

# Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 192

**bast**

# Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur

von

Franziska Lindström (geb. Roth)  
Christoph Zulauf  
Marco Rothenfluh  
Frank Bruns  
Rafael Brunner  
Sandra Roth  
Rafael Caminada  
Alex Graf

EBP Schweiz AG  
Zürich

Alexander Dahl

PTV Planung Transport Verkehr GmbH  
Karlsruhe

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 192**

**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

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

**Bericht zum Forschungsprojekt 69.0005**  
Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur

### Fachbetreuung

Kalliopi Anastasiadou

### Referat

Tunnel- und Grundbau, Tunnelbetrieb,  
Zivile Sicherheit

### 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 978-3-95606-740-2

Bergisch Gladbach, Juni 2023

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

## Kurzfassung – Abstract

### **Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur**

Ausfälle der Verkehrsinfrastruktur bedingt z. B. durch Naturereignisse, menschliche Einwirkungen oder technisches Versagen können zu hohen volkswirtschaftlichen Kosten führen, wenn sie zu längeren Unterbrechungen von kritischen Streckenelementen führen. Ein wachsendes Mobilitätsbedürfnis, alternde Infrastrukturen sowie die Zunahme von externen Stressfaktoren wie beispielsweise dem Klimawandel stellen zusätzliche Herausforderungen für die Betreiber von Verkehrsinfrastrukturen dar. Ein umfassendes Infrastrukturmanagement ist deshalb für eine hohe Verfügbarkeit und eine Aufrechterhaltung der Funktionalität im Ereignisfall unabdingbar. Was heute mehrheitlich noch fehlt, ist ein ganzheitliches, systematisches Management, das die übergeordnete Systemresilienz beurteilt und die Beurteilung von Maßnahmen hinsichtlich ihres Beitrags zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur ermöglicht.

Dieses Forschungsprojekt knüpft an das Forschungsprojekt FE 89.0330/2017 Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen an, indem der bestehende Ansatz zur Bewertung der Resilienz von Straßeninfrastrukturen methodisch und inhaltlich optimiert und weiterentwickelt wird. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf dem Transfer in die Praxis. Dafür wird ein webbasiertes IT-Tool entwickelt, mit welchem die Resilienz der Straßeninfrastruktur sowie die Resilienzwirkung von Maßnahmen bewertet werden können. Um die Nutzung des IT-Tools zu erleichtern, wird ein Benutzerleitfaden erstellt. Ein Implementierungskonzept zeigt auf, wie Methodik und IT-Tool in der Praxis zur Anwendung kommen sollen.

So wird ein wichtiger Meilenstein für die Integration einer Resilienzbewertung als fester Bestandteil des Verkehrsinfrastrukturmanagements erreicht und der Grundstein für eine Überführung der theoretischen Konzepte aus der Forschung in die Praxis gelegt werden, sodass auch zukünftig Entscheidungen im Infrastrukturmanagement zur Aufrechterhaltung der Funktionalität der Straßen bes-

ser vorbereitet und Maßnahmen respektive Investitionen besser begründet werden können.

### **Optimization and further development of guidelines for the resilience assessment of transport infrastructure**

Failures of the transport infrastructure caused by natural events, human impact, or technical failure, for example, can lead to high economic costs if they result in prolonged interruptions of critical route elements. A growing need for mobility, aging infrastructures, and the increase in external stress factors such as climate change pose additional challenges for transport infrastructure operators. Comprehensive infrastructure management is therefore indispensable for high availability and maintenance of functionality in the event of an incident. What is still missing today is a holistic, systematic management that assesses the overall system resilience and enables the evaluation of measures with regard to their contribution to maintaining the functionality of the transport infrastructure.

This research project follows on from the research project FE 89.0330/2017 Response and recovery process for road infrastructure after disruptive events by optimizing and further developing the existing approach to assessing the resilience of road infrastructures in terms of methodology and content. Another focus is on the transfer into practice. For this purpose, a web-based IT tool is being developed that can be used to assess the resilience of road infrastructure and the resilience effect of measures. To facilitate the use of the IT tool, a user guide is developed. An implementation concept shows how the methodology and IT tool are to be applied in practice.

This way, an important milestone for the integration of resilience assessment as an integral part of transport infrastructure management will be reached and the basis for a transfer of theoretical concepts from research to practice, so that decisions in infrastructure management to maintain the functionality of roads can be better prepared and measures or investments better justified in the future.

## Summary

### Optimization and further development of guidelines for the resilience assessment of transport infrastructure

## 1 Introduction

A reliable transport infrastructure makes a significant contribution to social prosperity by ensuring security of supply and meeting the mobility needs of the population and the economy. Failures of the transport infrastructure caused, for example, by natural events, human intervention or technical failure can lead to high economic costs if they result in prolonged interruptions of critical route elements. A growing need for mobility, aging infrastructures, and the increase in external stress factors such as climate change pose additional challenges for transport infrastructure operators. At the same time, it is important to recognize the opportunities, risks, and challenges of digitization and to integrate them into infrastructure management. Comprehensive infrastructure management is therefore indispensable for high availability and maintaining functionality in the event of an incident. Today, infrastructure managers use a wide variety of management systems for this purpose, such as building management, maintenance management or incident management.

What is still lacking today is a holistic, systematic management system that assesses the overall system resilience and enables the evaluation of measures with regard to their contribution to maintaining the functionality of the transport infrastructure. In this way, existing approaches could be linked, which would facilitate the management of an increasing number of external stress factors and make it possible to keep the economic costs low.

## 2 Terms of reference and objectives

This research project builds on the methodological approach and considerations from FE 89.0330/2017 Response and recovery process for road

infrastructure after disruptive events<sup>1</sup> by addressing the identified need for research and further development. The overall objective of the project is to optimize and further develop the existing methodological approach for assessing the resilience of road infrastructures, both methodologically and in terms of content, as well as to take steps towards its implementation in practice. Specifically, the following overall objectives are pursued:

1. Optimization and further development of the methodology:  
The methodology developed in the research project FE 89.0330/2017 Response and recovery process for road infrastructure after disruptive events shall be validated and optimized. In parallel, the methodology is to be further developed in terms of content. This includes the extension to all phases of the resilience cycle as well as first considerations on how to transfer the methodology to rail and waterways.
2. Transfer from research to practice:  
In addition to the further development of the methodology, focus is put on its implementation. For this purpose, a web-based IT tool is being developed that can be used to assess the resilience of road infrastructure and the resilience effect of measures. To facilitate the use of the IT tool, a user guide will be developed. An implementation concept will show how the methodology and IT tool are to be applied in practice.

With this research, an important milestone for the integration of resilience assessment as a component of transport infrastructure management is to be achieved and the foundation laid for transferring theoretical concepts from research to practice, so that decisions in infrastructure management to maintain the functionality of roads can be better prepared and measures or investments better justified in the future.

## 3 Technical concept

A technical concept was developed in which the concrete, overriding requirements for the methodology, the web-based IT tool, and the aids to action (user guide, implementation concept) are

<sup>1</sup> DEUBLEIN, M., ROTH, F., BRUNS, F. & ZULAUF, C. (2020). Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 165, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach. <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/2514>

defined and documented in the form of a specification sheet. The technical concept represents the starting point for the optimization and further development of the content of the methodology and the implementation. The technical concept ensures that the development and implementation of the methodology can be carried out in a targeted manner.

#### 4. Methodological concept for resilience assessment

Figure 1 schematically shows the resilience assessment process as it presents itself to the user.

The user works out the regular planning of measures in his field of expertise (e.g., construction management, maintenance management or traffic management) for a network element or a road section and/or for specific engineering constructions of such. Thus, the goal is that no separate investigation is required for the resilience assessment.

If a network element or a road section is assessed from the perspective of the department, a supplementary resilience assessment is carried out with the help of the tool:

##### 1. Vulnerability analysis:

The first step is to make a pragmatic assessment of the vulnerability of the road section and/or for specific infrastructure elements. This is based on an assessment of route-specific characteristics (e.g., traffic volume, capacity utilization,

alternative access options, etc.) and an assessment of the exposure to hazards with regard to the guarantee of functionality (e.g., natural hazards, technical hazards, etc.).

##### 2. Resilience screening:

The aim of the second step is the overall examination of the resilience of a system in its current state, considering any measures already planned in the department, as well as the identification of potential fields of action in which the system performance should be improved with regard to its resilience. Specifically

- the resilience of the system is to be checked on the basis of a catalog of overarching questions, using resilience criteria that cover all aspects / functionalities relevant to the resilience of the network element belonging to the network,
- the focus of action identification to individual, currently least resilient fields of action shall be narrowed, and
- based on the identified fields of action, a pre-selection of potential measures is made, which are then assessed and prioritized in the next step with regard to their resilience effect. In this way, the investigations of the effect of the measures can be carried out in a more targeted and efficient manner.

