civil, Surveying and Environmental Engineering“, ETH Zürich, Lecture Notes
- [34] HALDAR A., MAHADEVAN S. (2000): „Reliability assessment using stochastic finite element analysis“, John Wiley & Sons
- [35] BASLER E. (1960): „Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken“, Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaften und Technik

- [36] CORNELL C. A. (1969): „A Probability Based Structural Code”, ACI Journal
- [37] HASOFER A. M., LIND N. C. (1974): „An Exact and Invariant First Order Reliability Format”, Journal of Engineering Mechanics
- [38] ISAACSON D. L., MADSEN, R. W. (1976): „Markov – chains. Theory and applications”, John Wiley & Sons
- [39] FISCHER J., SCHNEIDER R., THÖNS S., RÜCKER W., STRAUB D. (2014): „Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen“, Heft B 99, Bundesanstalt für Straßenwesen BAST, Bergisch Gladbach
- [40] VERMA S. K. , BHADAURIA S. S., AKHTAR S. (2013): „Review of Nondestructive Testing Methods for Condition Monitoring of Concrete Structures”, Journal of Construction Engineering
- [41] TERZIC A. M., PAVLOVIC L. M. (2010): „Application of results of non destructive testing methods in the investigation of microstructure of refractory concretes” Journal of Materials in Civil Engineering
- [42] GROSSE C. U., REINHARDT H. W., FINCK F. (2003): „Signal-based acoustic emission techniques in civil engineering”, Journal of Materials in Civil Engineering
- [43] ZHU J., POPOVICS J. S. (2007): „Imaging concrete structures using air-coupled impact-echo”, Journal of Engineering Mechanics
- [44] GASSMAN S. L., TAWHED W. F. (2004): „Nondestructive assessment of damage in concrete bridge decks”, Journal of Performance of Constructed Facilities
- [45] YEHIA S., ABUDAYYEH O., NABULSI S., ABDELQADER I. (2007): „Detection of common defects in concrete bridge decks using nondestructive evaluation techniques”, Journal of Bridge Engineering
- [46] NASSR A. A., EL-DAKHAKHNI W. W. (2009): „Damage detection of FRP-strengthened concrete structures using capacitance measurements”, Journal of Composites for Construction
- [47] POPOVICS J. S., SONG W., ACHENBACH J. D., LEE J. H., ANDRE R. F. (1998): „One-sided stress wave velocity measurement in concrete”, Journal of Engineering Mechanics
- [48] RENS K. L., KIM T. (2007): „Inspection of Quebec street bridge in Denver, Colorado: destructive and nondestructive testing”, Journal of Performance of Constructed Facilities
- [49] GIBSON A., POPOVICS J. S. (2005): „Lamb wave basis for impact echo method analysis”, Journal of Engineering Mechanics
- [50] PROVERBIO E., VENTURI V. (2005): „Reliability of nondestructive tests for on site concrete strength assessment”, International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France
- [51] PASCALE G., LEO A. D., BONORA V. (2003): „Nondestructive assessment of the actual compressive strength of high-strength concrete”, Journal of Materials in Civil Engineering
- [52] STERGIOPOULOU C., AGGOUR M. S., McCUEN R. H. (2008): „Nondestructive testing and evaluation of concrete parking garages”, Journal of Infrastructure Systems
- [53] MOCZKO A.T., CARINO N.J., PETERSEN C.G. (2016): „CAPO-TEST to Estimate Concrete Strength in Bridges”, ACI Materials Journal
- [54] MALAVAR L. J., JOSHI N.R., NOVINSON T. (2003): „Environmental effects on the short term bond of carbon fibre reinforced (CRPF) composites“, Journal of Composites for Construction
- [55] BHADAURIA S. S., GUPTA D. M. C. (2007): „In situ performance testing of deteriorating water tanks for durability assessment”, Journal of Performance of Constructed Facilities
- [56] KLINGOFFER O., FROLUND T., POULSEN E. (2000): „Rebar corrosion rate measurements for service life estimates”, Proceedings of the ACI Fall Convention on Practical application of service life models, Toronto, Canada

- [57] SO H., MILLARD S.G. (2007): „Assessment of corrosion rate of reinforcing steel in concrete using Galvanostatic pulse transient technique”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*
- [58] CARNIO N. J. (1999): „Nondestructive techniques to investigate corrosion status in concrete structures”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*
- [59] PARTHIBAN T., RAVI R., PARTHIBAN G. T. (2006): „Potential monitoring system for corrosion of steel in concrete”, *Journal of Advances in Engineering Software*
- [60] LIU W., HUNSPERGER R. G., CHAJES M. J., FOLLIARD K. J., KUNZ E. (2002): „Corrosion detection of steel cables using time domain reflectometry”, *Journal of Materials in Civil Engineering*
- [61] SHARMA S., MUKHERJE A. (2011) „Monitoring corrosion in oxide and chloride environments using ultrasonic guided waves”, *Journal of Materials in Civil Engineering*
- [62] ERVIN B. L., KUCHAMA D. A., BERNHARD J. T., REIS H. (2009): „Monitoring corrosion of rebar embedded in mortar using high frequency guided ultrasonic waves”, *Journal of Engineering Mechanics*
- [63] NACHIAPPAN V., CHO E. H. (2005): „Corrosion of high chromium and conventional steels embedded in concrete”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*
- [64] CHEN D. H., WIMSATT A. (2010): „Inspection and condition assessment using ground penetrating radar” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*
- [65] MAIERHOFER C. (2003): „Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar”, *Journal of Materials in Civil Engineering*
- [66] MASER K. R. (1996): „Condition assessment of transportation infrastructure using ground-penetrating radar”, *Journal of Infrastructure Systems*
- [67] PAULSON P. O., DWIT M. (2003): „The use of acoustic monitoring to manage concrete structures”, in *Proceedings of the International Non-Destructive Testing in Civil Engineering Symposium*
- [68] LOIZOS A., PAPAVALIOU V. (2006): „Evaluation of foamed asphalt cold in-place pavement recycling using nondestructive techniques”, *Journal of Transportation Engineering*
- [69] BAGCHI A., HUMAR J., XU H., NOMAN A. S. (2010): „Model-based damage identification in a continuous bridge using vibration data”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*
- [70] DAVIS A. G., EVANS J. G., HERTLEIN B. H. (1997): „Nondestructive evaluation of concrete radioactive waste tanks”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*.
- [71] SHAH S. P., POPOVICS J. S., SUBRAMANIAM K. V., ALDEA C. M. (2000): „New directions in concrete health monitoring technology”, *Journal of Engineering Mechanics*
- [72] RENS K. L., GREIMANN L. F. (1997): „Ultrasonic approach for nondestructive testing of civil infrastructure”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*
- [73] AMLEH L., MIRZA M. S. (2004): „Corrosion response of a decommissioned deteriorated bridge deck” *Journal of Performance of Constructed Facilities*
- [74] DURHAM S. A., HEYMSFIELD E., TENCLEVE K. D. (2007): „Cracking and reinforcement corrosion in short-span precast concrete bridges” *Journal of Performance of Constructed Facilities*
- [75] CLASSIE P. A., ELSAYAD H. I., SHAABAN I. G. (1997): „Absorption and sorptivity of cover concrete” *Journal of Materials in Civil Engineering*
- [76] BLIGHT G. E., LAMPACHER B. J. (1995): „Applying coverconcrete absorption test to in-situ tests on structures”, *Journal of Materials in Civil Engineering*
- [77] SANAYEI M., PHELPS J. E., SIPPLE J. D., BELL E. S., BRENNER B. R. (2012): „Instrumentation, non destructive testing, and finite element model updating for bridge

- evaluation using strain measurements”  
Journal of Bridge Engineering
- [78] CASCANTE G., NAJJARAN H., CRESPI P. (2008): „Novel methodology for nondestructive evaluation of brick walls: fuzzy logic analysis of MASWtests”, Journal of Infrastructure Systems
- [79] AKUTHOTA B., HUGHES D., ZOUGHI R., MYERS J., NANNI A. (2004): „Near-field microwave detection of disbond in carbon fiber reinforced polymer composites used for strengthening cementbased structures and disbond repair verification” Journal of Materials in Civil Engineering
- [80] CHEN B., MAHER M. H., NAWY E. G. (1995): „Fibre optic bragg grating sensor for nondestructive evaluation of composite beams” Journal of Structural Engineering
- [81] Network Rail (2004): „Code of Practice for Terms and Definitions for Use in Civil Engineering Standards (NR/GN/CIV/045)”, UK
- [82] WORDEN K., FARRAR CH. R., MANSON G, PARK G. (2007): „The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring“, Philosophical Transactions of the Royal Society A
- [83] ENCKELL M. (2011): „Lessons Learned in Structural Health Monitoring of Bridges Using Advanced Sensor Technology”, TRITA-BKN, Bulletin 108, PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden
- [84] Sustainable Bridges (2007): „Monitoring Guidelines for Railway Bridges”, available at: [http://www.sustainablebridges.net/projectweb/portalproject/Guideline\\_MON.html](http://www.sustainablebridges.net/projectweb/portalproject/Guideline_MON.html), besucht am: 15.03.2019
- [85] Mainline (2013): „WP4 – Monitoring and examination techniques; Deliverable 4.1: Report on assessment of current monitoring and examination practices in relation to degradation models”, available at: <http://www.mainline-project.eu/Results,7.html>, besucht am: 15.03.2019
- [86] Smartrail (2014): „Smart Maintenance, Analysis and Remediation of Transport Infrastructure – Final Report”, available at: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/100584/reporting/en>, besucht am: 15.03.2019
- [87] Intelligente Brücke (2018): Available at: [https://www.intelligentebruecke.de/ibruecke/EN/e-Home/home\\_node.html](https://www.intelligentebruecke.de/ibruecke/EN/e-Home/home_node.html), besucht am: 15.03.2019
- [88] SCHNELLENBACH-HELD M., KARCZEWSKI B., KÜHN O. (2014): „Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke”, BAST, Report B 105
- [89] KRÜGER M., GROSSE C. (2010): „Einsatz von Sensorik an Brückenbauwerken Schlussbericht”, Report FE 88.0001/2009, Stuttgart
- [90] WENZEL H. (2008): „Health Monitoring of Bridges”, John Wiley & Sons
- [91] WEBB G., VARDANEGA P., MIDDLETON C. (2015): „Categories of SHM Deployments: Technologies and Capabilities”, Journal of Bridge Engineering
- [92] Montec (2018): „Crack monitoring solution specifications”, available at: [www.montecsystems.com](http://www.montecsystems.com), besucht am: 15.03.2019
- [93] NIEMEIER W., RIEDEL B, FRASER C., NEUSS H., STRATMANN R., ZIEM E. (2008): „New digital crack monitoring system for measuring and documentation of width of cracks in concrete structures”, in Proc. 13<sup>th</sup> FIG Symp. on Deformation Measurement and Analysis and 14<sup>th</sup> IAG Symp. on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisbon
- [94] MATSUMOTO M., MITANI K., CATBAS F. N. (2013): „Bridge assessment methods using image processing and infrared thermography technology”, in Proceedings of transportation research board: 92<sup>nd</sup> Annual Meeting, Washington DC
- [95] KIM H., LEE J., AHN E., CHO S., SHIN M., SIM S.-H. (2017): „Concrete Crack Identification Using a UAV Incorporating Hybrid Image Processing”, Sensors
- [96] MOON H., KIM J. (2011): „Intelligent crack detecting algorithm on the concrete crack image using neural network”, Proceedings of the 28<sup>th</sup> ISARC
- [97] GLISIC B., INAUDI D. (2012): „Development of method for in-service crack detection based

- on distributed fiber optic sensors”, *Structural Health Monitoring-An International Journal*
- [98] WU Z., ZHANG H. (2007): „A standard test method for evaluating crack monitoring performance of distributed fiber optic sensors”, in *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*
- [99] GLISIC B., INAUDI D. (2002): „Crack monitoring in concrete elements using long-gage fiber optic sensors”, presented at the *Structural Health Monitoring Workshop, ISIS Canada, Winnipeg, Canada*
- [100] ZHANG B., WANG S., LI X., ZHOU Z., ZHANG X., YANG G., QIU M. (2013): „Online Bridge Crack Monitoring with Smart Film”, *The Scientific World Journal*
- [101] OHTSU M., ISODA T., TOMODA Y. (2007): „Acoustic emission techniques standardized for concrete structures”, *Journal of Acoustic Emission*
- [102] GRÊT A. A. (2004): „Time-lapse monitoring with coda wave interferometry”, *Colorado School of Mines*
- [103] STÄHLER S. C., SENS-SCHÖNFELDER C., NIEDERLEITHINGER E. (2011): „Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry”, *The Journal of the Acoustical Society of America*
- [104] KLIKOWICZ P., SALAMAK M., ŁAZIŃSKI P. (2015): „New methods for monitoring and diagnosis of concrete bridges – Coda Wave technology”, presented at the *11th Central European Congress on Concrete Engineering, Heimburg*
- [105] BAGHERIFAEZ M., BEHNIA A., MAJEED A.A., HWA KIAN C. (2014): „Acoustic Emission Monitoring of Multicell Reinforced Concrete Box Girders Subjected to Torsion”, *The Scientific World Journal*
- [106] YU L., MOMENI S., GODINEZ V., GIURGIUTIU V., ZIEHL P., YU J. (2012): „Dual Mode Sensing with Low-Profile Piezoelectric Thin Wafer Sensors for Steel Bridge Crack Detection and Diagnosis”, *Advances in Civil Engineering*
- [107] FIGUEIRA R. B. (2017): „Electrochemical Sensors for Monitoring the Corrosion Conditions of Reinforced Concrete Structures: A Review“, *Applied Sciences*
- [108] VELU S. (2007): „Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review”, *International Journal of Electrochemical Science*
- [109] LEI Y., ZHENG Z.-P. (2013): „Review of Physical Based Monitoring Techniques for Condition Assessment of Corrosion in Reinforced Concrete”, *Mathematical Problems in Engineering*
- [110] CASAS J. R., CRUZ P. J. S. (2003): „Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring”, *Journal of Bridge Engineering*
- [111] AGRAWAL A. K., YI Z., ALAMPALLI S., ETTOUNEY M. (2009): „Remote Corrosion Monitoring Systems for Highway Bridges, Practice Periodical on Structural Design and Construction
- [112] NIMS D. K., PARVIN A. (2000): „Instrumented Elastomeric Bridge Bearings”, *University of Toledo, Dept. of Civil Engineering, FHWA/OH-2000/010*
- [113] AGRAWAL A. K., SUBRAMANIAM K., PAN Y. (2005): „Development of Smart Bridge Bearings System – A Feasibility Study” *University Transportation Research Center City College of New York, C-02–02*
- [114] LIU J., MIAO X., YUAN Y. (2012): „The rail bridge bearing monitoring system based on FBG”, *OFS2012 22<sup>nd</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor*
- [115] LI S., NING Q., CHEN H. (2012): „Rail Elevated Bridge Bearing Displacement Monitoring Based on FBG Sensor”, *Applied Mechanics and Materials*
- [116] DONG-HO H., JINKYO F. C., DAEHYUN K., NAM S. G. (2012): „Feasibility of a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezoelectric Material”, *International Journal of Services Sciences*
- [117] CHO J. R., KIM Y. J., KWARK J. W., PARK S. Y.c, CHIN W. J., KIM B. S. (2013): „Load-Measuring Pot Bearing with Built-In Load