##### 3. Assessment of measures:

The identified potential measures are then assessed in terms of their resilience effect. The resilience effect of a measure can be determined

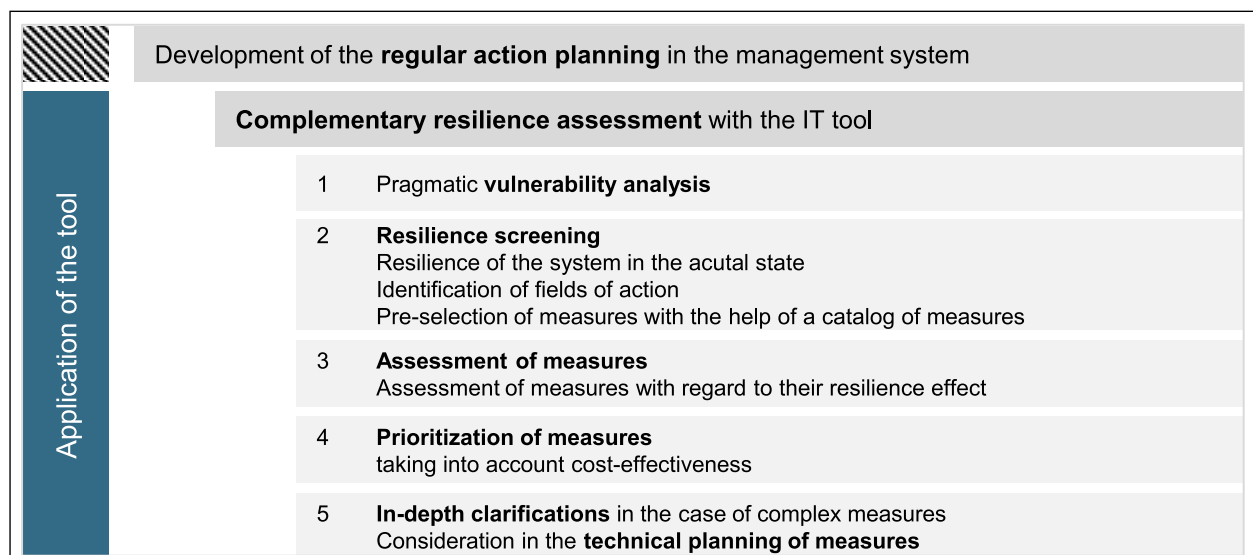


Fig. 1: Schematic representation of the resilience assessment process

by its influence on the course of the resilience curve. Measures change either the frequency of occurrence of disruptive events or the course of the functionality curve after a disruptive event and thus also the resilience of the system by reducing the absolute (vertical) loss of functionality on the one hand and the duration of impact (horizontal) on the other. To assess the resilience effect of a measure on the vulnerable object, the following estimates must thus be made for each measure:

- Change in the frequency of occurrence of a hazard due to the measure; to be determined separately per hazard (hydrological hazard, gravitational hazard, etc.)
- Change in the duration of the interruption of operation or loss of functionality due to the measure; to be determined separately per hazard (hydrological hazard, gravitational hazard, etc.)
- Change in the extent of the loss of functionality due to the measure; to be determined separately per functionality (travel time, operating costs, etc.)

#### 4. Resilience optimization:

Based on the determined resilience effect and considering a cost-effectiveness analysis of the individual measures, a ranking list of prioritized measures or combinations of measures is drawn up that is optimal for the resilience of the system. This prioritized ranking list serves as an aid to the decision maker in selecting the most efficient resilience measures and in implementing consistent resilience management.

As a result, the resilience assessments yield a list of supplemental or adapted departmental measures that could be considered from the perspective of maintaining the function of the roadway segment and/or engineering constructions and an associated pragmatic rating. Additional measures that are judged to be expedient, which on the one hand are relatively simple to implement and do not entail any significant cost consequences, and on the other hand lie within the area of responsibility of the respective department, are to be included directly in the planning of measures wherever possible. In addition, the analysis results in potentially suitable measures for improving resilience. The appropriateness and proportionality of these measures should be analyzed in greater depth in a

further step. These are typically cost-intensive measures or those that are very time-consuming to implement, for example, due to the need for approvals or coordination with different responsible parties.

## 5 Adaptability to railways and waterways

The methodology which was further developed in this project aims at assessing the resilience of road infrastructures. In principle, the infrastructures of the entire transport sector should be resilient to possible hazards. In addition to roads, the focus is therefore also on rail and waterways.

Compared to roads, rail and waterways have the following special features:

- Railways and waterways are more centrally positioned in terms of responsibility for planning, construction, and operation of infrastructure. For railways, these tasks are performed by the railway infrastructure companies under the supervision of the Federal Railway Authority, while the Federal Waterways and Shipping Agency, the subordinate waterways and shipping offices and the new waterways construction offices are responsible for the waterways.
- As with the road network, the sections and routes of the rail and waterway networks are divided into different categories according to their functional importance. In this respect, the networks are basically comparable, although there are hardly any alternative routes available in the waterway network that could be used in the event of a complete closure. At the same time, only a few events occur in the waterway network that lead to a complete breakdown of a waterway. Moreover, for many such events, plans are already in place to quickly restore (partial) functionality.
- The construction of new sections and infrastructure requires a much longer lead time.
- Finally, in addition to its transport function, the waterway also performs other tasks in the areas of energy generation, flood and coastal protection, and other ecosystem services.

In the case of both waterways and railways, infrastructures are already considered in terms of

their resilience as part of various management systems. Thus, corresponding aspects are already considered during operation in the course of structure management, during maintenance and during the planning of new infrastructures or infrastructures to be replaced. However, a methodologically consistent approach is not yet available. For waterways, for example, there is a lack of target values for assessing resilience for the various functionalities of the transport infrastructure.

According to the experts' assessment, the management systems are well supplied with data for waterways and railways via established procedures for assessing the condition of engineering constructions and are available nationwide. Embedding the methodology for assessing the resilience of railway and waterway infrastructures in existing management systems is therefore feasible in principle, especially since the responsibilities are more strongly bundled than for roads. Due to this structure, there is a good overview of route and network dependencies, so that there is a good basis for assessments in this respect within the framework of resilience screening and the evaluation of measures. Since complete resilience assessment methodologies for railway and waterways are not yet available, there seems to be a further need for a corresponding procedure.

## 6 IT tool and user guide

The developed methodology concept was implemented in an IT tool. The tool allows users to pragmatically assess additional measures from a resilience perspective. It also allows for an assessment or ranking of their appropriateness / proportionality in terms of an initial assessment.

By implementing the elaborated methodology in the form of a web-based IT tool, a future integration of the resilience approach in practice should be facilitated. In addition, the IT tool should enable users to recognize the added value of the resilience assessment for their daily work and to develop an interest in the topic of resilience.

In order to show the user the functionalities and the handling of the tool, a user guide was created. The user guide explains the most important functionalities of the tool by means of a short description and corresponding screenshots and illustrations and shows step by step how to use the

IT tool. The primary addressees are the potential users, in particular from the road construction authorities or the Autobahn GmbH. The language, scope and level of detail are aimed at these users and should make it easier for them to use the IT tool in practice.

## 7 Implementation concept

With the implementation of the methodology in an application-oriented IT tool, the foundations are laid to be able to consider the issue of resilience of road sections or network elements of the road network in existing action planning in the future. However, this also requires a concept that supports the implementation of the developed resilience approach and the IT tool in practice. Ultimately, the concept and the tool will only add value and increase the resilience of transport systems if they are accepted and applied in practice. The implementation concept is based on the three pillars shown in Figure 2.

The three pillars include the following activities:

- **Communication and information:**  
Information through existing websites, sending newsletters, information through networks, working groups and associations, and information to a wide audience through contributions at professional meetings and conferences. A good coordination of the activities is crucial.

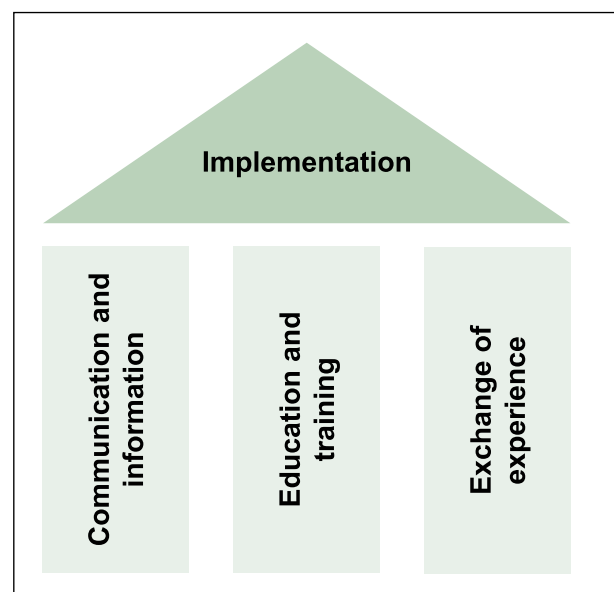


Fig. 2: Three pillars of the implementation concept



- Education and training:  
The user should be answered “How is the concept or the IT tool embedded?” and “How do I apply the concept or the IT tool?”. For this purpose, it is recommended to provide offers (tutorials, webinars, day courses, etc.). Individualized on-site trainings complement the training of the users. It is recommended to choose a pragmatic and easy-to-implement approach and to build on experience.
- Exchange of experience:  
Short term, the aim should be to increase awareness of the concept and the IT tool, to demonstrate its benefits and to provide assistance to interested users. Medium term, the experience gained should be compiled and the findings incorporated into further development.

## Inhalt

<b>Abkürzungen</b> .....	11	5.3.1	Ziel der Maßnahmenbeurteilung.....	27
<b>Glossar</b> .....	13	5.3.2	Festlegung der Systemfunktionalität(en) ..	27
<b>1 Einleitung</b> .....	15	5.3.3	Erfassung der Resilienz Wirkung.....	28
1.1 Ausgangslage und Problemstellung .....	15	5.4	Resilienzoptimierung.....	31
1.2 Zielsetzung.....	15	5.4.1	Ziele der Resilienzoptimierung.....	31
1.3 Berichtsstruktur .....	16	5.4.2	Erfassung der Maßnahmenkosten.....	31
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b> .....	16	5.4.3	Priorisierung der Resilienzmaßnahmen....	32
2.1 Forschung im nationalen und internationalen Kontext .....	16	<b>6 Konzept zur Übertragbarkeit der Methodik auf Schiene und Wasserstraße</b> .....		33
2.2 Definition Resilienz .....	17	6.1	Besonderheiten der Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße.....	33
2.3 Bestehender methodischer Ansatz zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen .....	18	6.2	Einbettung in bestehende Managementsysteme.....	33
2.4 Forschungsbedarf .....	18	6.3	Vulnerabilitätsanalyse .....	34
<b>3 Fachkonzept</b> .....	18	6.4	Resilienzscreening .....	34
<b>4 Prozess zur Umsetzung der Resilienzbewertung</b> .....	19	6.5	Maßnahmenbeurteilung .....	35
4.1 Übersicht.....	19	6.6	Resilienzoptimierung.....	35
4.2 Grundlagen und Informationen .....	20	<b>7 Implementierungskonzept</b> .....		35
4.3 Umgang mit den Ergebnissen.....	21	7.1	Einführung und Übersicht .....	35
<b>5 Methodikkonzept zur Resilienzbewertung</b> .....	21	7.2	Information und Kommunikation .....	36
5.1 Vulnerabilitätsanalyse .....	21	7.3	Aus- und Weiterbildung.....	37
5.1.1 Ermittlung der Kritikalität .....	22	7.4	Erfahrungsaustausch und Weiterentwicklung.....	37
5.1.2 Einschätzung der Gefährdungen .....	22	<b>8 Benutzerleitfaden</b> .....		38
5.1.3 Beurteilung der Vulnerabilität .....	23	8.1	Einleitung .....	38
5.2 Resilienzscreening .....	23	8.2	Funktionalitäten des IT-Tools .....	38
5.2.1 Ziel des Resilienzscreenings .....	23	8.2.1	Übersicht Bewertungsschritte und Navigierung.....	38
5.2.2 Kurzbeschreibung und Ziele .....	24	8.2.2	Validierung .....	39
5.2.3 Festlegung Kriterienkatalog .....	24	8.2.3	Speichern und erneute Bearbeitung (Import) .....	39
5.2.4 Erfassung der Systemresilienz .....	25	8.2.4	Bemerkungen/Notizen .....	40
5.2.5 Identifikation des Handlungsbedarfs.....	26	8.2.5	Informations-Buttons.....	40
5.2.6 Identifikation von Resilienzmaßnahmen ..	27	8.2.6	Report .....	40
5.3 Maßnahmenbeurteilung .....	27			

8.2.7	Abschluss des Screenings.....	41
8.3	Vorgehen.....	42
8.3.1	Untersuchungsgebiet.....	42
8.3.2	Vulnerabilitätsanalyse.....	43
8.3.3	Resilienzscreening.....	45
8.3.4	Resilienzscore.....	46
8.3.5	Handlungsbedarf.....	47
8.3.6	Maßnahmenbeurteilung.....	49
8.3.7	Resilienzoptimierung.....	52
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....</b>	<b>54</b>
9.1	Schlussfolgerungen.....	54
9.2	Empfehlungen und Ausblick.....	55
	<b>Literatur.....</b>	<b>57</b>
	<b>Bilder.....</b>	<b>61</b>
	<b>Tabellen.....</b>	<b>63</b>
<b>A1</b>	<b>Anwenderdialog</b>	
<b>A2</b>	<b>Fachkonzept</b>	
<b>A3</b>	<b>Bewertungsskalen für die Resilienz-Kriterien</b>	
<b>A4</b>	<b>Kreuztabelle für die Maßnahmenidentifikation</b>	
<b>A5</b>	<b>Bewertungsskalen für die Systemfunktionalitäten</b>	

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen  
BAST-Archiv ELBA unter:

<https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

## Abkürzungen

BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BSVI	Bundesvereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure e. V.
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CQRS	Command Query Responsibility Segregation
DTV	Durchschnittlicher Tagesverkehr
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
GIS	Geoinformationssystem
HI	Handlungsbedarfs-Index
IIS	Internet Information Services
LOS	Level of Service
QSV	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs
RDI	Resilienz-Defizit-Index
RS	Resilienzscore
SIB	Straßeninformationsbank
UI/UX	User Interface und User Experience Design
VSVI	Vereinigungen der Straßenbau- und Verkehrsingenieure e. V.



## Glossar

Im Folgenden sind die für ein einheitliches Verständnis des vorliegenden Berichts benötigten Begriffe definiert. Die Definitionen wurden größtenteils im Rahmen von [18] erarbeitet und werden hier entsprechend wiedergegeben.

### Gefährdung

Bei einer Gefährdung handelt es sich um ein mit einer bestimmten Häufigkeit auf das System einwirkendes, disruptives Ereignis, welches das Potenzial besitzt, die Funktionalität einer Infrastruktur zu beeinträchtigen. Im Rahmen dieser Arbeit werden alle potenziell für die Infrastruktur relevanten Gefährdungen berücksichtigt. Diese umfassen sowohl menschliche, technische als auch natürliche Gefährdungen (All-Hazards-Ansatz) [20] [80].

### Disruptives Ereignis

Disruptive Ereignisse führen zu schockartigen Einwirkungen (acute shocks) oder schleichenden Veränderungsprozessen (chronic stresses), welche die Funktionalität eines Systems negativ beeinflussen. Disruptive Ereignisse können gemäß A. R. POSNER [62] in vier Kategorien unterteilt werden: (1) Naturkatastrophen, (2) wissenschaftliche Unfälle und Laborunfälle, (3) durch den Menschen nicht bewusst verursachte Ereignisse und (4) durch den Menschen bewusst verursachte Ereignisse.

### Kritikalität

Die Kritikalität ist ein relatives Maß für die Bedeutung einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionalitätsverlust für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat [7]. Eine Infrastruktur besitzt vor allem dann eine systemische Kritikalität, wenn sie aufgrund ihrer strukturellen, funktionellen und technischen Positionierung im Gesamtsystem der Infrastrukturbereiche von besonders hoher interdependenter Relevanz ist [7] [41] [84] [87]. Beispielsweise kann eine einzelne Brücke im Versagensfall einen sehr großen regionalen Funktionalitätsverlust des Systems „regionales Straßennetz“ verursachen, indem für die Nutzer große Reisezeiten oder Verzögerungen in industriellen Logistikketten entstehen. Ein Infrastrukturobjekt gilt als kritisch, wenn die durch ein Ereignis verursachten, mit einer bestimmten Häufigkeit zu erwartenden Konsequenzen (z. B. volkswirtschaftliche Kosten eines Funktionalitätsverlusts) einen vorher festgelegten Grenzwert für ein aus Sicht Infrastrukturbetreiber und/oder Politik bzw. Gesell-

schaft akzeptables Risiko übersteigen. Unabhängig von der Art der Bedrohung.

### Vulnerabilität

Vulnerabilität beschreibt in diesem Zusammenhang die direkten Konsequenzen (oder Schäden), die durch das Einwirken eines Ereignisses auf eine einzelne Systemkomponente entstehen. Zum Beispiel das Versagen eines Seiles/Kabels (= Systemkomponente) einer Hängebrücke (= System) durch Starkwinde (= Ereignis). Die Vulnerabilität des Systems Brücke wird demzufolge über die Versagenswahrscheinlichkeit der Systemkomponenten definiert. Die Vulnerabilität eines Systems lässt sich nach [46] quantifizieren als der Anteil der Risiken aufgrund von direkten Konsequenzen am Gesamtwert des betrachteten Infrastruktursystems. Dabei müssen sämtliche relevanten Expositionsgrößen innerhalb eines definierten Zeitraums berücksichtigt werden. Maßnahmen zur Reduktion der Vulnerabilität eines Systems setzen darauf, durch eine Verstärkung einzelner Systemkomponenten (nach dem Prinzip des schwächsten Kettengliedes) deren Versagenswahrscheinlichkeiten und die direkten Konsequenzen im Ereignisfall zu reduzieren [15] [35], abhängig von der Art der Gefährdung.

### Robustheit

Robustheit beschreibt die Fähigkeit eines Systems, Ausfälle von einzelnen Systemkomponenten, ohne einen Verlust der Systemfunktionalität zu verkraften. Zum einen handelt es sich dabei um die Folgen der direkten Konsequenzen innerhalb des Systems nach Einwirkung eines Ereignisses. Beispiel für ein robustes System: Die Hängebrücke aus dem oben genannten Beispiel ist so konstruiert, dass das Versagen eines einzelnen Seiles/Kabels kein Versagen der ganzen Brücke nach sich zieht. Zum anderen spiegelt die Robustheit eines Systems aber auch die indirekten Konsequenzen einer Systemveränderung auf die Gesellschaft wider. Exemplarisch kann man fragen: Wird durch das Versagen eines Seiles/Kabels der Hängebrücke die Funktionalität der Brücke eingeschränkt? Kann nur noch eine reduzierte Verkehrsmenge über die Brücke geführt werden und entstehen als Folge davon teure Stau- und Wartezeiten im Berufs- und Logistikverkehr? Die Robustheit lässt sich quantifizieren als der Quotient aus direkten Risiken und den Gesamtrisiken des Systems. Dabei müssen innerhalb eines definierten Zeitraums sämtliche Expositionsgrößen (mögliche Ereignisse) sowie die verschiedenen po-

tenziellen Schadenszustände der Systemkomponenten berücksichtigt werden [46].

#### Risiko

Unter Risiken sind auf das System einwirkende Ereignisse zu verstehen, die mit einer bestimmten Häufigkeit eintreten und im Ereignisfall zu einer Störung des Systems und zu einem Versagen von Systemkomponenten oder des Gesamtsystems führen können (Konsequenzen, Schadensausmaß). Aus mathematischer Sicht wird das Risiko als das Produkt aus Eintrittshäufigkeit und dem zu erwartenden Schadensausmaß definiert [25] [46] [81] [83].

#### Resilienz

Resilienz ist die Fähigkeit eines Systems, sich auf tatsächlich oder potenziell disruptive Ereignisse vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie abzuwehren, sie zu verkraften, sich möglichst schnell davon zu erholen und sich ihnen immer erfolgreicher anzupassen. Schadhafte Ereignisse sind menschlich, technisch sowie natürlich verursachte außergewöhnliche Ereignisse oder Veränderungsprozesse, die extreme oder katastrophale Folgen haben. Negative Einwirkungen entstehen durch menschlich, technisch sowie natürlich verursachte, schockartige Ereignisse (acute shocks) oder schleichende Veränderungsprozesse (chronic stresses) [18] [42] [43].