- Cell – Part I: Design and Performance”, Engineering
- [118] BUTZ C., OKUMUSOGLU D., BRAUN C. (2017): „Expansion Joints and Bridge Bearings as Smart Monitoring Devices”, in IABSE Symposium Report
- [119] ISLAMI K., MENG N., O’SUILLEABHAIN C. (2016): „Smart bridge components (expansion joints, bearings and seismic devices) for intelligent infrastructure”, Proceedance of 19<sup>th</sup> IABSE Congress Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment, Stockholm, Sweden
- [120] CHANG S. J., KIM N. S. (2013): „Development of smart seismic bridge bearing using fiber optic Bragg-grating sensors”, SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. International Society for Optics and Photonics
- [121] ANCIAES P. R., METCALFE P. J., HEYWOOD C. (2017): „Social Impacts of road traffic: perceptions and priorities of local residents”, Impact Assessment and Project Appraisal
- [122] BANA E COSTA C., OLIVEIRA C., VIEIRA V. (2008): „Prioritization of bridges and tunnels in earthquake risk mitigation using multicriteria decision analysis”, International Journal of Management Science
- [123] BimSchV (1990): „Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV)” vom 12. Juni 1990 (BGBl. I S. 1036), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2269) geändert worden ist
- [124] BMVBS (2007): „RI-WI-BRÜ – Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken”, Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten RI-ERH-ING, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.)
- [125] WALTHER C., KINDL A., PAUFLER D., WASSMUTH V. (2006): „Simulation von Wirkungen ausgewählter Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung einzelner Streckenabschnitte auf Bundesautobahnen bei einer vorgegebenen Straßeninfrastruktur”, im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, FE-Projekt-Nr.: 26.0180/2005
- [126] PTV Planung Transport Verkehr AG (2015): „Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegplan 2030 für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur”, FE-Projekt-Nr.: 97.358/2015
- [127] [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2018/02/PD18\\_063\\_46241.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2018/02/PD18_063_46241.html), besucht am: 15.03.2019
- [128] BVU, ITP, IVV (2014): „Verkehrsverflechtungsprognose 2030”, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, FE-Projekt-Nr.: 96.0981/2011
- [129] CEQA California Environmental Quality Act (2016): „Statue and Guidelines”, unter: [http://resources.ca.gov/ceqa/docs/2016\\_CEQA\\_Statutes\\_and\\_Guidelines.pdf](http://resources.ca.gov/ceqa/docs/2016_CEQA_Statutes_and_Guidelines.pdf), besucht am: 15.03.2019
- [130] Destatis (2018): „0,9 % weniger Verkehrstote im Jahr 2017”, Pressemitteilung Nr. 063 vom 27.02.2018, Statistisches Bundesamt, unter: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2018/02/PD18\\_063\\_46241.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2018/02/PD18_063_46241.html), besucht am: 15.03.2019
- [131] EC (2009): „Impact Assessment Guidelines”, European Commission
- [132] EU-Richtlinie (2002): „Richtlinie 2002/49/EG des europäischen Parlaments und des Rates“ vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm
- [133] FDOT (2002): „Community Impact Assessment and Environmental Justice for Transit Agencies: A Reference”, National Center for Transit Research, University of South Florida
- [134] FORKENBROCK D. J., BENSHOFF S., WEISBROD G. E. (2001): „Assessing the Social and Economic Effects of

- Transportation Projects”, University of Iowa, Economic Development Research Group
- [135] HESSE C., BOHNE S., EVANGELINOS C., PÜSCHEL R. (2012): „Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr. Erreichbarkeitsmessung: Theoretische Konzepte und empirische Anwendungen”, Nr. 3/2012, Technische Universität Dresden
- [136] JEPPSSON J. (2003): „Reliability-based assessment procedures for existing concrete structures Structural Engineering”, Lund University
- [137] JONES P., LUCAS K. (2012): „The social consequences of transport decision-making: clarifying concepts, synthesizing knowledge and assessing implications”, Journal of Transport Geography
- [138] JONES P., LUCAS K. (2012): „Social impacts and equity issues in transport: an introduction”, Journal of Transport Geography
- [139] MACKIE P., WORSLEY T. (2013): „International Comparisons of Transport Appraisal Practice”, Overview Report, Institute for Transport Studies, Faculty of Environment, University of Leeds
- [140] MARKOVICH J., LUCAS K. (2011): „The Social and Distributional Impacts of Transport: A Literature Review”, Working Paper N° 105, Transport Studies Unit, School of Geography and the Environment, University of Oxford
- [141] VM NRW (2006): „Methodenband zur integrierten Gesamtverkehrsentwicklungsplanung NRW 2006”, Projektgruppe IGVP NRW. Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.)
- [142] NEUMEIER S. (2017): „Regionale Erreichbarkeit von ausgewählten Fachärzten, Apotheken, ambulanten Pflegediensten und weiteren ausgewählten Medizindienstleistungen in Deutschland – Abschätzung auf Basis des Thünen-Erreichbarkeitsmodells”, Thünen Working Paper 77: Braunschweig
- [143] THOFT-CHRISTENSEN P. (2009): „Life-cycle cost-benefit (LCCB) analysis of bridges from a user and social point of view”, Structures & Infrastructure Engineering
- [144] PTV Planung Transport Verkehr AG (2013): „Verbundprojekt SKRIBT, Schutz kritischer Brücken und Tunnel, verkehrsbezogene Objektanalyse”, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf
- [145] PTV Planung Verkehr Transport AG (2015): „Verbundprojekt SRIBTPlus, Schutz kritischer Brücken und Tunnel, AP 6 Modellsystem Wirksamkeiten – Kritikalitätsverfahren”, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf
- [146] PTV Planung Transport Verkehr AG (2015): „Verbundprojekt SKRIBTPlus, Schutz kritischer Brücken und Tunnel, erweitertes Identifizierungsverfahren”, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf.
- [147] PTV Planung Verkehr und Transport AG (2015): „Methodik für eine optimierte Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken”, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- [148] PTV Planung Transport Verkehr AG (2005): „Informationen über Alternativrouten als Grundlage für objektbezogene Bewertungsverfahren”, BMS, FE 15.0411/2005/HRB, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- [149] PTV Planung Transport Verkehr AG (2013): „Optimierungsstrategie zur Priorisierung voneinander abhängiger Bauprojekte von Straßen- und Ingenieurbauwerken”, FE-Projekt 29.0328/2013, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
- [150] SCHILLER C. (2007): „Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und Infrastrukturplanung”, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr Heft10/2007, Technische Universität Dresden
- [151] SCHWARZE B. (2005): „Erreichbarkeitsindikatoren in der Nahverkehrsplanung”, Arbeitspapier 184, Institut für Raumplanung, Universität Dortmund

- [152] The White House (2014): „An Economic Analysis of Transportation Infrastructure Investment“
- [153] GEURS K., BOON W., VEN WEE B. (2009): „Social Impacts of Transport: Literature Review and the State of the Practice of Transport Appraisal in the Netherlands and the United Kingdom“, Transport Reviews
- [154] Transport for NSW (2016): „Principles and Guideline for Economical Appraisal of Transport Investment and Initiatives“, Transport economic Appraisal Guidelines
- [155] U.S. Department of Transport (2015): „Status of the Nation’s Highways, Bridges, and Transit, Conditions & Performance“, Report to congress
- [156] VANCLAY F. (2002): „Conceptualising social impacts“, Environmental Impact Assessment
- [157] Verkehrsclub Österreich VCÖ (2009): „Soziale Aspekte von Mobilität“, Schriftenreihe „Mobilität mit Zukunft“. VCÖ Forschungsinstitut (Hrsg.), Wien
- [158] WebTAG (2014): „Transport Analysis Guidance“, Unit A4.1 Social Impact Appraisal, Department for Transport, London
- [159] WebTAG (2015): „Transport Analysis Guidance“, Unit A3, Environmental Impact Appraisal, Department for Transport, London
- [160] WIFAS (2013): „Ein Modell zur Abschätzung sozialer Wirkungen missionsorientierter Forschungsförderprogramme am Beispiel der Personen- und Gütermobilität“, Ein Projekt finanziert im Rahmen der 2. Ausschreibung des Programms Mobilität der Zukunft [Personenmobilität und Gütermobilität], bmvit
- [161] KAVITHA S., DANIEL R.J., SUMANGALA K. A. (2013): „Simple analytical design approach based on computer aided analysis of bulk micromachined piezoresistive MEMS accelerometer for concrete SHM applications“, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation
- [162] NORRIS A., SAAFI M., ROMINE P. (2008): „Temperature and moisture monitoring in concrete structures using embedded nanotechnology/microelectromechanical systems (MEMS) sensors“, Construction and Building Materials
- [163] BMVBS (2010): „Aktualisierung von Bewertungsansätzen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen in der Bundesverkehrswegeplanung“, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.) Essen/Freiburg/München
- [164] Statistisches Bundesamt (o. J.): „Zahlen und Fakten zum Thema Transport und Verkehr“, URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Verkehrsunfaelle.html>, besucht am 06.11.2018
- [165] Umweltbundesamt (UBA) (2014): „Best-Practice-Kostensätze für Luftschadstoffe, Verkehr, Strom- und Wärmeerzeugung“, Anhang B der „Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten, Dessau-Roßlau, aktualisierte Fassung Februar
- [166] KÖNIG A., AXHAUSEN K.W., ABAY G. (2004): „Zeitkostenansätze im Personenverkehr“, final report for SVI 2001/534, Schriftenreihe, 1065, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
- [167] Statistisches Bundesamt (o. J.): „GENESIS-Online Datenbank“, Tabelle 62431-0001 „Arbeitskosten je geleistete Stunde (Jahresschätzung): Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige“
- [168] FOLLMER R., GRUSCHWITZ D., JESKE B., QUANDT S., LENZ B., NOBIS C., KÖHLER K., MEHLIN M. (2010): „Mobilität in Deutschland 2008, Kurzbericht Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends“, Bonn und Berlin
- [169] BMVI (2017): „Verkehr in Zahlen 2017/2018“, ISBN 978-3-87154-617-4
- [170] Infras (2017): „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)“, Version 3.3
- [171] KBA (2018): „Bestand an Pkw am 1. Januar 2018 nach ausgewählten Kraftstoffarten“, online Statistik, [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2018\\_b\\_](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2018_b_)