#### Resilienzmanagement

Das Resilienzmanagement bildet anhand eines zirkulären Zusammenspiels von Zieldefinition, Identifikation kritischer Elemente, Gefährdungsanalyse, Resilienzscreening und Maßnahmenfindung in Kombination mit Informationsübermittlung und periodischen Überprüfungen den übergeordneten Rahmen, um die Resilienz eines Systems auf konzeptionelle und strategische Weise sicherzustellen. In das Resilienzmanagement können bestehende Methoden und Managementsysteme integriert werden (Definition durch Forschungsnehmer erarbeitet im Rahmen dieses Projekts).

#### Resilienzbewertung

Die Resilienzbewertung ist der Teil des Resilienzmanagements, der sich spezifisch mit der Bewertung der Resilienz des Systems auseinandersetzt. Das im Rahmen dieses Forschungsprojekts weiterentwickelte Methodikkonzept zur Resilienzbewertung besteht aus einer Vulnerabilitätsanalyse, dem Resilienzscreening, der Maßnahmenbeurteilung und der Resilienzoptimierung.

#### Vulnerabilitätsanalyse

Die Vulnerabilitätsanalyse ist Teil der Resilienzbeurteilung. Mittels dieser wird beurteilt, ob für ein Objekt respektive Streckenabschnitt des Untersuchungsgebiets eine Erhöhung der Resilienz angezeigt ist, oder ob auf eine entsprechende Betrachtung verzichtet werden kann, da die Kritikalität und/oder die Gefährdungsexposition gering sind. Kritikalität und Gefährdungsexposition werden anhand von charakteristischen Kriterien abgeschätzt. Daraus lässt sich ein Vulnerabilitätsscore ableiten, anhand dessen ein Objekt respektive Streckenabschnitt hinsichtlich seiner Vulnerabilität beurteilt wird.

#### Resilienzscreening

Das Resilienzscreening ist Teil der Resilienzbeurteilung. Anhand eines Kriterienkatalogs findet eine übergeordnete Überprüfung der Resilienz eines Objekts respektive Streckenabschnitts im Ist-Zustand statt. Daraus ergibt sich ein Resilienzscore pro Kriterium, aus welchem ein Handlungsbedarfs-Index abgeleitet wird. Dieser dient als Grundlage für die Identifikation von potenziellen Handlungsfeldern, in welchen die Systemperformance hinsichtlich ihrer Resilienz verbessert werden soll. Basierend auf den identifizierten Handlungsfeldern kann eine Vorauswahl an potenziellen Maßnahmen getroffen werden, welche dann im nächsten Schritt hinsichtlich ihrer Resilienzwirkung beurteilt und priorisiert werden.

#### Maßnahmenbeurteilung

Die Maßnahmenbeurteilung ist Teil der Resilienzbeurteilung. Das Ziel der Maßnahmenbeurteilung besteht darin, die auf Grundlage des Resilienzscreenings identifizierten potenziellen Maßnahmen hinsichtlich ihrer Resilienzwirkung zu beurteilen.

#### Resilienzwirkung

Unter Resilienzwirkung wird der Einfluss einer Maßnahme auf die Resilienz eines Systems respektive den Verlauf der Resilienzkurve verstanden. Beurteilt wird der Einfluss der Maßnahme auf die Eintrittshäufigkeit disruptiver Ereignisse, sowie auf den Funktionalitätsverlust und die Dauer der Unterbrechung im Falle eines disruptiven Ereignisses.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Eine zuverlässige Verkehrsinfrastruktur trägt wesentlich zum gesellschaftlichen Wohlstand bei, indem sie die Versorgungssicherheit gewährleistet und dem Mobilitätsbedürfnis der Bevölkerung und der Wirtschaft Rechnung trägt. Ausfälle der Verkehrsinfrastruktur bedingt z. B. durch Naturereignisse, menschliche Einwirkungen oder technisches Versagen können zu hohen volkswirtschaftlichen Kosten führen, wenn sie zu längeren Unterbrechungen von kritischen Streckenelementen führen. Ein wachsendes Mobilitätsbedürfnis, alternde Infrastrukturen sowie die Zunahme von externen Stressfaktoren wie beispielsweise dem Klimawandel stellen zusätzliche Herausforderungen für die Betreiber von Verkehrsinfrastrukturen dar. Gleichzeitig gilt es Chancen, Risiken und Herausforderung der Digitalisierung zu erkennen und in das Infrastrukturmanagement zu integrieren. Ein umfassendes Infrastrukturmanagement ist deshalb für eine hohe Verfügbarkeit und eine Aufrechterhaltung der Funktionalität im Ereignisfall unabdingbar. Infrastrukturverantwortliche greifen dafür heute auf verschiedenste Managementsysteme wie etwa das Bauwerksmanagement, das Erhaltungsmanagement oder das Ereignismanagement zurück.

Was heute mehrheitlich noch fehlt, ist ein ganzheitliches, systematisches Management, das die übergeordnete Systemresilienz beurteilt und die Beurteilung von Maßnahmen hinsichtlich ihres Beitrags zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur ermöglicht. So könnten die bereits bestehenden Ansätze miteinander verknüpft werden, was den Umgang mit einer zunehmenden Zahl an externen Stressfaktoren erleichtert und es ermöglicht, die volkswirtschaftlichen Kosten gering zu halten.

## 1.2 Zielsetzung

Das vorliegende Forschungsprojekt soll an den methodischen Ansatz und die Überlegungen aus FE 89.0330/2017 Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen [19] anknüpfen, indem es den identifizierten Forschungs- und Weiterentwicklungsbedarf aufgreift. Das Gesamtziel des Projekts ist die methodische und inhaltliche Optimierung und Wei-

terentwicklung des bestehenden methodischen Ansatzes zur Bewertung der Resilienz von Straßeninfrastrukturen, sowie Schritte in Richtung einer Implementierung in der Praxis. Konkret werden die folgenden übergeordneten Ziele verfolgt:

- **Optimierung und Weiterentwicklung der Methodik:**  
Die methodische Weiterentwicklung umfasst die Validierung und Optimierung der bestehenden Methodik. Das Verbesserungspotenzial der Methodik, insbesondere bei der Umsetzbarkeit der quantitativen Bewertung von Resilienzmaßnahmen soll identifiziert und die Methodik optimiert werden. Dies geschieht parallel zur inhaltlichen Weiterentwicklung.

Die inhaltliche Weiterentwicklung der Methodik umfasst die Erweiterung auf alle Phasen des Resilienzzyklus. Am Ende des Forschungsprojekts sollen somit neben Maßnahmen, welche ihre Wirkung in den Phasen reagieren und erholen entfalten, auch solche der Phasen vorbereiten, vorbeugen und schützen berücksichtigt werden können. Weiter umfasst die inhaltliche Weiterentwicklung die Berücksichtigung zusätzlicher Verkehrsträger (Schiene, Wasserstraße). Neben der Berücksichtigung dieser Verkehrsträger im Falle disruptiver Ereignisse im Straßennetz sollen erste Überlegungen gemacht werden, wie die Methodik auf Schiene und Wasserstraße übertragen werden kann, um die Resilienz der Systeme Schiene und Wasserstraße zu erhöhen.

- **Transfer von der Forschung in die Praxis:**  
Neben der Weiterentwicklung der Methodik steht deren Implementierung im Vordergrund. Dafür wird ein webbasiertes IT-Tool zur Resilienzbewertung entwickelt, mit welchem die Resilienz eines (Straßen-)Systems sowie die Resilienzwirkung von Maßnahmen bewertet werden können. Es soll sich sowohl durch eine einfache Anwendung als auch durch einen guten Zugang (webbasiert) auszeichnen. Um die Nutzung des IT-Tools zu erleichtern, wird zudem ein Benutzerleitfaden erstellt. Ein Implementierungskonzept soll aufzeigen, wie Methodik und IT-Tool in der Praxis zur Anwendung kommen sollen.

Der Einbezug der potenziellen Anwender in alle wesentlichen Arbeitsschritte stellt dabei einen wichtigen Erfolgsfaktor dar. So kann eine Methodik und IT-Lösung entwickelt werden, welche den Nutzer-



bedürfnissen entspricht und in der Praxis auch anwendbar ist.

So wird ein wichtiger Meilenstein für die Integration einer Resilienzbewertung als fester Bestandteil des Verkehrsinfrastrukturmanagements erreicht und der Grundstein für eine Überführung der theoretischen Konzepte aus der Forschung in die Praxis gelegt werden, sodass auch zukünftig Entscheidungen im Infrastrukturmanagement zur Aufrechterhaltung der Funktionalität der Straßen besser vorbereitet und Maßnahmen respektive Investitionen besser begründet werden können.

### 1.3 Berichtsstruktur

Der Bericht ist wie folgt aufgebaut:

- Kapitel 2 zeigt den aktuellen Stand der Forschung und Technik auf.
- Das Fachkonzept (Kapitel 3) hält die konkreten, übergeordneten Anforderungen an die Methodik, an das IT-Tool zur Resilienzbewertung sowie an die Handlungshilfen (Implementierungskonzept und Benutzerleitfaden) fest.
- Im Methodikkonzept (Kapitel 4 und 5 ) sind die einzelnen Schritte der Resilienzbewertung im Detail beschrieben.
- Kapitel 6 beinhaltet Überlegungen zur Übertragbarkeit der Methodik auf Schiene und Wasserstraße.
- Das Implementierungskonzept (Kapitel 7) gibt Hinweise zur Implementierung des entwickelten

Resilienzansatzes und des IT-Tools in der Praxis.

- Der Benutzerleitfaden (Kapitel 8) soll die Anwender bei der Benutzung des IT-Tool unterstützen.

## 2 Stand der Forschung und Technik

### 2.1 Forschung im nationalen und internationalen Kontext

Der Begriff Resilienz hat in den letzten Jahren sowohl im nationalen als auch im internationalen Forschungskontext stark an Bedeutung gewonnen. Zahlreiche wissenschaftliche Publikationen und Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Resilienz von verschiedensten Systemen. Während wissenschaftliche Publikationen das Thema auf einer eher theoretischen, konzeptionellen Ebene abhandeln, streben verschiedene Forschungsprojekte eine zunehmend anwendungsorientierte Auseinandersetzung mit dem Begriff an.

Während sich einige Forschungsprojekte auf ein umfassendes, übergeordnetes Resilienzmanagement fokussieren, setzen andere auf einzelne Elemente wie das Netscreening oder die Resilienzbewertung (Bild 2-1). Dabei liegt der Fokus der Projekte teilweise spezifisch auf Verkehrsinfrastrukturen, wie beispielsweise bei den EU-Projekten AllTrain [2], FORSEE [28], RAINEX [69], RESIST [72], RESOLUTE [74], SAFEWAY [77], SeRoN [86] oder PANOPTIS [61]. Andere Projekte legen den Fokus auf kritische Infrastrukturen im Allgemeinen wie bei

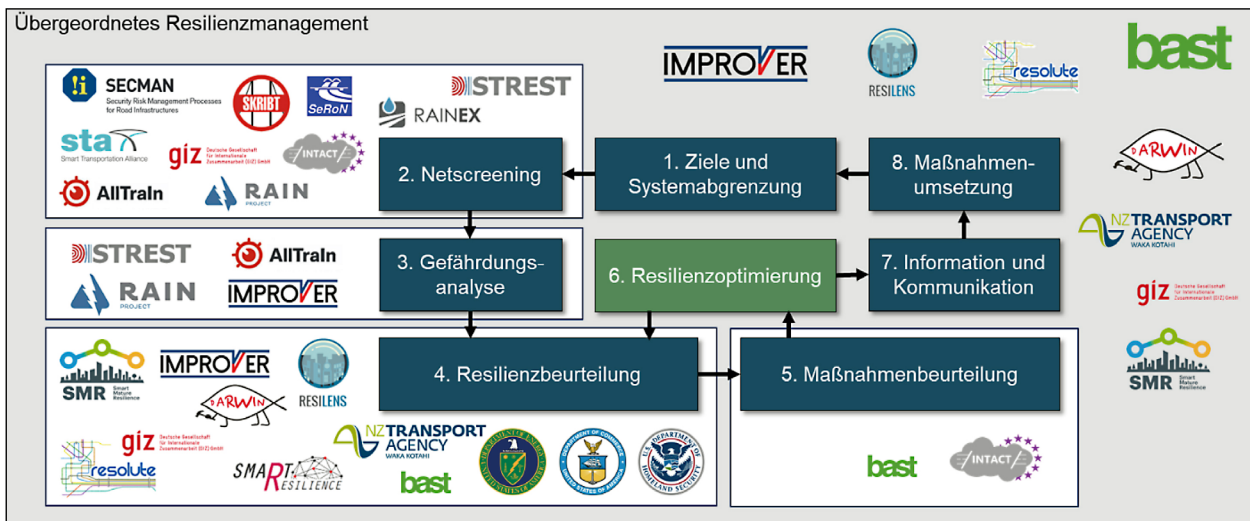


Bild 2-1: Einordnung von Forschungsprojekten in die Schritte des Resilienzmanagementzyklus gemäß DEUBLEIN et al. (2020) [19] und MAYER et al. (2020) [57]

spielsweise DARWIN [17], IMPROVER [44], IN-TACT [45], RESILENS [71], SmartResilience [88] oder STREST [90] oder auf Gemeinden und Städte wie SMR [89].

Auch im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen entstanden innerhalb der letzten Jahre – unter anderem in Zusammenarbeit mit der EBP Schweiz AG – mehrere Forschungsarbeiten, welche auf die Entwicklung und Implementierung von Resilienzansätzen im gesamten Lebenszyklus der Straßenverkehrsinfrastruktur auf den entsprechenden Ebenen abzielen:

- FE 89.0320/2016 Stand der Technik hinsichtlich der Bewertung von Resilienzmaßnahmen [18]
- FE 15.0627/2016/ARB Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen [29]
- FE 89.0330/2017 Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen [19]
- FE 01.0199/2017/ARB Resilienz der Straßenverkehrsinfrastruktur - Stand der Forschung und Potenziale im Management von außergewöhnlichen Ereignissen [57]

Das Forschungsprojekt FE 69.0005/2020 Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur basiert auf den erarbeiteten Grundlagen der oben genannten Projekte sowie Erkenntnissen aus wissenschaftlichen Publikationen, technischen Berichten und Forschungsprojekten (vgl. Literaturverzeichnis).

## 2.2 Definition Resilienz

In den Forschungsprojekten FE 89.0320/2016 [18], FE 89.0330/2017 [19] und FE 01.0199/2017/ARB [57] wurde Resilienz definiert als die Fähigkeit eines Systems, auf disruptive Ereignisse vorbereitet zu sein, sie zu vermeiden, zu überwinden und sich rasch zu erholen (HUGHES et al. (2014) [42]; HYNES et al. (2016) [43]; DEUBLEIN et al. (2017) [18]). Disruptive Ereignisse können durch Natur, Technik oder den Menschen verursacht werden und haben negative Auswirkungen auf die Funktionalität eines Systems (Bild 2-2). Die Resilienz eines Systems kann somit als Verlauf der Funktionalität über die Zeit dargestellt werden.

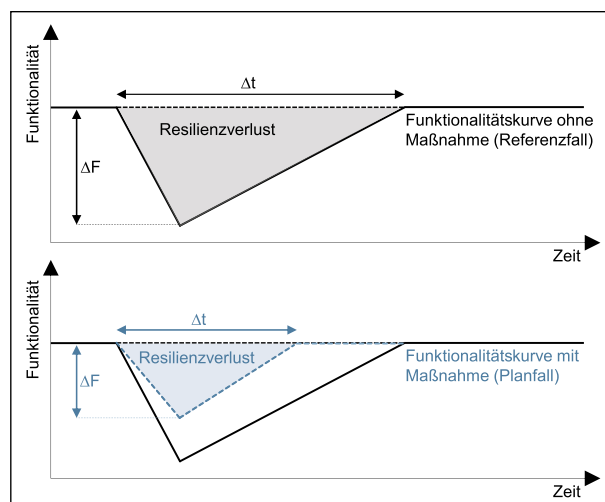


Bild 2-2: Vereinfachte Funktionalitätskurve eines Systems. Der Resilienzverlust entspricht dem Verlust der Funktionsfähigkeit über die Zeit.  $\Delta F$  ist der maximale Funktionsverlust bei einer Störung und  $\Delta t$  die Zeit, bis sich das System vollständig erholt hat. Maßnahmen können ebenfalls die Eintrittshäufigkeit eines disruptiven Ereignisses und somit die die Häufigkeit eines Funktionsabfalls reduzieren (nicht in der Abbildung dargestellt) (DEUBLEIN et al. (2020) [19])

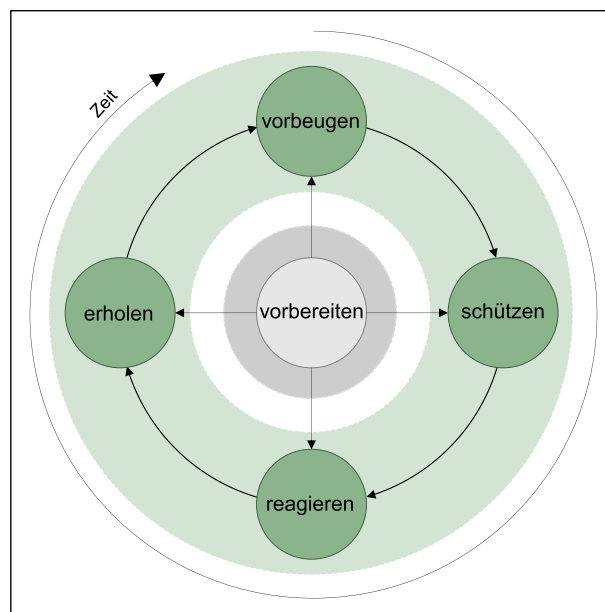


Bild 2-3: Resilienzyklus mit den fünf Ansatzpunkten zur Erhöhung der Resilienz eines Systems (THOMA (2014) [93], adaptiert von DEUBLEIN et al. (2020) [19])

Mit geeigneten Maßnahmen kann die Resilienz eines Systems erhöht werden (Bild 2-2, unten). Diese Maßnahmen können baulicher, technischer oder organisatorischer Art sein und verringern den maximalen Verlust an Funktionalität und/oder die Zeit bis zur Wiederherstellung der vollen Funktionsfähigkeit des Systems, indem sie z. B. die Robustheit steigern oder Redundanzen erhöhen. Weiter können Maßnahmen die Eintrittshäufigkeit eines disruptiven Ereignisses reduzieren.

Die Maßnahmen lassen sich einer der fünf Phasen des in Bild 2-3 dargestellten Resilienzyklus zuordnen. Maßnahmen, die den Phasen vorbeugen, schützen, reagieren und erholen zugeordnet werden können, entfalten ihre Wirkung in chronologischer Reihenfolge. Vorbereitende Maßnahmen sind zeitlich entkoppelt. Sie wirken sich indirekt auf die Resilienz des Systems aus, indem sie die Wirkung von Maßnahmen in den anderen Phasen verstärken.