- umwelt\_dusl.html?nn=663524, besucht am: 15.03.2019
- [172] PTV AG (2012): „SeRoN – Security of Road Transport Networks“, FP7-ICT-SEC-2007-1
- [173] BMVBS (2003): „Grundzüge der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsmethodik, Bundesverkehrswegeplan 2003“, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.)
- [174] DeGROOT M. H. (1970): „Optimal statistical decisions“, McGraw-Hill
- [175] API (2000): „Risk-Based Inspection. Base Resource Document“, 1<sup>st</sup> edition. American Petroleum Institute: Washington D.C.
- [176] TANG W.H. (1973): „Probabilistic Updating of Flaw Information“, Journal of Testing and Evaluation
- [177] STRAUB D. (2004): „Generic Approaches to Risk Based Inspection Planning for Steel Structures“, IBK Bericht, ETH Zurich, Switzerland
- [178] STRAUB D. (2015): „The Role of Information in Risk Management of Engineering Systems“, Invited lecture, ETH Risk Center, Zürich, May 5, 2015
- [179] STRAUB D., PAPAIOANNOU I., BETZ W. (2016): „Bayesian analysis of rare events“, Journal of Computational Physics
- [180] TEICHGRÄBER M. (2017): „Stiffness and damage identification by Bayesian updating of a multi-component steel frame“, Master's thesis, Technische Universität München
- [181] EN 1990:2010-12 (2010): „Eurocode – Basis of Structural Design“
- [182] SÄTTELE M. (2015): „Quantifying the Reliability and effectiveness of Early Warning Systems for Natural Hazards“, Dissertation, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Technische Universität München
- [183] DIN 1076 (2018): „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen“, Überwachung und Prüfung
- [184] BAST (2016): „Bauwerksbuch nach DIN 1076, AS W-Langerfeld (93)/Schwelme-Brücke
- [185] Straßen.NRW (2013): „Rissmonitoring Schwelmetalbrücke Monatlicher Zustandsbericht Nr. 1“
- [186] Straßen.NRW (2019): „Online-Auskunft der Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen“ <https://www.nwsib-online.nrw.de/>, besucht am: 15.03.2019
- [187] Buschlinger M., Jarosch A. (2016): „Verstärkung von Brücken mit externer Vorspannung – Einsatzbereiche und Randbedingungen“, 26. Dresdener Brückensymposium, Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken, 14.-15. März 2016, TU Dresden
- [188] Straßen.NRW (2018): „Bauwerksbuch nach DIN 1076 für das Bauwerk 4506990, A42/L287, AS Duisburg-Beeck Teilbauwerk 2“, Druck vom 09.07.2018
- [189] SPERLING D., SCHMIDT H. (2017): „Bewertung der Restlebensdauer von Spannbetonbrücken durch Koppelfugenmonitoring an Praxisbeispielen“, 9. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen, 21.09.2017, TU Dresden
- [190] Wuppertaler Rundschau (2016): „A1: Weiter Engpass auf Schwelmetalbrücke“, 21 April, Lokales
- [191] TROTTNOW U. (2018): „HOCHTIEF wins contract to replace Schwelmetal Bridge in Wuppertal“, Hochtief Press release 19.09.2018, Opernplatz 2, 45128 Essen
- [192] BUSCHMEIER W., RODER C., GUSIA P. J. (2009) „Erfahrungen bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit vorgespannter Bewehrung von älteren Spannbetonbrücken“, Bautechnik
- [193] FREUNDT U., VOGT R., BÖNING S., MICHAEL D. (2014): „Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken“, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 106, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST
- [194] <https://nrw.deges.de/projekte/a-1-ersatzneubau-der-bruecke-schwelmetal/projektetails>, besucht am am 15.03.2019

- [195] BMVI (2015): „Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.)
- [196] MELHORN G. (2010): „Handbuch Brücken – Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten“, Springer Verlag
- [197] FISCHER, K., VILJOEN, C., KÖHLER, J., FABER, M.H. (2019): „Optimal and acceptable reliabilities for structural design“, *Journal of Structural Safety*
- [198] FEHSE W. (1972): „Risse in Koppelfugen von Spannbetonüberbauten“. BAST, Köln
- [199] PFOHL H. (1973): „Risse an Koppelfugen von Spannbetonbrücken – Schadensbeobachtungen, mögliche Ursachen, vorläufige Folgerungen“, Mitteilungen aus dem Institut für Bautechnik
- [200] Straßen.NRW (2010): „Prüfbericht Hauptprüfung 2010 nach DIN 1076, A42/L287, AS Duisburg-Beeck, Teilbauwerk 2 und Teilbauwerk 3“
- [201] ZILCH, K.; PENKA E. (2004): „Einfluss des zunehmenden Schwerverkehrs auf die Nutzungsdauer von Bauwerken der Brückensklassen 30/30 und 45“. Schlussbericht BAST-FE 89.118/2002, München
- [202] HAARDT P. (1999): „Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken“, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 22, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST
- [203] BMVI (2017): „RI-EBW-PRÜF – Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.)
- [204] BMVBS (2013): „Anweisung Straßeninformationsbank – Teilsystem Bauwerksdaten ASB-ING“, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.)
- [205] Bundesminister für Verkehrs (1990): „RLS-90: Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen“, Bundesminister für Verkehrs, Abteilung Straßenbau
- [206] RICARDO-AEA (2014): „Update of the Handbook on External Costs of Transport“, Final Report, United Kingdom
- [207] PINKOWSKY, L. (2005): „Typisierung von Ganglinie und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage“, Fachbereich Bauingenieurwesen, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
- [208] BMVI (2014): „Handbuch für die Vergabe und Ausführung von Bauleistungen im Straßen- und Brückenbau (HVA B-StB)“, Ausgabe November 2014
- [209] BAST (2010): „Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland“, Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M 208
- [210] Krafftfahrtbundesamt (2019): „Verkehr in Kilometern der deutschen Krafftfahrzeuge 2017“, [https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraffverkehr/VerkehrKilometer/verkehr\\_in\\_kilometern\\_node.html;jsessionid=9B1E71923C642D7D6EB1324DCA9CBD15.live21302](https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraffverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html;jsessionid=9B1E71923C642D7D6EB1324DCA9CBD15.live21302), besucht am: 15.03.2019
- [211] HBEFA 3.2 (2019): „Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs“
- [212] Planco, ITP, TU Berlin (2015): „Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung“, FEProjekt 960974/2011 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Essen/Berlin/München
- [213] BMVBS, 2002: „Grundzüge der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsmethodik. Bundesverkehrswegeplan 2003“, Berlin

## Bilder

- Bild 1: Altersstruktur der Brückenbauwerke im deutschen Bundesfernstraßennetz [3]
- Bild 2: Brückenlängen der Brückenbauwerke im Deutschen Bundesfernstraßennetz [3]
- Bild 3: Zustandsnoten der Brückenbauwerke im Deutschen Bundesfernstraßennetz [3]
- Bild 4: Einflussgrößen, die bekannt sein müssen, um den Nutzen von Monitoringmaßnahmen zu bestimmen [eigene Darstellung]
- Bild 5: Illustration der Bayes'schen Regel [eigene Darstellung]
- Bild 6: Illustration einer bivariaten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer linearen Grenzzustandsgleichung und des zugehörigen Versagensbereiches [25]
- Bild 7: Zuverlässigkeitsindex in der Formulierung von [35]
- Bild 8: Schematisches zeitabhängiges Zuverlässigkeitsproblem [25]
- Bild 9: Ablauf des SKRIPT Verfahrens [eigene Darstellung nach [144]]
- Bild 10: Beispiel einer Übertragungsfunktion [eigene Darstellung nach [145]]
- Bild 11: Matrix zur prinzipiellen Vorgehensweise der Zusammenfassung der gewichteten Kritikalitätsbewertungsgrößen zu einem Wert für die Gemittelte Gesamt-Kritikalität GGK [eigene Darstellung nach [145]]
- Bild 12: Verkehrsmodellierung und gesamtwirtschaftliche Bewertungsansätze [eigene Darstellung nach [146]]
- Bild 13: Gesamtablauf des Priorisierungsverfahrens [eigene Darstellung nach [148]]
- Bild 14: Entscheidung/Ereignis-Baum [eigene Darstellung]
- Bild 15: Entscheidungs-/Ereignis-Baum zur Illustration eines typischen Entscheidungsproblems [eigene Darstellung]
- Bild 16: Einfaches Entscheidungsproblem mit zugeordneten a-priori Wahrscheinlichkeiten und Konsequenzen [eigene Darstellung]
- Bild 17: Illustration der Aktualisierung von Wahrscheinlichkeiten [eigene Darstellung]
- Bild 18: Illustration des Entscheidungs-/Ereignis-Baums für das Problem der Wasserversorgung [eigene Darstellung]
- Bild 19: Unterschiedliche Situationen beim Einsatz von Monitoring [eigene Darstellung]
- Bild 20: Die beiden Verteilungsdichtefunktionen  $f_{(U|A^-)}(u|A^-)$  und  $f_{(U|A)}(u|A)$  für jeweils passive und aktive Bewehrung, sowie das ermittelte Grenzpotenzial bei –“210 [mV]“ [39]
- Bild 21: Beispiel PoD Kurve [176]
- Bild 22: Probabilistische Modellierung des Messfehlers bei zwei unterschiedlichen Messresultaten [176]
- Bild 23: Prinzip der ROC (Receiver Operator Characteristics) Kurve. Durch Verschieben des Grenzwerts kann ein höherer PoD erreicht werden, dies führt aber immer auch zu einer höheren PFA [177]
- Bild 24: Vorgeschlagenes Konzept im Vergleich zu einer klassischen Bayes'schen Entscheidungsfindung wie sie in Kapitel 2.12 beschrieben ist [eigene Darstellung]
- Bild 25: Der Bauteilzustand Z sowie das Verkehrsbetriebsszenario VBS stellen den Informationsaustausch zwischen Systemebenen sicher [eigene Darstellung]
- Bild 26: Schematische Modelldarstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten im Fall, dass kein Monitoringsystem installiert wird [eigene Darstellung]
- Bild 27: Schematische Modelldarstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten im Fall, dass ein Monitoringsystem installiert wird [eigene Darstellung]
- Bild 28: Schematische Darstellung einer Zustandsentwicklung [eigene Darstellung]
- Bild 29: Schematische Darstellung des Schwellwertmonitorings und der Schwellwertgruppen [eigene Darstellung]
- Bild 30: Ist ein Monitoringergebnis  $Y^*$  gegeben kann davon der Basiszustandszahl Z bzw.

- der Schwellwertgruppe abgeleitet werden: links bei Berücksichtigung der Unsicherheiten, rechts ohne deren Berücksichtigung [eigene Darstellung]
- Bild 31: Bild zur Abschätzung der jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Schädigung eines Bauteils [eigene Darstellung]
- Bild 32: Beispielhafte Verknüpfung zwischen Verkehrsbetriebsszenario und Bauteilzustand [eigene Darstellung]
- Bild 33: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values in €/Tsd. Fz-km [125]
- Bild 34: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values differenziert nach der vierten Kennziffer (Qualität) [€/Tsd. Fz-km] [125]
- Bild 35: Berechnung des Gegenwartswerts der Gesamtkosten für den Fall, dass ein Monitoringsystem installiert ist [eigene Darstellung]
- Bild 36: HBEFA-Straßentypen [210]
- Bild 37: Merkmale der HBEFA-Straßentypen [210]
- Bild 38: Typisierung Netzmodell Bundesfernstraßen [125]
- Bild 39: Zwei q-v-Beziehungen (2 FS), [125]
- Bild 40: Tagesganglinientypen für die Werktage Di-Do [206]
- Bild 41: Vergleich absolute Tagesganglinien je Richtung [eigene Darstellung]
- Bild 42: Darstellung der Registerkarte „Einstellungen“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]
- Bild 43: Darstellung der Registerkarte „Parameter“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]
- Bild 44: Darstellung der Registerkarte „Indikatormodell“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]
- Bild 45: Darstellung der Registerkarte „Verkehrsbetriebsszenario“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]
- Bild 46: Darstellung der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]
- Bild 47: Darstellung der Registerkarte „Schwellwertgruppe“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]
- Bild 48: Darstellung der Registerkarte „Allgemeines“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]
- Bild 49: Darstellung der Registerkarte „Ergebnisse“ im Excel-Tool [eigene Darstellung]
- Bild 50: Querschnitt des Teilbauwerks 3 in Fahrtrichtung Köln. Zeichnung von Ing. Gesellschaft Thomas und Bökamp [186]
- Bild 51: Unterseite der Schwelmetalbrücke [186], Foto von Annette Jarosch, BBV, 2015
- Bild 52: Schematische Modelldarstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten im Fall eines Neubaus und für den Fall einer Verstärkung mit Monitoring der Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 53: Verkehrsszenario 2, wenn die Teilbauwerke 2 und 3 für den Verkehr gesperrt bleiben [eigene Darstellung]
- Bild 54: Verkehrsszenario 5, 4+0 Verkehr über Teilbauwerk 2 [eigene Darstellung]
- Bild 55: Verkehrsszenario 6 nach Neubau von Teilbauwerk 2 und 3 [eigene Darstellung]
- Bild 56: Verkehrsszenario 1, wenn die Teilbauwerke 2 und 3 für den Pkw-Verkehr freigegeben sind und das Monitoring erfolgreich ist [eigene Darstellung]
- Bild 57: Verkehrsszenario 3, in der Neubauphase von Teilbauwerk 2 nach Verstärkung von Teilbauwerk 3 [eigene Darstellung]
- Bild 58: Verkehrsszenario 5, 4+0 Verkehrsführung auf neuem Teilbauwerk 2 [eigene Darstellung]
- Bild 59: PTV Validate Straßennetz Europas (links) und das Netzmodell Deutschland (rechts) [eigene Darstellung]
- Bild 60: Verwendetes PTV Validate Teilnetz [eigene Darstellung]
- Bild 61: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values in €/Tsd. Fz-km [125]
- Bild 62: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values differenziert nach der