### 2.3 Bestehender methodischer Ansatz zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen

Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 89.0330/2017 Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen [19] wurde ein methodischer Ansatz zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen für die Resilienzphasen reagieren und erholen entwickelt, welcher im Wesentlichen auf den Erkenntnis-

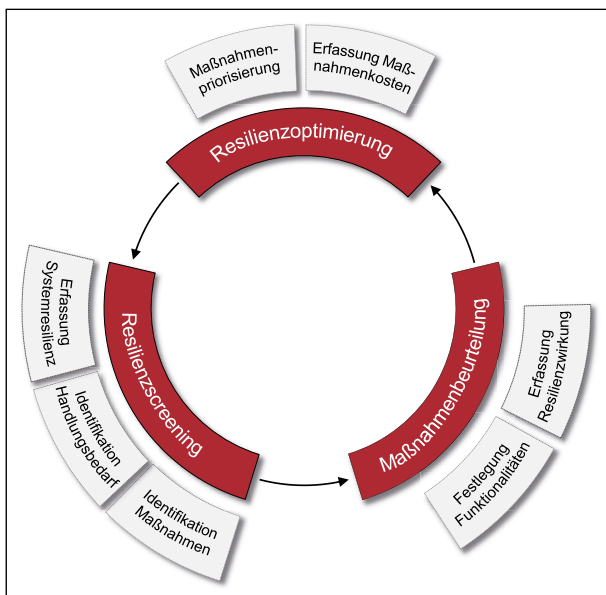


Bild 2-4: Schematische Darstellung der drei Kernschritte der Resilienzbewertung gemäß DEUBLEIN et al. (2020) [19]

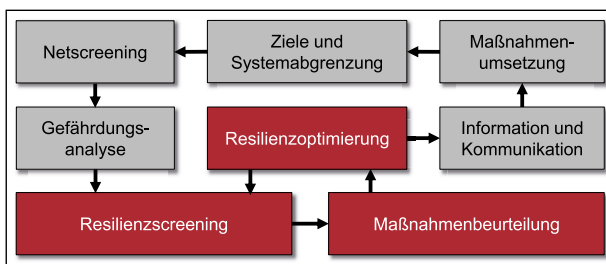


Bild 2-5: Resilienzmanagementzyklus gemäß DEUBLEIN et al. (2020) [19]

sen aus FE 89.0320/2016 Stand der Technik hinsichtlich der Bewertung von Resilienzmaßnahmen [18] basiert. Dieser Ansatz besteht im Kern aus drei Schritten (Bild 2-4) dem Resilienzscreening, der Maßnahmenbeurteilung und der Resilienzoptimierung.

Zunächst wird im Resilienzscreening der Handlungsbedarf anhand eines definierten Kriteriensets ermittelt. Dieses zeigt diejenigen Handlungsfelder mit den größten Verbesserungspotenzialen auf. Darauf aufbauend werden Maßnahmen zur Verbesserung der Resilienz identifiziert und hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Resilienz des Systems bewertet (Maßnahmenbeurteilung). Schließlich werden in der Resilienzoptimierung eine Kosten-Wirksamkeits-Analyse durchgeführt und die Maßnahmen priorisiert. Diese drei Schritte sind in einen übergeordneten Resilienzmanagementzyklus eingebettet (Bild 2-5).

Der entwickelte methodische Ansatz ermöglicht eine pragmatische Bewertung von Resilienzmaßnahmen. Das Forschungsprojekt stellt eine erste Grundlage für eine Integration des wissenschaftlich etablierten Resilienzverständnisses in den anwendungsorientierten Alltag von Infrastrukturverantwortlichen dar.

### 2.4 Forschungsbedarf

Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 89.0330/2017 Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen [19] wurde weiterer Forschungsbedarf identifiziert, der in dem hier beschriebenen Forschungsprojekt FE 69.0005/2020 Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur aufgegriffen werden soll.

## 3 Fachkonzept

Das Fachkonzept wurde zu Beginn des Forschungsprojektes entwickelt und beschreibt die Situation aus der damaligen Sicht. Es hält die konkreten, übergeordneten Anforderungen an die Methodik, an das IT-Tool zur Resilienzbewertung sowie an die Handlungshilfen (Benutzerleitfaden, Implementierungskonzept) im Sinne eines Pflichtenhefts fest. Es stellt die Ausgangslage für die inhaltliche Opti-

mierung und Weiterentwicklung der Methodik und die Implementierung in das IT-Tool dar. Mithilfe des Fachkonzepts wurde die zielgerichtete Umsetzung der inhaltlichen Methodikentwicklung und der Implementierung sichergestellt. Das Fachkonzept befindet sich in Anhang A2 und ist wie folgt gegliedert.

- **Übergeordnete Anforderungen:**  
In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die Anwendung des zu entwickelnden IT-Tools in der Praxis aussieht. Es werden die Zielgruppen definiert, der Nutzen/Mehrwert der Methodik/des IT-Tools beschrieben, die wichtigsten Grundsätze zum IT-Tool dargelegt und erste Überlegungen zu den resultierenden Ergebnissen aus dem IT-Tool angestellt.
- **Anforderungen an das IT-Tool:**  
Es werden die wichtigsten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an das IT-Tool definiert. Neben den technischen Anforderungen gehören dazu Überlegungen zur Benutzbarkeit, der Kompatibilität, der Zuverlässigkeit oder der Sicherheit. Weiter ist die vorgesehene Architektur des IT-Tools beschrieben sowie das Konzept zum Hosting, zur Entwicklung, zum Testing und zur Übergabe des IT-Tools an die Bundesanstalt für Straßenwesen.
- **Anforderungen an die methodische Weiterentwicklung:**  
Es werden die erforderlichen methodischen Weiterentwicklungen und mögliche Lösungsansätze beschrieben, konkret die Identifikation und Umsetzung von Optimierungspotenzial, die Erweiterung auf alle Phasen des Resilienzzyklus und

die Übertragbarkeit auf alternative Verkehrsträger.

- **Anforderungen an die Handlungshilfen:**  
Abschließend werden Anforderungen an das Implementierungskonzept und den Benutzerleitfaden beschrieben.

Mit in das Fachkonzept eingeflossen sind die Ergebnisse aus einem Anwenderdialog mit Vertretern von Straßenbauverwaltungen (Anhang A1).

## 4 Prozess zur Umsetzung der Resilienzbewertung

### 4.1 Übersicht

Bild 4-1 zeigt schematisch den Ablauf der Resilienzbewertung, wie er sich für die Anwender präsentiert.

Die Anwender erarbeiten die reguläre Maßnahmenplanung in ihrem Fachgebiet (z. B. Bauwerksmanagement, Erhaltungsmanagement oder Verkehrsmanagement) für einen Streckenabschnitt und/oder für spezifische Ingenieurbauwerke eines solchen. Es ist also Ziel, dass für die Resilienzbewertung keine gesonderte Untersuchung vorgenommen werden muss.

Wird ein Streckenabschnitt aus Sicht des Fachbereichs begutachtet, wird mit Hilfe des IT-Tools darauf aufbauend eine ergänzende Resilienzbewertung vorgenommen:



Bild 4-1: Schematische Darstellung zum Prozess der Resilienzbewertung

1. Im ersten Schritt geht es darum eine pragmatische Beurteilung der Vulnerabilität des Streckenabschnitts und/oder für spezifische Infrastrukturelemente vorzunehmen.<sup>1</sup> Dies basiert auf einer Beurteilung von streckenspezifischen Charakteristika (z. B. Verkehrsbelastung, Auslastung, verbindungsfunctionale Bedeutung etc.) und der Beurteilung der Exposition gegenüber Gefährdungen hinsichtlich der Funktionalitätsgewährleistung (z. B. Naturgefahren, technische Gefahren etc.).
2. Ziel des zweiten Schrittes ist die übergeordnete Überprüfung der Resilienz eines Systems im Ist-Zustand unter Berücksichtigung von gegebenenfalls bereits im Fachbereich geplanten Maßnahmen, sowie der Identifikation von potenziellen Handlungsfeldern, in welchen die Systemperformance hinsichtlich ihrer Resilienz verbessert werden soll. Konkret soll
  - die Resilienz des Systems anhand eines (erweiterten) Katalogs mit übergeordneten Fragestellungen überprüft werden, und zwar anhand von Resilienz Kriterien, welche sämtliche für die Resilienz des zum Streckenabschnitt gehörenden Netzes relevanten Aspekte/Funktionalitäten abdecken,
  - der Fokus der Maßnahmenfindung auf einzelne, aktuell am wenigsten resiliente Handlungsfelder eingegrenzt werden und
  - basierend auf den identifizierten Handlungsfeldern eine Vorauswahl an potenziellen Maßnahmen getroffen werden, welche dann im nächsten Schritt hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung beurteilt und priorisiert werden. So können die Untersuchungen zur Maßnahmenwirkung zielgerichteter und effizienter durchgeführt werden.
3. Die identifizierten potenziellen Maßnahmen werden danach hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung beurteilt. Die Resilienz Wirkung einer Maßnahme lässt sich anhand ihres Einflusses auf den Verlauf der Resilienz Kurve ermitteln. Maßnahmen verändern entweder die Eintrittshäufigkeit disruptiver Ereignisse oder den Verlauf der Funktionalitätskurve nach einem disruptiven Ereignis und damit auch die Resilienz des Systems, indem sie zum einen den absoluten (vertikalen) Funktionalitätsverlust und zum anderen die zeitliche Einwirkungsdauer (horizontal) reduzieren.
4. Auf Grundlage der ermittelten Resilienz Wirkung und unter Berücksichtigung einer Kosten-Wirkungs-Betrachtung der einzelnen Maßnahmen wird eine für die Resilienz des Systems optimale Rangliste der priorisierten Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen erstellt. Diese priorisierte Rangliste dient dem Entscheidungsträger als Hilfsmittel bei der Auswahl der effizientesten Resilienzmaßnahmen.
5. Im Ergebnis resultiert somit aus den Resilienz-bewertungen eine Liste ergänzender oder angepasster Maßnahmen des Fachbereichs, die aus Sicht des Funktionserhalts des Streckenabschnitts und/oder der Infrastrukturelemente in Frage kommen und eine zugehörige pragmatische Bewertung. Als zweckmäßig beurteilte zusätzliche Maßnahmen, die einerseits verhältnismäßig einfach umzusetzen sind und keine maßgeblichen Kostenfolgen nach sich ziehen und andererseits im Zuständigkeitsbereich des jeweiligen Fachbereichs liegen, sollen nach Möglichkeit direkt in die Maßnahmenplanung aufgenommen werden. Daneben resultieren aus der Analyse potenziell geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Resilienz, deren Zweckmäßigkeit und Verhältnismäßigkeit in einem weiteren Schritt vertieft analysiert werden sollten. Dies sind typischerweise kostenintensive Maßnahmen oder solche, die in der Umsetzung zum Beispiel aufgrund von notwendigen Genehmigungen oder Koordination mit unterschiedlichen Aufgabenträgern sehr aufwendig sind.

## 4.2 Grundlagen und Informationen

Die Resilienz Bewertung basiert auf i. d. R. einfach verfügbaren Informationen und Daten oder auf pragmatischen Einschätzungen durch die Anwender.<sup>2</sup> Das Verfahren nimmt dabei bewusst in Kauf, dass mit den Einschätzungen Unschärfen in der Bewertung einhergehen. Ziel und Zweck des Verfahrens ist eine erste Einschätzung der Resilienz und der Wirkung respektive Priorisierung von resili-

<sup>1</sup> Im Resilienz Kreislauf erfolgt dies üblicherweise im Netzscreening bzw. der Gefährdungsanalyse. Für die Anwendung des IT-Tools bildet aber nicht die Suche nach kritischen Elementen im Netz der Startpunkt der Analysen, sondern die fachspezifische Ermittlung und Planung von Maßnahmen für einen Streckenabschnitt. Aus diesem Grund muss die Vulnerabilitätsbetrachtung hier zusätzlich einfließen.

<sup>2</sup> Je nachdem können für die Einschätzungen durch die Anwender auch weitere Experten einbezogen werden.

enzerhöhenden Maßnahmen in einer pragmatischen und anwendungsfreundlichen Weise.

Bei Bedarf respektive bei Unsicherheit zu spezifischen Eingangsdaten können über Sensitivitätsbetrachtungen der Einfluss und die Wirkungen z. B. von spezifischen Maßnahmen abgeschätzt werden.

### 4.3 Umgang mit den Ergebnissen

Die Ergebnisse aus der Resilienzbewertung geben den Anwendern Aufschluss darüber, wie die Resilienz für den untersuchten Streckenabschnitt zu beurteilen ist, ob Handlungsbedarf hinsichtlich Verbesserung der Resilienz besteht und welche Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz im Vordergrund stehen.

Die Anwendungsergebnisse können – aufgrund der oben angesprochenen Unschärfen – noch keine Grundlage für eine eigentliche Maßnahmenplanung darstellen. Vielmehr sind sie Ausgangslage, um den Handlungsbedarf auszuweisen und bei Bedarf in einer vertiefenden Betrachtung eine gezielte und detaillierte Ermittlung der Resilienzwirkung von potenziell effektiven und effizienten Maßnahmen zu analysieren.

## 5 Methodikkonzept zur Resilienzbewertung

### 5.1 Vulnerabilitätsanalyse

Gegenüber der im Forschungsprojekt FE 89.0330/2017 [19] entwickelten Methodik ist der Ausgangspunkt für die Umsetzung der Resilienzbewertung verändert. Mit der Einbettung der Resilienzbewertung in die Prozesse und Abläufe bestehender Managementsysteme gilt es für einen ausgewählten Streckenabschnitt respektive das Objekt zuerst die Vulnerabilität zu bestimmen. Diese wird bestimmt, indem einerseits die Kritikalität und andererseits mögliche Gefährdungen pragmatisch eingeschätzt werden.

Ziel der Vulnerabilitätsanalyse ist es abzuschätzen, ob für ein Objekt respektive Streckenabschnitt des Untersuchungsgebiets eine Erhöhung der Resilienz überhaupt angezeigt ist oder ob auf eine entsprechende Betrachtung verzichtet werden kann.

Zudem werden Abschätzungen zur erwarteten Häufigkeit des Auftretens der jeweiligen Gefährdung sowie zum erwarteten Betriebsunterbrechung vorgenommen, welche im Zuge der Maßnahmenbeurteilung verwendet werden.

Merkmal	Bemessungsgröße	Bewertung (Score Kritikalität)
Verkehrsbelastung	Querschnittsbezogene durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV)	1: weniger als 16.000 Fahrzeuge pro Tag 2: weniger als 60.000 Fahrzeuge pro Tag 3: weniger als 88.000 Fahrzeuge pro Tag 4: weniger als 120.000 Fahrzeuge pro Tag 5: über 120.000 Fahrzeuge pro Tag
Auslastung	In Anlehnung an Level of Service (LOS) und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV)	1: geringes Stauaufkommen 3: Stau > 1 Std. an mehreren Tagen pro Monat 5: Stau > 1 Std. an mehreren Tagen pro Woche
Verbindungsfunktionale Bedeutung	Verbindungsfunktionsstufen nach FGSV	1: klein- und nahräumig wichtige Verbindung (Verbindungsfunktionsstufe IV und V) 2: regional wichtige Verbindung (Verbindungsfunktionsstufe III) 3: überregional wichtige Verbindung (Verbindungsfunktionsstufe II) 4: großräumig wichtige Verbindung (Verbindungsfunktionsstufe I) 5: kontinental wichtige Verbindung (Verbindungsfunktionsstufe 0)
Strategische Bedeutung	Nutzbare Ausweichstrecken über das untergeordnete Straßennetz	1: zahlreiche Ausweichstrecken in der Nähe 3: mehrere Ausweichstrecken in der Nähe 5: wenige Ausweichstrecken in der Nähe
Zustand	Einschätzung Erhaltungszustand (Unebenheiten, Spurrinnen, mangelnde Griffigkeit, Risse, Flickstellen, Eckabbrüche, Kantschäden usw.)	1: keine/kaum Mängel am Erhaltungszustand (Erhaltungszustandsnote ≤ 2.5) 3: durchschnittliche Mängel am Erhaltungszustand (2.5 < Erhaltungszustandsnote ≤ 4.5) 5: Sanierungsbedarf (Erhaltungszustandsnote > 4.5)

Tab. 5-1: Bewertungskriterien Kritikalität

### 5.1.1 Ermittlung der Kritikalität

Die Kritikalität ist ein relatives Maß für die Bedeutung einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionalitätsverlust zum Beispiel für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat. Ein Streckenabschnitt besitzt vor allem dann eine systemische Kritikalität, wenn sie aufgrund ihrer strukturellen, funktionellen und technischen Positionierung im Straßennetz von besonders hoher interdependenter Relevanz ist. Beispielsweise kann eine einzelne Brücke im Versagensfall einen sehr großen regionalen Funktionalitätsverlust des Systems „regionales Straßennetz“ verursachen, indem für die Nutzer große Verlängerung der Reisezeiten oder Verzögerungen in industriellen Logistikketten entstehen. Ein Infrastrukturobjekt gilt als kritisch, wenn die durch ein Ereignis verursachten zu erwartenden Konsequenzen (z. B. volkswirtschaftliche Kosten eines Funktionalitätsverlusts) ein aus Sicht von Infrastrukturbetreibern und/oder der Politik bzw. der Gesellschaft akzeptables Maß übersteigen. Die Kritikalität eines Ingenieurbauwerks oder des Straßenabschnitts ist dabei unabhängig von der Art der Bedrohung. Für die vorliegende Methodik und die Umsetzung im IT-Tool wird die Kritikalität anhand eines Kriterienkatalogs zu typischen Charakteristika ermittelt (Tabelle 5-1).

Die Kriterien orientieren sich an FE 01.0199/ARB/2017 [57]. Für die fünf Kriterien kann – im Falle fehlender Daten und Informationen – auf Abschätzungen durch die Anwender abgestützt werden. Zur Beurteilung der Kritikalität werden die Be-

wertungen für alle Kriterien zu einem Gesamtwert addiert.

### 5.1.2 Einschätzung der Gefährdungen

Bei einer Gefährdung handelt es sich um ein mit einer bestimmten Häufigkeit auf das System einwirkendes, disruptives Ereignis, welches das Potenzial besitzt, die Funktionalität einer Infrastruktur zu beeinträchtigen. Im Rahmen dieser Arbeit werden alle potenziell für die Infrastruktur bzw. den Betrieb relevanten Gefährdungen berücksichtigt werden, also sowohl naturbedingte wie auch technische oder durch Menschen bedingte Gefährdungen (All-Hazards-Ansatz).

Anhand der nachfolgend dargelegten Gefährdungen und Kriterien (Tabelle 5-2, Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4) wird auf Basis einer Einschätzung der Anwender eine Beurteilung für das untersuchte Objekt bzw. den untersuchten Streckenabschnitt vorgenommen.

Für alle Kriterien kann – im Falle fehlender Daten und Informationen – analog zur Kritikalität wiederum auf Abschätzungen durch die Anwender abgestützt werden. Zur Beurteilung der Gefährdungen werden die Bewertungen für alle Kriterien zu einem Gesamtwert addiert.