- vierten Kennziffer (Qualität) [€/Tsd. Fz-km] [125]
- Bild 63: Kostensätze für die Lärmberechnung nach Raumtypen in Anlehnung an [206]
- Bild 64: Kostenverteilung der Indikatoren, für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 65: Kostenveränderung pro Tag zwischen den Szenarien und dem Basisfall (keine verkehrliche Einschränkung) der Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 66: Oberzentren Schwelmetalbrücke [Quelle: ©OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA]
- Bild 67: Vergleich der durchschnittlichen Fahrzeit in den Szenarien vom Ennepe-Ruhr-Kreis sowie Dortmund zu den jeweiligen Oberzentren [eigene Darstellung]
- Bild 68: Übersicht über die eingesetzten Rissmonitore [184]
- Bild 69: Eingabe in der Registerkarte „Parameter“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 70: Eingabe in der Registerkarte „Verkehrsbetriebsszenario“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 71: Eingabe auf der Registerkarte „Schwellenwertgruppen“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 72: Ereignisbaumdarstellung mit den Schwellenwerten für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 73: Eingabe auf der Registerkarte „Indikatormodell“ [eigene Darstellung]
- Bild 74: Eingabe der allgemeinen Spalten auf der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 75: Eingabe der Zeitplanung auf der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 76: Generelle Eingaben zum Projekt in der Registerkarte „Allgemeines“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 77: Eingabe der Expertenschätzung zur Wahrscheinlichkeit, dass das Monitoring kritisch ist auf der Registerkarte „Allgemeines“ für die Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 78: Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit (auf der Registerkarte „Allgemeines“) [eigene Darstellung]
- Bild 79: Ergebnisse auf der Registerkarte „Allgemeines“ [eigene Darstellung]
- Bild 80: Ergebnisse der geschätzten Kosten [eigene Darstellung]
- Bild 81: Zeitliche Entwicklung der Kosten im Beispiel der Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 82: Zeitliche Entwicklung des Schadensindikators im Beispiel der Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 83: Kumulative Versagenswahrscheinlichkeit [eigene Darstellung]
- Bild 84: Einfluss des Diskontierungssatzes auf die Grenzwahrscheinlichkeit und die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit [eigene Darstellung]
- Bild 85: Autobahnbrücke in Duisburg-Beeck [187]
- Bild 86: Querschnitt der Brücke in Duisburg-Beeck [187]
- Bild 87: Illustration einer vollgestoßenen Koppelfugen [191]
- Bild 88: Gerissene Koppelfugen: Querrisse, Breite 0,1 mm, Länge: 40,0 cm an zwei Koppelfugen [199]
- Bild 89: Schematische Modelldarstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten im Fall eines Neubaus und für den Fall einer Verstärkung mit Monitoring [eigene Darstellung]
- Bild 90: Verkehrsszenario 6 nach während des Neubaus des nördlichen Teilbauwerks [eigene Darstellung]
- Bild 91: Verkehrsszenario 7 nach während des Neubaus des südlichen Teilbauwerks [eigene Darstellung]

- Bild 92: Verkehrsszenario 1 nach einem möglichen Neubau der Autobahnbrücke [eigene Darstellung]
- Bild 93: Verkehrsszenario 2 während der Verstärkung der Brücke (noch ohne Instandsetzung und Monitoring) [eigene Darstellung]
- Bild 94: Verkehrsszenario 3 während der Instandsetzung südlicher Teil (Monitoring) [eigene Darstellung]
- Bild 95: Verkehrsszenario 4 während der Instandsetzung nördlicher Teil (Monitoring) [eigene Darstellung]
- Bild 96: Verkehrsszenario 2 nach Abschluss der Arbeiten mit weiterer Überwachung (Monitoring) [eigene Darstellung]
- Bild 97: Verkehrsszenario 1 nach Abschluss der Arbeiten und erfolgreichem Monitoring [eigene Darstellung]
- Bild 98: Kostenveränderung zwischen den Szenarien und dem Basisfall (keine verkehrliche Einschränkung) der Brücke Duisburg-Beeck pro Tag [eigene Darstellung]
- Bild 99: Oberzentren für die Brücke Duisburg-Beeck [Quelle: ©OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA]
- Bild 100: Vergleich der durchschnittlichen Fahrzeit in den Szenarien B1 (Basisszenario) und B3 (Teilspernung) von Krefeld zu den jeweiligen Oberzentren [eigene Darstellung]
- Bild 101: Eingabe in der Registerkarte „Parameter“ für die Autobahnbrücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 102: Eingabe in der Registerkarte „Verkehrsbetriebsszenario“ für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 103: Eingabe auf der Registerkarte „Schwellenwertgruppen“ für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 104: Darstellung der ordinalen Schwellenwertgruppen im Ereignisbaum für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 105: Eingabe auf der Registerkarte „Indikatormodell“ für das Beispiel Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 106: Eingabe der allgemeinen Spalten auf der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 107: Eingabe der Zeitplanung auf der Registerkarte „Maßnahmenkatalog“ für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 108: Generelle Eingaben zum Projekt in der Registerkarte „Allgemeines“ für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 109: Berücksichtigung einer Expertenschätzung (auf der Registerkarte „Allgemeines“) für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 110: Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit (auf der Registerkarte „Allgemeines“) für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 111: Zusammenstellung der erwarteten Kosten für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Bild 112: Erwarteter monetärer Vorteil in Abhängigkeit von der Diskontierungsrate und der Experteneinschätzung [eigene Darstellung]

## Tabellen

- Tab. 1: Zusammenstellung sozio-ökonomischer Wirkungen in der Literatur [eigene Darstellung]
- Tab. 2: Kategorisierungssystem von SHM [91]
- Tab. 3: Likelihood der wahren Brückenzustände bedingt durch die Ergebnisse des Monitorings
- Tab. 4: Fallgruppen für das Format von Monitoringresultaten und Schädigungsparametern [eigene Darstellung]
- Tab. 5: Falls sowohl Zustand als auch Beobachtung binär sind, ist die Likelihood durch eine 2x2 Konfusionsmatrix beschrieben [eigene Darstellung]

- Tab. 6: Allgemeine Konfusionsmatrix [eigene Darstellung]
- Tab. 7: Systemebenen die im Konzept berücksichtigt werden, deren Beschreibung und die Modelle die auf der jeweiligen Ebene modelliert werden [eigene Darstellung]
- Tab. 8: Allgemeine Konfusionsmatrix [eigene Darstellung]
- Tab. 9: Konfusionsmatrix [eigene Darstellung]
- Tab. 10: Parameter zur Beschreibung einer Monitoringmaßnahme [eigene Darstellung]
- Tab. 11: Zielzuverlässigkeiten in Abhängigkeit der zu erwartenden Konsequenzen für Bauteile [180]
- Tab. 12: Bezeichnung der Unterhalts- und Instandsetzungsmaßstrategie [eigene Darstellung]
- Tab. 13: Definition der Parameter zur Beschreibung einer Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahme [eigene Darstellung]
- Tab. 14: Distanzabhängige Zeitwerte für die nicht geschäftlichen Fahrtzwecke nach Entfernungsstufen [125]
- Tab. 15: Wertansätze je exponierter Person in Abhängigkeit von der Lärmexposition [125]
- Tab. 16: Wertansätze für spezifische Vermeidungskosten bei Einsatz von Lärmschutzwänden in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz [125]
- Tab. 17: Anteile der Fahrzeuggruppen an Jahresfahrleistung nach BVWP 2030 [125]
- Tab. 18: Verkehrszustände nach HBFefa 3.2 und BVWP 2030 [125], [210]
- Tab. 19: Zuordnung Tagesganglinientyp und Straßentyp [206]
- Tab. 20: Beispielhafte Zuordnung von Tagesganglinientypen zu Straßentypen je Richtung [eigene Darstellung]
- Tab. 21: Verteilung des DTV und Auslastungsgrad auf einer Autobahn 2x2 Fahrspuren mit Kapazität von 3.900 Pkw-E je Querschnitt [eigene Darstellung]
- Tab. 22: Kraftstoffverbrauch Pkw-Diesel (in l/100 Fz-km) bei Straßentyp A1 [125]
- Tab. 23: CO-Emissionen (g/km) Lkw ohne Anhänger (ab 7,5 t) [211]
- Tab. 24: Schadenskosten für Abgasemissionen innerorts und außerorts [125]
- Tab. 25: Zeitplan für den Fall, dass Teilbauwerke verstärkt wird und ein Monitoringsystem zur Überwachung installiert wird [eigene Darstellung]
- Tab. 26: Verkehrsszenarien für AS W-Langenfeld (93) [eigene Darstellung]
- Tab. 27: Fahrleistungsgewichtete und aggregierte Kostensätze für die Indikatoren Betriebskosten und Reisezeit [eigene Darstellung]
- Tab. 28: Zeitplan für einen Ersatzneubau, wenn die Teilbauwerke 2 und 3 gesperrt werden müssten [eigene Darstellung]
- Tab. 29: Kostensätze in Kombination mit Raumtyp, Verkehrsfluss und Pkw-Lkw [eigene Darstellung]
- Tab. 30: Absolute Tageswerte der Kosten für die Szenarien der Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Tab. 31: Anzahl der Pkw- und Lkw-Fahrten sowie Reisezeit in Fz/h aus Visum zwischen den Oberzentren für die Schwelmetalbrücke und alle betrachteten Szenarien [eigene Darstellung]
- Tab. 32: Erreichbarkeitsmaß für Pkw und Lkw für das Szenario S6 Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Tab. 33: Erreichbarkeitsmaß für Pkw und Lkw für die Szenarien S2/S4 Schwelmetalbrücke [eigene Darstellung]
- Tab. 34: Zeitplan für einen Ersatzneubau mit den verschiedenen Verkehrsszenarien für die Brücke in Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Tab. 35: Zeitplan mit den verschiedenen Verkehrsszenarien [eigene Darstellung]
- Tab. 36: Verkehrsszenarien für AS Duisburg-Beeck (5) [eigene Darstellung]

- 
- Tab. 37: Absolute Tageswerte der Kosten für die Szenarien der Brücke Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Tab. 38: Anzahl der Pkw- und Lkw-Fahrten sowie Reisezeit in Fz/h aus Visum zwischen den Oberzentren für die Brücke Duisburg-Beeck und alle betrachteten Szenarien [eigene Darstellung]
- Tab. 39: Erreichbarkeitsmaß für Pkw- und Lkw für das Szenario B1 der Brücke Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Tab. 40: Erreichbarkeitsmaß für Pkw- und Lkw für das Szenario B3 der Brücke Duisburg-Beeck [eigene Darstellung]
- Tab. 41: Distanzabhängige Zeitwerte für die nicht geschäftlichen Fahrtzwecke nach Entfernungsstufe [125]
- Tab. 42: Wertansätze je exponierter Person in Abhängigkeit von der Lärmexposition [125]
- Tab. 43: Wertansätze für spezifische Vermeidungskosten bei Einsatz von Lärmschutzwänden in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz [125]
- Tab. 44: Fahrleistungsgewichtete Betriebskostengrundwerte und spezifische Vorhaltungskosten der Personenkraftwagen [125]
- Tab. 45: Fahrleistungsgewichtete Betriebskostengrundwerte und spezifische Vorhaltungskosten der leichten Nutzfahrzeuge (LN) und Lastkraftwagen ohne Anhänger (LS) [125]
- Tab. 46: Fahrleistungsgewichtete Betriebskostengrundwerte und spezifische Vorhaltungskosten der Lastkraftwagen mit Anhänger (ZL) und Sattelzüge mit Auflieger (ZS) [125]
- Tab. 47: Spezifische Energiekosten [125]
- Tab. 48: Durchschnittliche Pkw-Besetzungsgrade in Anzahl Personen/Pkw gemäß VP 2030 [125]
- Tab. 49: Wartezeitbezogene Wertansätze zur Bewertung von Energiekosten überlastungsbedingter Stausituationen an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen [125]
- Tab. 50: Durchschnittliche Pkw-Besetzungsgrade in Anzahl Personen/Pkw gemäß VP 2030 [125]
- Tab. 51: Mittlere Zeitwerte der Ladung nach Transportsegmenten [125]
- Tab. 52: Ermittlung des Emissionskostensatzes bei der Erzeugung von elektrischem Strom [125]
- Tab. 53: Gegenüberstellung des Primärenergie-trägermix im Prognosejahr 2030 mit den Vergleichswerten im Basisjahr 2012 [125]
- Tab. 54: Wartezeitbezogene Wertansätze zur Bewertung von Abgasbelastungen überlastungsbedingter Stausituationen an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen [125]
- Tab. 55: Kraftstoffverbrauch Pkw-Diesel (in l/100 Fz-km) bei Straßentyp A1 [125]
- Tab. 56: Spezifische Schadenskosten für Abgasemissionen bei der Stromerzeugung und beim Betrieb von Verbrennungsmotoren [125]

## Anhang

### Anhang 1 – Bewertungsvorschriften der Indikatoren nach BVWP 2030

#### I Bewertungsvorschriften für die Nutzenkomponente „Veränderung der Betriebskosten“ nach BVWP 2030

<b>Nutzenkomponente: Veränderung der Betriebskosten (NB)</b>	
<b>A. Dimension/Bewertungsfaktoren/Bezugsgrößen</b>	
<b>Dimension:</b>	T€/Jahr
<b>Bewertungsfaktoren:</b>	<p>VH – Fahrtzeitabhängige spezifische Vorhaltungskosten je Fahrzeuggruppe und Antriebsart entsprechend Tabellen 6, Tabelle 7 und Tabelle 8</p> <p>PK – Pkw geschäftlich: Wertansätze entsprechend Abbildung 9 PK – LN und LS: Wertansatz 17,64 €/Fz-Std</p> <p>PK – ZL und ZS: Wertansatz 20,14 €/Fz-Std</p> <p>BGK – Fahrleistungsabhängige Betriebskostengrundwerte je Fahrzeuggruppe entsprechend Tabellen 6, 7 und 8</p> <p>EK – spezifische Energie- und Kraftkosten gemäß Tabelle 9 und Energieverbrauchsfaktoren gemäß Tabelle 18 und [212]<sup>2122</sup> sowie Energieverbrauchsfaktor von Pkw mit Elektroantrieb in Höhe von 0,21 kWh/Fz-km</p>
<b>Bezugsgröße:</b>	Netzbestandteile, die im Planfall gegenüber dem Bezugsfall eine geänderte Verkehrsbelastung aufweisen (Wirkungsstrecken <sup>23</sup> )
<b>B. Bewertungsvorschrift</b>	
$NB = NB (VH) + NB (PK) + NB (BGK) + NB (EK)$ $NB (VH) = \sum_s \sum_{FG} \Delta FT_{s,FG} \times v_{h_{FG}} \times (-1)$ <p>mit</p> <p>NB (VH)            Nutzen aus Veränderung der Vorhaltungskosten</p> <p>s                    Index der betrachteten Strecke</p> <p>FG                  Index Fahrzeuggruppe</p> <p><math>\Delta FT</math>              Fahrzeitdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std/Jahr<sup>24</sup></p> <p>v<sub>h</sub>                  spezifische Vorhaltungskosten in €/Fz-Std gemäß Tabellen 6, 7 und 8</p> <p>Hinweis: Die Vorhaltungskosten sind im Pkw-Verkehr nur für den geschäftlichen Fahrtzweck zu berechnen.</p> <p>Personalkosten Berechnungsvariante 1: Fahrzeitdifferenzen des geschäftlichen Pkw-Verkehrs werden in den Personalkosten (Nutzenkomponente NB) berücksichtigt:</p>	

<sup>21</sup> Tabellen A67 bis A165 (S. 490 bis 516), unter [212].

<sup>22</sup> In [212] sind Energieverbrauchsfaktoren hinterlegt, die hinsichtlich der Fahrzeuggruppe LS eine stärkere Differenzierung aufweisen. Sofern das Verkehrsmengengerüst eine entsprechende Struktur aufweist, kann damit eine differenzierte Bewertung erfolgen. Alternativ können die Faktoren nach HBEFA [211] zur Anwendung kommen.

<sup>23</sup> Mit Wirkungsstrecken werden Strecken bezeichnet, die sich durch eine Änderung der Verkehrsbelastung zwischen Bezugs- und Planfall auszeichnen (Änderung mind. 1 Fz/Tag).

<sup>24</sup> Eventuelle staubedingte Wartezeitdifferenzen an Autobahnkreuzen und Autobahndreiecken sind der Fahrzeitdifferenz hinzuzurechnen. Diese Wartezeitdifferenzen treten nur dann auf, wenn durch die zu bewertenden Projekte auch Veränderungen von Überlastungssituationen an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen zu erwarten sind.

$$NB(PK) = \left( \sum_s \sum_{FG} \Delta FT_{s,FG(GV)} \times pkl_{FG(GV)} + \sum_s \sum_{DK} \Delta FT_{DK,G,Pkw,s} \times zwP_{DK,G,Pkw} \times bg_{DK,G,Pkw} \right) \times (-1)$$

mit

NB (PK)	Nutzen aus Veränderung der Personalkosten
s	Index der betrachteten Strecke
FG(GV)	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe (hier nur LN, LS, ZL, ZS)
$\Delta FT$	Fahrzeitdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std/Jahr <sup>25</sup>
pkl	spezifische Lohnkosten für Lkw-Fahrer in €/Fz-Std
DK	Distanzklasse z.B. gemäß Tabelle 3 oder in aggregierter Form
G	Fahrtzweck Geschäft
Pkw	Fahrzeuggruppe des gesamten Pkw-Verkehrs
$zwP_{DK,G,Pkw}$	Wertansatz je Distanzklasse für Reisezeitersparnisse des Personenverkehrs mit geschäftlichem Fahrtzweck in €/P-Std gemäß Abbildung 9
$bg_{DK,G,Pkw}$	Besetzungsgrad je Distanzklasse für den Pkw-Verkehr mit geschäftlichem Fahrtzweck in P/Fz gemäß Tabelle 10

Hinweis: die Fahrzeitdifferenzen im geschäftlichen Pkw-Verkehr können entweder an dieser Stelle berücksichtigt werden oder alternativ bei der Berechnung der Nutzen aus Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr. Es ist darauf zu achten, dass nur eine der genannten Alternativen in Ansatz gebracht wird um eine Doppelbewertung zu vermeiden. Die streckenbezogene Berechnung der Fahrzeitdifferenzen im geschäftlichen Pkw-Verkehr anhand der dargestellten Vorschrift erfolgt für den verbleibenden, induzierten und verlagerten Verkehr des Verkehrsträgers Straße. Änderungen der Fahrzeiten im geschäftlichen Personenverkehr aus Verkehrsverlagerungen werden für den abgebenden Verkehrsträger.

**Personalkosten Berechnungsvariante 2: Fahrzeitdifferenzen des geschäftlichen Pkw-Verkehrs gehen über die Nutzenkomponente für die Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr (NRZ) in die Bewertung ein:**

$$NB(PK) = \sum_s \sum_{FG} \Delta FT_{s,FG(GV)} \times pkl_{FG(GV)} \times (-1)$$

mit

NB (PK)	Nutzen aus Veränderung der Personalkosten
s	Index der betrachteten Strecke
FG(GV)	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe (hier nur LN, LS, ZL, ZS)
$\Delta FT$	Fahrzeitdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std/Jahr <sup>26</sup>
pkl	spezifische Lohnkosten für Lkw-Fahrer in €/Fz-Std

$$NB(BGK) = \sum_s \sum_{FG} \Delta FL_{s,FG} \times bkl_{FG} \times 10^{-2} \times (-1)$$

mit

NB (BGK)	Nutzen aus Veränderung der Betriebsgrundkosten
s	Index der betrachteten Strecke

<sup>25</sup> Eventuelle staubedingte Wartezeitdifferenzen an Autobahnkreuzen und Autobahndreiecken sind der Fahrzeitdifferenz hinzuzurechnen. Diese Wartezeitdifferenzen treten nur dann auf, wenn durch die zu bewertenden Projekte auch Veränderungen von Überlastungssituationen an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen zu erwarten sind.

<sup>26</sup> Eventuelle staubedingte Wartezeitdifferenzen an Autobahnkreuzen und Autobahndreiecken sind der Fahrzeitdifferenz hinzuzurechnen. Diese Wartezeitdifferenzen treten nur dann auf, wenn durch die zu bewertenden Projekte auch Veränderungen von Überlastungssituationen an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen zu erwarten sind.

FG	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe
$\Delta FL$	Fahrleistungsdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-km/Jahr
$bkl_{FG}$	spezifischer Betriebskostengrundwert der betrachteten Fahrzeuggruppe in €/100 Fz-km gemäß Tabellen 6, 7 und 8
Hinweis: die Betriebsgrundkosten sind im Pkw-Verkehr sowohl für den geschäftlichen als auch für nicht geschäftliche Fahrtzwecke zu berechnen.	
$NB(EK) = (\Delta EV_{PO} \times ek_{PO} + \Delta EV_{PD} \times ek_{PD} + \Delta EV_{FG(GV)} \times ek_{FG(GV)} + \Delta EV_{PG} \times ek_{PG} + \Delta EV_{PE} \times ek_{PE} + \Delta WT_{FG} \times ekz_{FG}) \times (-1)$	
mit	
NB(EK)	Nutzen aus Veränderung der Energiekosten
$\Delta EV$	Differenz des Energieverbrauchs (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. l/Jahr bzw. MWh/Jahr
PO	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Ottoantrieb
ek	Energie- und Kraftkosten im Jahr 2030 in €/l bzw. €/kWh gemäß Tabelle 9
PD	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Dieselantrieb
FG(GV)	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe (hier nur LN, LS, ZL, ZS)
PG	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Gasantrieb
PE	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Elektroantrieb
$\Delta WT$	Differenz der staubedingten Wartezeiten an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std/Jahr <sup>27</sup>
FG	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe
ekz	spezifische wartezeitabhängige Energiekosten in €/Fz-Std gemäß Tabelle 11
$\Delta EV_{PO} = \sum_s \sum_h \Delta FL_{PO,s,h} \times 10^{-2} \times evl_{PO,HST,Z,v_{max}}$	
$\Delta EV_{PD} = \sum_s \sum_h \Delta FL_{PD,s,h} \times 10^{-2} \times evl_{PD,HST,Z,v_{max}}$	
$\Delta EV_{FG(GV)} = \sum_s \sum_{FG(GV)} \sum_h \Delta FL_{s,FG(GV),h} \times 10^{-2} \times evl_{FG(GV),HST,Z,v_{max}}$	
$\Delta EV_{PG} = \sum_s \sum_h \Delta FL_{PG,s,h} \times 10^{-2} \times evl_{PG,HST,Z,v_{max}}$	
$\Delta EV_{PE} = \sum_s \sum_h \Delta FL_{PE,s} \times 10^{-2} \times evl_{PE}$	
mit	
PO	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Ottoantrieb
s	Index der betrachteten Strecke
h	Index der betrachteten Stunde bzw. Stundengruppe des Jahres
$\Delta FL$	Fahrleistungsdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-km/Jahr
evl	spezifischer Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch in l/100 Fz-km gemäß Tabelle 18 und [212]: <sup>28 29</sup> bzw. 21

<sup>27</sup> Diese Wartezeitdifferenzen treten nur dann auf, wenn durch die zu bewertenden Projekte auch Veränderungen von Überlastungssituationen an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen zu erwarten sind.

<sup>28</sup> Tabellen A67 bis A165 (S. 490 bis 516), [212].

kWh/100 Fz-km für Elektrofahrzeuge	
HST	Index für den HBEFA-Straßentyp – Zuordnung zu BVWP-Streckentypen <sup>30</sup>
Z	Index Verkehrszustand (flüssig, dicht, gesättigt, stop and go), Definition über Auslastung ag
v <sub>max</sub>	zulässige Höchstgeschwindigkeit der betrachteten Strecke in km/h
PD	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Dieselantrieb
FG(GV)	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe (hier nur LN, LS, ZL, ZS)
PG	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Gasantrieb
PE	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Elektroantrieb
Hinweis: Die Energiekosten sind im Pkw-Verkehr sowohl für den geschäftlichen als auch für nicht geschäftliche Fahrtzwecke zu berechnen.	
<b>C. Datenbedarf und Erläuterungen zur Anwendung der Bewertungsvorschrift</b>	
Für die Berechnungen sind folgende Werte pro Strecke und Stunde bzw. Stundengruppe für den Bezugsfall und den Planfall aus dem Modell zu ziehen:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrleistungen je <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Fahrzeuggruppe</li> <li>○ Verkehrszustand</li> <li>○ zulässige Höchstgeschwindigkeit</li> <li>○ BVWP- bzw. HBEFA-Streckentyp</li> </ul> </li> <li>• Fahrzeiten je Fahrzeuggruppe insgesamt</li> </ul>	
Sofern durch die zu bewertenden Projekte auch Veränderungen von Überlastungssituationen und staubedingten Wartezeiten an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen zu erwarten sind, werden zusätzlich die mittels Rückstaumodell ermittelten staubedingten Wartezeiten als Eingangsdaten erforderlich.	

## II Bewertungsvorschriften für die Nutzenkomponente „Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr (NRZ)“ nach BVWP 2030

Nutzenkomponente: Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr (NRZ)	
A. Dimension/Bewertungsfaktoren/Bezugsgrößen	
<b>Dimension:</b>	T€/Jahr
<b>Bewertungsfaktoren:</b>	Distanzabhängige Zeitwerte differenziert nach geschäftlichem und nicht geschäftlichen Fahrtzwecken
<b>Bezugsgröße:</b>	Netzbestandteile, die im Planfall gegenüber dem Bezugsfall eine geänderte Streckenbelastung aufweisen (Wirkungsstrecken)

<sup>29</sup> In [212] sind Energieverbrauchsfaktoren hinterlegt, die hinsichtlich der Fahrzeuggruppe LS eine stärkere Differenzierung aufweisen. Sofern das Verkehrsmengengerüst eine entsprechende Struktur aufweist, kann damit eine differenzierte Bewertung erfolgen. Alternativ können die Faktoren nach HBEFA [211] zur Anwendung kommen.

<sup>30</sup> mittels Tabellen Anhang A [126].

**B. Bewertungsvorschrift**

**Berechnungsvariante 1: Fahrzeitdifferenzen des geschäftlichen Pkw-Verkehrs werden in den Personalkosten (Nutzenkomponente NB) berücksichtigt:**

$$NRZ = \sum_s \sum_{DK} \Delta FT_{DK,nG,Pkw,s} \times ZWP_{DK,nG} \times bg_{DK,nG} \times (-1)$$

mit

s	Index der betrachteten Strecke
DK	Distanzklasse
$\Delta FT$	Fahrzeitdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std/Jahr
nG	nicht geschäftliche Fahrtzwecke
Pkw	Fahrzeuggruppe des gesamten Pkw-Verkehrs
$ZWP_{DK,nG}$	Wertansatz je Distanzklasse für Reisezeitersparnisse des Personenverkehrs mit nicht geschäftlichem Fahrtzweck in €/P-Std gemäß Tabelle 3
$bg_{DK,nG}$	Besetzungsgrad je Distanzklasse für den Pkw-Verkehr mit nicht geschäftlichem Fahrtzweck in P/Fz gemäß Tabelle 12

**Berechnungsvariante 2: Fahrzeitdifferenzen des geschäftlichen Pkw-Verkehrs gehen über die Nutzenkomponente NRZ in die Bewertung ein:**

$$NRZ = \left[ \left( \sum_s \sum_{DK} \Delta FT_{DK,G,Pkw,s} \times ZWP_{DK,G} \times bg_{DK,G} \right) + \left( \sum_s \sum_{DK} \Delta FT_{DK,nG,Pkw,s} \times ZWP_{DK,nG} \times bg_{DK,nG} \right) \right] \times (-1)$$

mit

s	Index der betrachteten Strecke
DK	Distanzklasse
$\Delta FT$	Fahrzeitdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std/Jahr
G	Fahrtzweck Geschäft
Pkw	Fahrzeuggruppe des gesamten Pkw-Verkehrs
$ZWP_{DK,G}$	Wertansatz je Distanzklasse für Reisezeitersparnisse des Pkw-Verkehrs mit geschäftlichem Fahrtzweck in €/P-Std gemäß Abbildung 9
$bg_{DK,G}$	Besetzungsgrad je Distanzklasse für den Pkw-Verkehr mit geschäftlichem Fahrtzweck in P/Fz gemäß Tabelle 10
nG	nicht geschäftliche Fahrtzwecke
$ZWP_{DK,nG}$	Wertansatz je Distanzklasse für Reisezeitersparnisse des Personenverkehrs mit nicht geschäftlichem Fahrtzweck in €/P-Std gemäß Tabelle 3.
$bg_{DK,nG}$	Besetzungsgrad je Distanzklasse für den Pkw-Verkehr mit nicht geschäftlichem Fahrtzweck in P/Fz gemäß Tabelle 10

**C. Datenbedarf und Erläuterungen zur Anwendung der Bewertungsvorschrift**

In die Bewertungsvorschrift gehen sämtliche Strecken mit Belastungsänderungen zwischen Bezugs- und Planfall ein. Je Strecke müssen für den geschäftlichen und nicht geschäftlichen Anteil der Pkw-Fahrten die Fahrzeitunterschiede, Besetzungsgrade und die Anteile zu den Distanzklassen vorliegen.

Die streckenbezogene Berechnung der Reisezeitnutzen anhand der dargestellten Vorschrift erfolgt für den verbleibenden, induzierten und verlagerten Verkehr des Verkehrsträgers Straße.

### III Bewertungsvorschriften für „Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr“ nach BVWP 2030

<b>Nutzenkomponente: Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr (NTZ)</b>	
<b>A. Dimension/Bewertungsfaktoren/Bezugsgrößen</b>	
<b>Dimension:</b>	T€/Jahr
<b>Bewertungsfaktoren:</b>	Mittlerer Zeitwert der Ladung 6,88 €/Fz-Std für Lkw ≥ 12 t zGG
<b>Bezugsgröße:</b>	Netzbestandteile, die im Planfall gegenüber dem Bezugsfall eine geänderte Streckenbelastung aufweisen (Wirkungsstrecken)
<b>B. Bewertungsvorschrift</b>	
$NTZ = \sum_s \Delta TZ_s \times zwg \times bf \times (-1)$ <p>mit</p> <p>s                    Index der betrachteten Strecke</p> <p><math>\Delta TZ</math>            Transportzeitdifferenz (Planfall – Bezugsfall) des Güterverkehrs mit Lkw ≥ 12t zGG in Tsd. Fz-Std/Jahr</p> <p>zwg                Mittlerer Zeitwert der Ladung 6,88 €/Fz-Std für Lkw ≥ 12 t zGG</p> <p>bf                 Beladungsfaktor für Lkw, Wert von 0,7</p>	
<b>C. Datenbedarf und Erläuterungen zur Anwendung der Bewertungsvorschrift</b>	
<p>In die Berechnungsvorschrift gehen sämtliche Strecken mit Belastungsänderungen des Güterverkehrs mit Lkw ≥ 12t zGG zwischen Bezugs- und Planfall ein. Je Strecke müssen für die Lkw-Fahrten ≥ 12t zGG die Transportzeitunterschiede vorliegen.</p>	

#### IV Bewertungsvorschriften für die Nutzenkomponente „Veränderung der Verkehrssicherheit (NS)“ nach BVWP 2030

<b>Nutzenkomponente: Veränderung der Verkehrssicherheit (NS)</b>	
<b>A. Dimension/Bewertungsfaktoren/Bezugsgrößen</b>	
<b>Dimension:</b>	T€/Jahr
<b>Bewertungsfaktoren:</b>	Streckentypabhängige Wertansätze gemäß Abbildung 6 und 7
<b>Bezugsgröße:</b>	Netzbestandteile, die im Planfall gegenüber dem Bezugsfall eine geänderte Streckenbelastung aufweisen (Wirkungsstrecken)
<b>B. Bewertungsvorschrift</b>	
$NS = \sum_s (un_{\text{Straße},s,\text{BST},1} \times FL_{s,1} - un_{\text{Straße},s,\text{BST},0} \times FL_{s,0}) \times 10^{-3} \times (-1)$	
mit	
s	Index der betrachteten Strecke <sup>31</sup>
$un_{\text{Straße}}$	spezifische Unfallkostenrate in €/Tsd. Fz-km gemäß Abbildung 6 und 7
BST	BVWP-Streckentyp
1	Index Planfall
FL	Fahrleistung in Tsd. Fz-km/Jahr
0	Index Bezugsfall
<b>C. Datenbedarf und Erläuterungen zur Anwendung der Bewertungsvorschrift</b>	
Für die Berechnung dieser Nutzenkomponente sind folgende Modellwerte für Bezugs- und Planfall nötig:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• BVWP-Streckentyp der zu betrachtenden Strecken</li> <li>• Fahrleistungen der zu betrachtenden Strecken</li> </ul>	
Sofern durch die zu bewertenden Projekte auch Veränderungen von Überlastungssituationen und staubedingten Wartezeiten an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen zu erwarten sind, werden die Teilelemente dieser Knotenpunkte in einem Knotenmodell zu Strecken aufgelöst und im Rahmen dieser Nutzenkomponente berücksichtigt.	

<sup>31</sup> Sofern durch die zu bewertenden Projekte auch Veränderungen von Überlastungssituationen und staubedingten Wartezeiten an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen zu erwarten sind, werden die Teilelemente dieser Knotenpunkte in einem Knotenmodell zu Strecken aufgelöst und im Rahmen dieser Nutzenkomponente berücksichtigt.

## V Berechnungsvorschrift für den Mittelungspegel LDEN nach der EU-Umgebungslärmrichtlinie [132] und dem Pegelminderungsfaktor nach der 16. BimSchV

$$L_{\text{DEN}_s} = 10 \times \log \frac{1}{24} \left( 12 \times 10^{\frac{L_{\text{Day}}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{\text{Evening}+5}}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{\text{Night}+10}}{10}} \right)$$

mit

$L_{\text{DEN}}$  Mittelungspegel Day-Evening-Night

$s$  Index der betrachteten Strecke

$$L_{\text{Day},s} = 10 \times \lg [\text{DTV}_W \times (1 + 0,082 \times \text{SV}_W) \times 0,0639]$$

$$L_{\text{Evening},s} = 10 \times \lg [\text{DTV}_W \times (1 + 0,082 \times \text{SV}_W) \times 0,0420]$$

$$L_{\text{Night},s} = 10 \times \lg [\text{DTV}_W \times (1 + 0,082 \times \text{SV}_W) \times 0,0082]$$

$\text{DTV}_W$  durchschnittlicher täglicher Verkehr werktags in Fz/24Std

$\text{SV}_W$  Lkw-Anteil der Verkehrsbelastung ( $\text{DTV}_W$ ) der Strecke  $s$  in %, Güterverkehrsbelastung am Gesamttagungsverkehr in Prozent

Ein Jahr ist das für die Lärmemission ausschlaggebende und ein hinsichtlich der Witterungsbedingungen durchschnittliches Jahr. Der einfallende Schall wird berücksichtigt, was bedeutet, dass der von der Fassade von Wohngebäuden reflektierte Schall unberücksichtigt bleibt (i.d.R. bedeutet dies im Fall einer Messung eine Korrektur um 3 dB). Die Funktion zur Pegeländerung durch unterschiedliche Abstände ist in Bild 113 dargestellt.

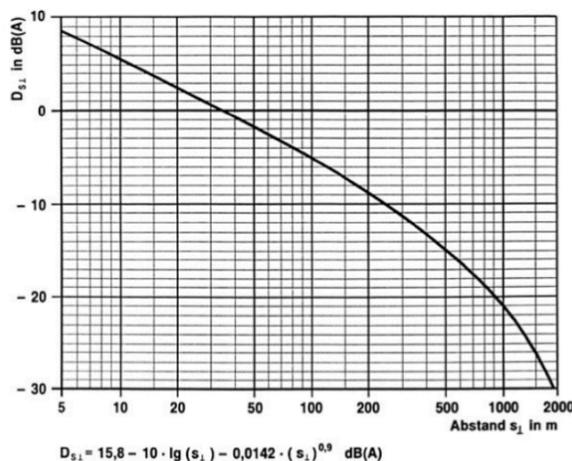


Bild 113: Pegeländerung  $D_{s,l}$  in dB(A) durch unterschiedliche Abstände  $s_l$  zwischen dem Emissionsort (0,5 m über der Mitte des betrachteten Fahrstreifens) und dem maßgebenden Immissionsort [123]

## VI Bewertungsvorschriften für die Nutzenkomponente „Veränderung der Geräuschbelastung außerorts (NG<sub>ao</sub>)“ des Verkehrsträgers Straße

<b>Nutzenkomponente: Veränderung der Geräuschbelastung außerorts (NG<sub>ao</sub>)</b>	
<b>A. Dimension/Bewertungsfaktoren/Bezugsgrößen</b>	
<b>Dimension:</b>	T€/Jahr
<b>Bewertungsfaktoren:</b>	Annuitäten der spezifischen Investitionskosten für den Bau von Lärmschutzwänden gemäß Tabelle 5
<b>Bezugsgröße:</b>	Netzbestandteile, die im Planfall gegenüber dem Bezugsfall eine geänderte Verkehrsbelastung aufweisen (Wirkungsstrecken)
<b>B. Bewertungsvorschrift</b>	
$NG_{ao} = \left[ \left( \sum_s kw_{pd,1} \times L_{s,1} \right) - \left( \sum_s kw_{pd,0} \times L_{s,0} \right) \right] \times 10^{-3} \times (-1)$	
mit	
s	Index der betrachteten Strecke
kw <sub>pd</sub>	nach der Größe der Pegeldifferenz pd zum Zielpegel von 55 dB(A) im Abstand von 100 m vom Trassenrand differenzierter Wertansatz für die Veränderung der Geräuschbelastungen außerorts in T€/km und Jahr gemäß Tabelle 5
1	Index Planfall
L <sub>s</sub>	Länge der betrachteten Strecke in km
0	Index Bezugsfall
pd = Li <sub>eq(s)</sub> - L <sub>Z</sub>	
mit	
pd	Pegeldifferenz in dB (A)
Li <sub>eq(s)</sub>	Lärmexposition an der Strecke s in 100 m Abstand vom Trassenrand in dB(A)
L <sub>Z</sub>	Zielpegel = 55 dB(A)
Li <sub>eq(s)</sub> = 37,3 + 10 × lg(q <sub>s</sub> × (1 + 0,082 × SV <sub>s</sub> )) - 9,61	
mit	
q <sub>s</sub>	stündliche Verkehrsbelastung der Strecke s in Fz/h
SV <sub>s</sub>	Lkw-Anteil der Verkehrsbelastung der Strecke s in %, d.h. GV/DTV <sub>w</sub> × 100 (Güterverkehrsbelastung am Gesamttagesverkehr in Prozent)
<b>C. Datenbedarf und Erläuterungen zur Anwendung der Bewertungsvorschrift</b>	
Für die Berechnung der Nutzenkomponente NG <sub>ao</sub> werden aus dem Bezugs- sowie dem Planfall die stündlichen Verkehrsbelastungen, die Lkw-Anteile und die Streckenlängen benötigt.	

## VII Bewertungsvorschriften für die Nutzenkomponente „Veränderung der Abgasbelastung (NA)“ nach BVWP 2030

<b>Nutzenkomponente: Veränderung der Abgasbelastungen (NA)</b>	
<b>A. Dimension/Wertansätze/Bezugsgrößen</b>	
<b>Dimension:</b>	T€/Jahr
<b>Bewertungsfaktoren:</b>	Wertansätze für Schadstoffemissionen gemäß Tabelle 18 und verbrauchsabhängige Abgasemissionskosten von Pkw mit Elektroantrieb gemäß Tabelle 14 in Cent/kWh Verbrauchsabhängige Emissionsfaktoren gemäß [212] <sup>32</sup> Fahrleistungsabhängiger Energieverbrauch von Pkw mit Elektroantrieb: 0,21 kWh/Fz-km
<b>Bezugsgröße:</b>	Netzbestandteile, die im Planfall gegenüber dem Bezugsfall eine geänderte Verkehrsbelastung aufweisen (Wirkungsstrecken)
<b>B. Bewertungsvorschrift</b>	
$NA = \sum NAn(sf)$ <p><b>NA1 (NO<sub>x</sub>)/NA2 (CO)/NA4 (HC)/NA5 (PM)</b></p> $NAn(sf) = ((\Delta EM_{FG(Vb),sf} \times akt_{FG(Vb),sf}) \times 10^{-3} + \Delta FL_{PE} \times evl_{PE} \times akv_{PE,sf} \times 10^{-2} + \Delta WT_{FG} \times akz_{FG,sf}) \times (-1)$ <p>mit</p> <p>n Index für die schadstoffspezifischen Nutzenkomponenten, wobei n=1 für NO<sub>x</sub>-, n=2 für CO-, n=4 für HC- und n=5 für PM-Emissionen verwendet wird</p> <p>sf Index des betrachteten Schadstoffs (hier NO<sub>x</sub>, CO, HC, PM)</p> <p>FG(Vb) Index der betrachteten Fahrzeuggruppe (hier alle außer PE)</p> <p><math>\Delta EM_{FG(Vb),sf}</math> Differenz der jährlichen Emissionen (Planfall – Bezugsfall) durch Ausstoß des Schadstoffes sf der Antriebsarten Diesel, Otto und Gas in t/Jahr</p> <p><math>akt_{FG(Vb),sf}</math> Wertansatz für Emissionen des Schadstoffes sf in €/t gemäß Tabelle 18 (Spalte „Betrieb von Verbrennungsmotoren“)</p> <p><math>\Delta FL</math> Fahrleistungsdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-km</p> <p>PE Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Elektroantrieb</p> <p><math>evl_{PE}</math> durchschnittlicher Energieverbrauch von Pkw mit Elektroantrieb in Höhe von 0,21 kWh/Fz-km</p> <p><math>akv_{PE,sf}</math> Wertansatz für verbrauchsabhängige Abgasemissionskosten von Pkw mit Elektroantrieb gemäß Tabelle 14 in Cent/kWh</p> <p><math>\Delta WT</math> Differenz der staubedingten Wartezeiten an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std/Jahr<sup>33</sup></p> <p>FG Index der betrachteten Fahrzeuggruppe</p> <p>akz spezifische wartezeitabhängige Abgasemissionskosten in €/Fz-Std gemäß Tabelle 16</p>	

<sup>32</sup> In [212] sind Emissionsfaktoren hinterlegt, die hinsichtlich der Fahrzeuggruppe LS eine stärkere Differenzierung aufweisen. Sofern das Verkehrsmengengerüst eine entsprechende Struktur aufweist, kann damit eine differenzierte Bewertung erfolgen. Alternativ können die Faktoren nach HBEFA [211] zur Anwendung kommen.

<sup>33</sup> Diese Wartezeitdifferenzen treten nur dann auf, wenn durch die zu bewertenden Projekte auch Veränderungen von Überlastungssituationen an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen zu erwarten sind.

Im Folgenden wird die Ermittlung von  $\Delta EM_{FG(Vb),sf}$  dargestellt.

$$\Delta EM_{FG(Vb),sf} = \sum_{FG} \sum_h \sum_s (\Delta FL_{FG(Vb),h,s} \times efl_{FG(Vb),HST,Z,v_{max},sf}) \times 10^{-3}$$

mit

$\Delta EM_{FG(Vb),sf}$	Differenz der jährlichen Emissionen (Planfall – Bezugsfall) durch Ausstoß des Schadstoffes sf der Antriebsarten Diesel, Otto und Gas in t/Jahr
sf	Index des betrachteten Schadstoffs (hier NOx, CO, HC, PM)
FG(Vb)	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe (hier alle außer PE)
h	Index der betrachteten Stunde bzw. Stundengruppe des Jahres
s	Index der betrachteten Strecke
$\Delta FT$	Fahrleistungsdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-km
efl	fahrleistungsabhängiger Emissionsfaktor gemäß [212] <sup>34</sup> in g/Fz-km
HST	Index für den HBEFA-Straßentyp – Zuordnung zu BVWP-Streckentypen <sup>35</sup>
Z	Index Verkehrszustand (flüssig, dicht, gesättigt, stop and go), Definition über Auslastung ag
$v_{max}$	zulässige Höchstgeschwindigkeit der betrachteten Strecke in km/h

Für den Schadstoff PM wird zusätzlich zwischen Strecken im Außerorts- und Innerortsbereich unterschieden.

### NA3 (CO<sub>2</sub>)

$$NA3 = \left( (\Delta EM_{FG(kon), CO_2} \times akt_{CO_2} + \Delta EM_{PG, CO_2} \times akt_{CO_2}) \times 10^{-3} + \Delta FL_{PE} \times evl_{PE} \times akv_{PE, CO_2} \times 10^{-2} + \Delta WT_{FG} \times akz_{FG, CO_2} \right) \times (-1)$$

mit

$\Delta EM_{CO_2}$	Differenz der jährlichen Emissionen (Planfall – Bezugsfall) durch CO <sub>2</sub> -Ausstoß der jeweiligen Fahrzeuggruppen in t/Jahr
FG(kon)	Index der betrachteten Fahrzeuggruppen (hier alle außer PG und PE)
$akt_{CO_2}$	Wertansatz für CO <sub>2</sub> -Emissionen in €/t gemäß Tabelle 18
PG	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Gasantrieb
$\Delta FL$	Fahrleistungsdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-km
PE	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Elektroantrieb
$evl_{PE}$	durchschnittlicher Energieverbrauch von Pkw mit Elektroantrieb in Höhe von 0,21 kWh/Fz-km
$akv_{PE,sf}$	Wertansatz für verbrauchsabhängige CO <sub>2</sub> -Emissionskosten von Pkw mit Elektroantrieb gemäß Tabelle 14 in Cent/kWh
$\Delta$	Differenz der staubedingten Wartezeiten an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std/Jahr <sup>36</sup>
FG	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe
$akz_{CO_2}$	spezifische wartezeitabhängige Abgasemissionskosten für CO <sub>2</sub> in €/Fz-Std gemäß Tabelle 16

<sup>34</sup> In [212]: sind Emissionsfaktoren hinterlegt, die hinsichtlich der Fahrzeuggruppe LS eine stärkere Differenzierung aufweisen. Sofern das Verkehrsmengengerüst eine entsprechende Struktur aufweist, kann damit eine differenzierte Bewertung erfolgen. Alternativ können die Faktoren nach HBEFA [211] zur Anwendung kommen.

<sup>35</sup> Mittels Tabellen in Anhang A [126].

<sup>36</sup> Diese Wartezeitdifferenzen treten nur dann auf, wenn durch die zu bewertenden Projekte auch Veränderungen von Überlastungssituationen an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen zu erwarten sind.

Im Folgenden wird die Ermittlung von  $\Delta EM_{FG(kon),sf}$  dargestellt. Die Berechnungsvorschrift ist für die Ermittlung  $\Delta EM_{FG(kon),CO_2}$  und  $\Delta EM_{FG(kon),SO_2}$  (siehe NA6) anzuwenden.

$$\Delta EM_{FG(kon),sf} = (\Delta EV_{PO} \times efv_{Otto,sf} + \Delta EV_{PD+FG(GV)} \times efv_{Diesel,sf}) \times 10^{-6}$$

mit

$\Delta EM_{FG(kon),sf}$	Differenz der jährlichen Emissionen (Planfall – Bezugsfall) durch Ausstoß des Schadstoffes sf der konventionellen Antriebsarten (Diesel und Otto) in t/Jahr
FG(kon)	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe (hier Fahrzeuggruppen mit konventionellen Antrieben: PO, PD, LN, LS, ZL und ZS)
sf	Indes des betrachteten Schadstoffes (hier CO <sub>2</sub> und SO <sub>2</sub> )
$\Delta EF$	Differenz des Kraftstoffverbrauchs (Planfall – Bezugsfall) in l/Jahr
PO	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Ottoantrieb
$efv_{sf}$	verbrauchsabhängige Emissionsfaktoren 2030 für Otto und Diesel und die Schadstoffart sf in g/l Otto: CO <sub>2</sub> : 2.625 g/l, SO <sub>2</sub> : 0,012 g/l Diesel: CO <sub>2</sub> : 2.775 g/l, SO <sub>2</sub> : 0,013 g/l
PD	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Dieselantrieb
FG(GV)	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe (hier nur LN, LS, ZL, ZS)

$$\Delta EV_{PO} = \sum_s \sum_h \Delta FL_{PO,s,h} \times 10^{-2} \times evl_{PO,HST,Z,v_{max}}$$

$$\Delta EV_{PD} = \sum_s \sum_h \Delta FL_{PD,s,h} \times 10^{-2} \times evl_{PD,HST,Z,v_{max}}$$

$$\Delta EV_{FG(GV)} = \sum_s \sum_{FG} \sum_h \Delta FL_{FG(GV),s,h} \times 10^{-2} \times evl_{FG(GV),HST,Z,v_{max}}$$

mit

$\Delta EV$	Differenz des Energieverbrauchs (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. l/Jahr
PO	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Ottoantrieb
s	Index der betrachteten Strecke
h	Index der betrachteten Stunde bzw. Stundengruppe des Jahres
$\Delta FL$	Fahrleistungsdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-km/Jahr
evl	spezifischer Kraftstoffverbrauch in l/100 Fz-km gemäß Tabelle 17 und [212] <sup>37 38</sup>
HST	HBEFA-Straßentyp – Zuordnung zu BVWP-Streckentypen <sup>39</sup>
Z	Index Verkehrszustand (flüssig, dicht, gesättigt, stop and go), Definition über Auslastung ag
$v_{max}$	zulässige Höchstgeschwindigkeit der betrachteten Strecke in km/h
PD	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Dieselantrieb

<sup>37</sup> vgl. [212]

<sup>38</sup> In [212]: sind Energieverbrauchsfaktoren hinterlegt, die hinsichtlich der Fahrzeuggruppe LS eine stärkere Differenzierung aufweisen. Sofern das Verkehrsmengengerüst eine entsprechende Struktur aufweist, kann damit eine differenzierte Bewertung erfolgen. Alternativ können die Faktoren nach HBEFA [211] zur Anwendung kommen.

<sup>39</sup> mittels Tabelle Anhang A in [126].

FG(GV)	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe (hier nur LN, LS, ZL, ZS)	
Im Folgenden wird die Ermittlung von $\Delta EM_{PG,CO_2}$ dargestellt.		
$\Delta EM_{PG,CO_2} = \sum_s \sum_h (\Delta FL_{PG,s,h} \times efl_{PG,HST,Z,v_{max},CO_2}) \times 10^{-3}$		
mit		
$\Delta EM_{PG,CO_2}$	Differenz der jährlichen Emissionen durch Ausstoß des Schadstoffes CO <sub>2</sub> der Gas (Planfall – Bezugsfall) in t/Jahr	Antriebsarten
PG	Index der Fahrzeuggruppe Pkw mit Gasantrieb	
s	Index der betrachteten Strecke	
h	Index der betrachteten Stunde bzw. Stundengruppe des Jahres	
$\Delta FL$	Fahrleistungsdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-km	
efl	fahrleistungsabhängiger Emissionsfaktor gemäß [212] <sup>40 41</sup> in g/Fz-km	
HST	HBEFA-Straßentyp – Zuordnung zu BVWP-Streckentypen <sup>42</sup>	
Z	Index Verkehrszustand (flüssig, dicht, gesättigt, stop and go), Definition über Auslastung	ag
$v_{max}$	zulässige Höchstgeschwindigkeit der betrachteten Strecke in km/h	
<b>C. Datenbedarf und Erläuterungen zur Anwendung der Bewertungsvorschrift</b>		
Für die Berechnungen sind folgende Werte pro Strecke und Stunde bzw. Stundengruppe für den Bezugsfall und den Planfall aus dem Modell zu ziehen:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrleistungen je <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Fahrzeuggruppe</li> <li>○ Verkehrszustand</li> <li>○ zulässige Höchstgeschwindigkeit</li> <li>○ BVWP- bzw. HBEFA-Streckentyp</li> </ul> </li> </ul>		
Sofern durch die zu bewertenden Projekte auch Veränderungen von Überlastungssituationen und staubedingten Wartezeiten an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen zu erwarten sind, werden zusätzlich die mittels Rückstaumodell ermittelten staubedingten Wartezeiten als Eingangsdaten erforderlich.		

<sup>40</sup> vgl. [212]

<sup>41</sup> In [212]: sind Energieverbrauchsfaktoren hinterlegt, die hinsichtlich der Fahrzeuggruppe LS eine stärkere Differenzierung aufweisen. Sofern das Verkehrsmengengerüst eine entsprechende Struktur aufweist, kann damit eine differenzierte Bewertung erfolgen. Alternativ können die Faktoren nach HBEFA [211] zur Anwendung kommen.

<sup>42</sup> Mittels Tabellen in Anhang A in [126].

## Anhang 2 – Kostensätze nach BVWP 2030

### Tabellen und Abbildungen

Entfernung [km]	Zeitwert [€/P-Std]						
5	4,27	65	9,18	162,5	11,82	425	14,07
15	4,81	75	9,56	187,5	12,24	475	14,42
25	6,41	85	9,94	212,5	12,53	600	14,77
35	7,35	95	10,20	275	12,79	> 600	15,54
45	8,17	112,5	10,66	325	13,17		
55	8,70	137,5	11,18	375	13,71		

Tab. 41: Distanzabhängige Zeitwerte für die nicht geschäftlichen Fahrtzwecke nach Entfernungstufe [126]

Lärmexposition [dB(A)]	Wertansatz [€/exponierter Person und Jahr]	Lärmexposition [dB(A)]	Wertansatz [€/exponierter Person und Jahr]	Lärmexposition [dB(A)]	Wertansatz [€/exponierter Person und Jahr]
45	0	57	74	69	202
46	2	58	85	70	213
47	4	59	95	71	241
48	6	60	106	72	269
49	8	61	117	73	297
50	10	62	127	74	325
51	19	63	138	75	353
52	27	64	148	76	371
53	36	65	159	77	389
54	44	66	170	78	406
55	53	67	181	79	424
56	64	68	191	80	442

Tab. 42: Wertansätze je exponierter Person in Abhängigkeit von der Lärmexposition [126]

Pegeldifferenz [dB(A)]	Höhe der Lärmschutzwände [m]	Spezifische Investitionskosten [€/m]		Spezifischer Kapitaldienst [T€/km und Jahr]	
		Straße	Schiene	Straße	Schiene
2,0	1,5	595	1.259	17,8	62,2
2,7	2,0	790	1.350	23,6	66,7
6,9	3,0	1.190	1.650	35,5	81,6
8,8	4,0	1.590	1.975	47,5	97,6
10,7	5,0	1.980	2.600	59,1	128,5
12,2	6,0	2.370	2.900	70,7	143,3
13,3	7,0	2.780	3.447	83,0	170,4
14,1	8,0	3.160	4.140	94,3	204,6
14,7	9,0	3.570	4.972	106,6	245,8
15,2	10,0	3.970	5.971	118,5	295,1
15,6	11,0	4.350	7.171	129,8	354,5
15,9	12,0	4.750	8.612	141,8	425,7

Tab. 43: Wertansätze für spezifische Vermeidungskosten bei Einsatz von Lärmschutzwänden in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz [126]

Fahrzeuggruppe	Jahresfahrleistung [Mio. Fz-km]	Betriebskosten- grundwert [€/100 Fz-km]	Spezifische Vorhaltungskosten [€/Fz-Std]
Pkw mit Ottomotor (PO)			
≤ 1.399 cm <sup>3</sup>	109,438	10,89	0,53
1.400 - 1.999 cm <sup>3</sup>	192,898	14,29	0,65
≤ 2.000	46,965	24,91	1,40
Summe/gewichtetes Mittel (Ottomotor)	349,301	<b>14,65</b>	<b>0,71</b>
Pkw mit Dieselmotor (PD)			
≤ 1.999 cm <sup>3</sup>	166,066	12,11	0,81
≥ 2.00 cm <sup>3</sup>	80,514	19,74	1,37
Summe/gewichtetes Mittel (Dieselmotor)	246,580	<b>14,60</b>	<b>0,99</b>
Pkw mit sonstige Motoren (PE und PG)			
alle	12,888	15,11	0,89
Summe/gewichtetes Mittel (sonst. Motoren)	12,888	<b>15,11</b>	<b>0,89</b>

Tab. 44: Fahrleistungsgewichtete Betriebskostengrundwerte und spezifische Vorhaltungskosten der Personenkraftwagen [126]



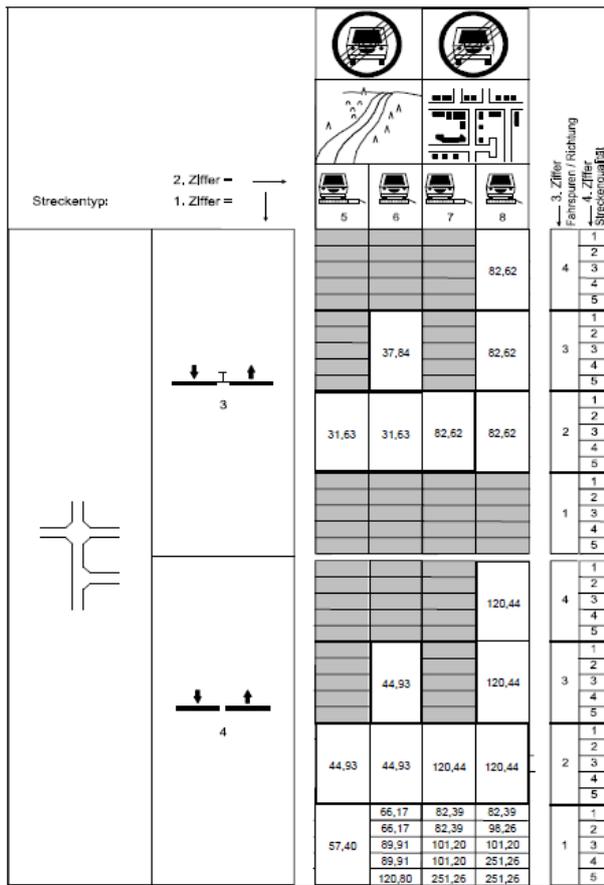


Bild 115: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values differenziert nach der vierten Kennziffer (Qualität) [€/Tsd. Fz-km] [126]

Fahrzeuggruppe	Jahresfahrleistung [Mio. Fz-km]	Betriebskostengrundwert [€/100 Fz-km]	Spezifische Vorhaltungskosten [€/Fz-Std]
<b>Leichte Nutzfahrzeuge (LN)</b>			
≤ 2.800 kg	26.536	11,76	3,42
2.801 - 3.500 kg	9.338	13,52	3,73
Summe/gewichtetes Mittel (LN)	35.873	<b>12,21</b>	<b>3,50</b>
<b>Lastkraftwagen ohne Anhänger (LS)</b>			
3.501 – 12.000 kg	13.093	23,27	5,20
12.001 - 22.000 kg	6.008	24,55	5,58
≥ 22.001 kg	7.563	26,12	5,81
Summe/gewichtetes Mittel (LS)	26.664	<b>24,37</b>	<b>5,46</b>

Tab. 45: Fahrleistungsgewichtete Betriebskostengrundwerte und spezifische Vorhaltungskosten der leichten Nutzfahrzeuge (LN) und Lastkraftwagen ohne Anhänger (LS) [126]

Fahrzeuggruppe	Jahresfahrleistung [Mio. Fz-km]	Betriebskostengrundwert [€/100 Fz-km]	Spezifische Vorhaltungskosten [€/Fz-Std]
Lastkraftwagen mit Anhänger (ZL)			
< 28.000 kg	2.061	23,26	7,59
≥ 28.000 kg	3.064	22,92	8,17
Summe/gewichtetes Mittel (ZL)	5.125	<b>23,06</b>	<b>7,94</b>
Sattelzug mit Auflieger (ZS)			
< 33.000 kg	1.371	24,26	9,88
≥ 33.000 kg	16.101	25,72	9,34
Summe/gewichtetes Mittel (ZS)	17.472	<b>25,61</b>	<b>9,38</b>

Tab. 46: Fahrleistungsgewichtete Betriebskostengrundwerte und spezifische Vorhaltungskosten der Lastkraftwagen mit Anhänger (ZL) und Sattelzüge mit Auflieger (ZS) [126]

Energieträger	Einsatzbereich	Spezifische Energiekosten	Dimension
Ottokraftstoff	MIV	0,76	€/l
Dieselkraftstoff	MIV	0,76	€/l
	Straßengüterverkehr/ Binnenschifffahrt/ Fernlinienbusse	0,75	€/l
	Schienenverkehr	0,74	€/l
Kerosin	Luftverkehr	0,73	€/l
Gas	MIV	0,61	€/l
Elektrischer Strom	MIV	0,19	€/kWh
	SPFV/SGV	0,156	€/kWh
	SPNV	0,152	€/kWh

Tab. 47: Spezifische Energiekosten [126]

Fahrtzweck	Pkw-Besetzungsgrad [Anzahl Personen/Pkw]	
	Fahrtweite < 50 km	Fahrtweite ≥ 50 km
Arbeit	1,1	1,1
Ausbildung	1,7	1,3
Geschäft	1,0	1,1
Einkauf	1,3	1,8
Privat	1,6	2,0
Urlaub	2,3	2,3

Tab. 48: Durchschnittliche Pkw-Besetzungsgrade in Anzahl Personen/Pkw gemäß VP 2030 [126]

Fahrzeuggruppe	Wertansatz [€/Fz-Std]
Pkw	2,97
LN, LS, ZL, ZS	16,08

Tab. 49: Wartezeitbezogene Wertansätze zur Bewertung von Energiekosten überlastungsbedingter Stausituationen an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen [126]

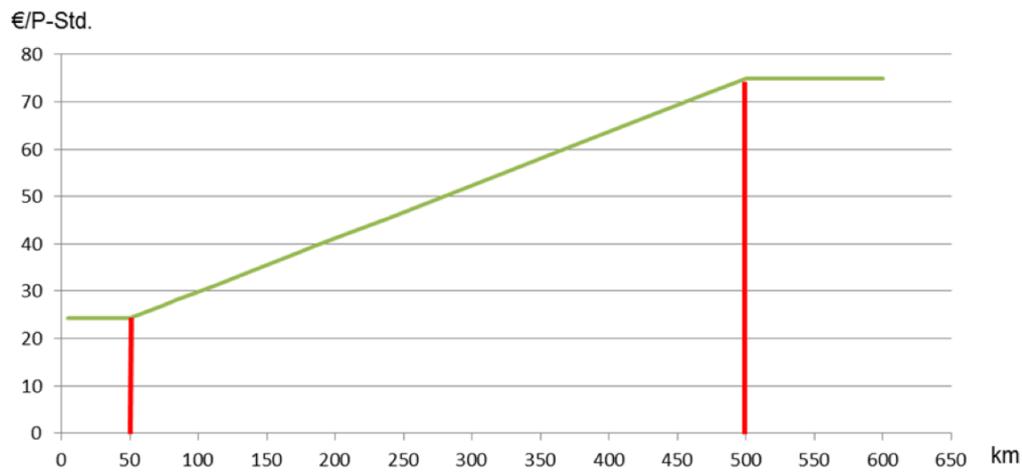


Bild 116: Zeitwertfunktion für den Fahrtzweck Geschäft [126]

Fahrtzweck	Pkw-Besetzungsgrad [Anzahl Personen/Pkw]	
	Fahrtweite < 50 km	Fahrtweite ≥ 50 km
Arbeit	1,1	1,1
Ausbildung	1,7	1,3
Geschäft	1,0	1,1
Einkauf	1,3	1,8
Privat	1,6	2,0
Urlaub	2,3	2,3

Tab. 50: Durchschnittliche Pkw-Besetzungsgrade in Anzahl Personen/Pkw gemäß VP 2030 [126]

Transportsegment	Zeitwerte der Ladung in €/Std und t
Maritimer KV	0,305
Kontinentaler KV	1,180
Nahrungsmittel	1,011
Steine, Erden	0,374
Mineralölerzeugnisse	0,746
Chemieerzeugnisse, Düngemittel	0,727
Metalle	0,827
Fahrzeuge, Maschinen	1,506
Sonstige Produkte	0,201

Tab. 51: Mittlere Zeitwerte der Ladung nach Transportsegmenten [126]

Schadstoffart	Emissionsfaktor <sup>1)</sup> [g/kWh]	Wertansatz [€/t Schadstoff]	Emissionskostensatz [Cent/kWh]
	(1)	(2)	(3) = (1) x (2) x 10 <sup>-4</sup>
NO <sub>x</sub>	0,30	15.400	0,46
CO	0,18	46	u. R. <sup>43</sup>
CO <sub>2</sub>	414	145	6,00
HC	0,76	1.600	0,12
PM	0,02	55.400	0,12
SO <sub>2</sub>	0,17	13.200	0,23
<b>Summe</b>			<b>6,93</b>

<sup>1)</sup> inkl. 7% Aufschlag für Wirkungsgradverluste zwischen Kraftwerk und Stromabnehmer bzw. Ladestation für Elektro-Pkw.

Tab. 52: Ermittlung des Emissionskostensatzes bei der Erzeugung von elektrischem Strom [126]

Primärenergieträger	Anteil an der Bruttostromerzeugung in Deutschland [%]	
	2012 <sup>1</sup>	2030 <sup>2</sup>
Braunkohle, konventionell	25,7	11,3
Braunkohle, CCS	0,0	2,0
Steinkohle, konventionell	18,5	12,9
Steinkohle, CCS	0,0	2,0
Erdgas	12,0	19,6
Mineralölprodukte	1,3	0,0
Kernenergie	15,8	0,0
Erneuerbare Energien	22,6	47,1
Übrige Energieträger	4,1	5,1
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

<sup>1</sup> Quelle: AG Energiebilanzen, Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2012, Berlin/Köln 2013 (vorläufige Werte Stand Jahresmitte 2013)

<sup>2</sup> Quelle: BVU, ifo Institut (2012): Gemeinsame Stellungnahme zu den Annahmen des BMWi-Berichtes „Energieszenarien 2011“ Projekt-Nr. 12/10

Tab. 53: Gegenüberstellung des Primärenergieträgermix im Prognosejahr 2030 mit den Vergleichswerten im Basisjahr 2012 [126]

Fahrzeuggruppe	Wertansatz [€/Fz-Std]					
	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	PM	SO <sub>2</sub>
Pkw	0,114	0,001	1,609	0,001	0,02	0,001
LN, LS, ZL, ZS	1,608	0,000	9,107	0,007	0,115	0,005

Tab. 54: Wartezeitbezogene Wertansätze zur Bewertung von Abgasbelastungen überlastungsbedingter Stausituationen an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen [126]

Straßentyp A1	zul. [km/h]	H.-Geschw.	Verkehrszustand			
			flüssig	dicht	gesättigt	stop and go
	80		3,997	3,837	4,468	7,472
	100		4,046	4,025	4,180	7,472
	120		4,742	4,508	4,180	7,472
	130		5,066	4,801	4,180	7,472
	> 130		5,650	5,151	4,180	7,472

Tab. 55: Kraftstoffverbrauch Pkw-Diesel (in l/100 Fz-km) bei Straßentyp A1 [126]

Schadstoffart	bei der Stromerzeugung	Spezifische Schadenskosten [€/t]	
		innerorts	außerorts
NO <sub>x</sub>	15.400	15.400	15.400
CO	46	62	62
CO <sub>2</sub>	145	145	145
HC	1.600	1.700	1.700
Partikel (PM)	55.400	364.100	122.800
SO <sub>2</sub>	13.200	13.200	13.200

Tab. 56: Spezifische Schadenskosten für Abgasemissionen bei der Stromerzeugung und beim Betrieb von Verbrennungsmotoren [126]

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 2015

**B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken**

Kuhlmann, Maier, Ummerhofer, Zinke,  
Fischer, Schneider € 14,00

**B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen**

Placzek, Pohl  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 114: Intelligente Bauwerke – Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsform**

Sawo, Klumpp, Beutler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln**

Mayer, Brenninger, Großmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton**

Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells**

Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit**

Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln**

Schmidt, Simon, Guder, Juknat,  
Hegemann, Dehn € 16,00

**B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger**

Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 121: Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse**

Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski, Staack  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2016

**B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung**

Geißler, Krohn € 15,50

**B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**

Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**

Mielecke, Graubner, Roth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden**

Kuhlmann, Hubmann € 21,50

**B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden**

Ungermann, Brune, Giese € 21,00

**B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen**

Schmellekamp  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags**

Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 131: Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus**

Schmidt-Thrö, Mielecke, Jungwirth, Graubner, Fischer, Kuhlmann, Hauf  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke**

Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erüchtigungskonzepte von Straßenbrücken**

Gehrlein, Lingemann, Jungwirth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2017

### B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

### B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

Mayer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

### B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

Moormann, Buhmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

### B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

### B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Neumann, Brauer € 16,50

### B 145: 8. BASt-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2019

### B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2020

### B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Paschen, Dürrer, Gronau, Rentmeister  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Maurer, Bettin  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Keßler, Gehlen € 16,00

### B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorvagner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens

Kuhlmann, Stempniewski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

### B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

### B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

Wirker, Donner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka  
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](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.