Ergänzend zu den Einschätzungen hinsichtlich der Exposition gegenüber Gefährdungen für jede Gefährdung wird eine Abschätzung zur erwarteten Häufigkeit des Auftretens der jeweiligen Gefährdung sowie zur erwarteten Betriebsunterbrechung vorgenommen. Diese Informationen werden nicht

Naturbedingte Gefährdungen	Beispiele	Bewertung (Score Gefährdung)
Hydrologische Gefahren	Hochwasser, Überflutung durch Hangwasser	0: keine Exposition 1: < 5 % des Untersuchungsbereichs exponiert 3: < 25 % des Untersuchungsbereichs exponiert 5: ≥ 25 % des Untersuchungsbereichs exponiert
Gravitative Gefahren	Schneelawine Murgang, Hangmuren, Tiefreichende Hangbewegungen Steinschlag, Felssturz	0: keine Exposition 1: < 5 % des Untersuchungsbereichs exponiert 3: < 25 % des Untersuchungsbereichs exponiert 5: ≥ 25 % des Untersuchungsbereichs exponiert
Meteorologische Gefahren	Sturm, Starkregen, Hagel, extremer Schneefall, Schneeverwehungen, Vereisung, Nebel	0: keine Exposition 1: unterdurchschnittliche Exposition 3: durchschnittliche Exposition 5: überdurchschnittliche Exposition

Tab. 5-2: Bewertungskriterien naturbedingte Gefährdungen<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Die Erdbebengefährdung ist bewusst nicht im Katalog möglicher Gefährdungen enthalten. Ein infrastrukturelevantes Erdbeben hätte großräumige Auswirkungen, die sich auch auf mögliche Umfahrungsrouten auswirken würden. Zudem steht bei einem größeren Erdbeben die Grundversorgung der Bevölkerung im Vordergrund. Die definierten Funktionalitäten wären für einen solchen Fall neu festzulegen

Menschbedingte Gefährdungen	Beispiele	Bewertung (Score Gefährdung)
Unfallgeschehen	Unfälle, Brand	1: unterdurchschnittliche Unfallrate 3: durchschnittliche Unfallrate 5: überdurchschnittliche Unfallrate
Sabotage	Brand, Explosion, Cyber-Angriff	1: weniger relevant als auf anderen Strecken 3: vergleichbar relevant wie auf anderen Strecken 5: relevanter als auf anderen Strecken

Tab. 5-3: Bewertungskriterien menschbedingte Gefährdungen

Technische Gefährdungen	Beispiele	Bewertung (Score Gefährdung)
Technische Störungen	Stromausfall/Blackout, Ausfall wichtiger verkehrstechnischer Systeme, IT, Materialversagen, Brand	1: weniger relevant als auf anderen Strecken 3: vergleichbar relevant wie auf anderen Strecken 5: relevanter als auf anderen Strecken

Tab. 5-4: Bewertungskriterien technische Gefährdungen

Wie häufig wird das Auftreten der Gefährdung erwartet?
Mehr als 100 Ereignisse pro Jahr
In der Größenordnung von 100 Ereignissen pro Jahr
In der Größenordnung von 10 Ereignissen pro Jahr
In der Größenordnung von 1 Ereignis pro Jahr
In der Größenordnung von 1 Ereignis in 10 Jahren
In der Größenordnung von 1 Ereignis in 100 Jahren
Weniger als Ereignis in 100 Jahren

Tab. 5-5: Gliederung der Einschätzung der Eintrittshäufigkeiten (je Gefährdung)

Wie lange bleibt die Strecke im Ereignisfall unterbrochen?
mehr als 6 Monate
einige Wochen bis Monate
einige Tage bis Wochen
einige Stunden bis Tage
einige Stunden
weniger als eine Stunde

Tab. 5-6: Gliederung der Einschätzung der Dauer bis zur Wiederherstellung der Systemfunktionalität (je Gefährdung)

direkt für die Bestimmung der Vulnerabilität genutzt; sie können aber im Zuge der Resilienzoptimierung bei der Maßnahmenbeurteilung herangezogen werden.

Es gilt festzuhalten, dass für die vorliegende Resilienzbewertung lediglich eine sehr grobe Abschätzung vorgenommen werden kann. Tatsächlich kann insbesondere die Unterbrechungsdauer je nach Art, Ablauf und Ausprägung eines Ereignisses erheblich variieren. Hier geht es aber lediglich um eine (erste) Einordnung.

### 5.1.3 Beurteilung der Vulnerabilität

Basierend auf der ermittelten Kritikalität (Score Kritikalität) und der Einschätzung der Gefährdungen (Score Gefährdungen), welche sich aus der Summe der einzelnen Bewertungen in Tabelle 5-1 (Kritikalität) respektive Tabelle 5-2, Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 (Gefährdungen) berechnet, lässt sich die Einstufung der Vulnerabilität gemäß Tabelle 5-7 vornehmen.

Liegt die ermittelte Bewertung gemäß Tabelle 5-7 in einem roten Feld, so ist eine Resilienzbewertung angezeigt und das Verfahren durchzuführen. An-

		Score Kritikalität			
		<9	9-14	15-20	>20
Score Gefährdungen	>18				
	13-18				
	7-12				
	<7				

Tab. 5-7: Ermittlung der Vulnerabilität

denfalls kann davon ausgegangen werden, dass eine Untersuchung nicht dazu führen würde, dass zusätzliche Maßnahmen aus Blickwinkel der Resilienz angezeigt sind.

Liegt bereits eine detaillierte Vulnerabilitätsanalyse (z. B. mit Berücksichtigung von bautechnischen Aspekten) vor, respektive ist bekannt, welche Objekte vertieft hinsichtlich ihrer Resilienz untersucht werden sollen, kann auf die Beurteilung der Vulnerabilität verzichtet werden.

## 5.2 Resilienzscreening

### 5.2.1 Ziel des Resilienzscreenings

Ziel des Resilienzscreenings ist die übergeordnete Überprüfung der Resilienz eines Systems im Ist-Zu-



stand, sowie der Identifikation von potenziellen Handlungsfeldern, in welchen die Systemperformance hinsichtlich ihrer Resilienz verbessert werden soll. Konkret soll durch ein der Maßnahmenbeurteilung vorgelagertes Resilienzscreening

- die Resilienz des Systems anhand eines Katalogs mit übergeordneten Fragestellungen überprüft werden, und zwar anhand von Resilienzskriterien, welche sämtliche für die Resilienz des definierten Systems relevanten Aspekte abdecken; beispielsweise finanzielle Aspekte (Kostenvereinbarungen), planerische Aspekte (z. B. Notfallpläne), technische Aspekte (z. B. Redundanzen),
- der Fokus der Maßnahmenfindung auf einzelne, aktuell am wenigsten resiliente Handlungsfelder eingegrenzt werden und
- basierend auf den identifizierten Handlungsfeldern eine Vorauswahl an potenziellen Maßnahmen getroffen werden, welche dann im nächsten Schritt hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung beurteilt und priorisiert werden. So können die Untersuchungen zur Maßnahmenwirkung zielgerichteter und effizienter durchgeführt werden.

### 5.2.2 Kurzbeschreibung und Ziele

Das Resilienzscreening setzt sich zusammen aus:

- Festlegung des Kriterienkatalogs und Zuordnung der Kriterien zu drei Dimensionen organisatorisch, wirtschaftlich und physisch/technisch
- Erfassung der Systemresilienz anhand des Kriterienkatalogs
- Identifikation des Handlungsbedarfs
- Identifikation von Resilienzmaßnahmen

Die Erfassung der Systemresilienz findet mittels einer Nutzwertanalyse statt. Unter Berücksichtigung der Vulnerabilitätsanalyse wird ein Resilienzscore bestimmt. Die Festlegung des Resilienzscore erfolgt anhand einer definierten, qualitativen Bewertungsskala. Je nach Zielerreichungsgrad wird einem Kriterium aus dem Kriterienkatalog ein Wert zwischen 0 und 5 zugewiesen. Anhand des Resilienzscore des Systems können mehrere Systeme bezüglich ihrer Resilienz miteinander verglichen werden. Ein Vergleich der Resilienzscore der einzelnen Dimensionen oder Kriterien ermöglicht eine Beurteilung, in welchen Dimensionen oder Kriterien Verbesserungspotenzial besteht.

Aus dem Resilienzscore wird unter Einbezug von Gewichtungen ein Handlungsbedarfs-Index sowohl für die einzelnen Kriterien als auch für die Dimensionen abgeleitet. Der Handlungsbedarfs-Index wird auf einer Skala von 0 bis 100 angegeben, wobei 100 dem höchsten Handlungsbedarf entspricht. Ob der Handlungsbedarf auf Ebene der Kriterien oder auf Ebene der Dimensionen festgelegt werden, obliegt der Entscheidung der Straßeninfrastrukturbetreiber.

Nach der Entscheidung für eine oder mehrere Dimensionen/Kriterien, in welchen der Resilienzscore erhöht werden soll, werden Maßnahmen identifiziert, welche den entsprechenden Dimensionen/Kriterien zugeordnet werden können. Diese Maßnahmen können nun hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung beurteilt und unter Berücksichtigung ihrer Kostenwirksamkeit priorisiert werden.

### 5.2.3 Festlegung Kriterienkatalog

Das aktuelle Forschungsprojekt hat eine Anwendung im Straßeninfrastrukturbereich mit Fokussierung auf alle fünf Resilienzphasen (Kapitel 2.2) zum Ziel. Für die Festlegung des Kriterienkatalogs wird auf bereits bestehende Kriterienkataloge aus anderen Untersuchungen und Forschungsprojekten zurückgegriffen. Für diese Forschungsarbeit wurden die Kriterienkataloge aus dem Neuseeländischen sowie dem Europäischen Forschungsprojekt RESILENS als Grundlage für die Entwicklung des Kriterienkatalogs verwendet.

Dabei wurden die Kriterienkataloge dahingehend überprüft, ob wichtige Kriterien fehlen und der Detaillierungsgrad über alle Kriterien einheitlich ist. Auf dieser Grundlage wurde der Kriterienkatalog angepasst und mit weiteren Kriterien zu allen Resilienzphasen ergänzt und nach den drei Dimensionen organisatorisch, wirtschaftlich und physisch/technisch gegliedert. Für alle Kriterien wurde eine einheitliche Bewertungsskala von 0 bis 5 festgelegt, wobei 5 dem höchsten Zielerreichungsgrad entspricht.

In Tabelle 5-8 ist der entwickelte Kriterienkatalog dargestellt, welcher Kriterien zu allen Resilienzphasen enthält. Der Kriterienkatalog inklusive der Bewertungsskala kann dem Anhang A3 entnommen werden.

Dimension		Kriterien
ORGANISATORISCH	Verantwortlichkeiten	Sind die Verantwortlichkeiten definiert sowie Rollen und Funktionen auch außerhalb des Ereignisfalls zugewiesen?
	Notfallpläne	Existieren Notfallpläne für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis, welche die Bewältigung dieses Ereignisses hinreichend ermöglichen?
	Wiederherstellungspläne	Existieren Wiederherstellungspläne, welche die Bewältigung von disruptiven Ereignissen hinreichend ermöglichen bzw. die Wiederherstellung beschleunigen?
	Interoperabilität	Ist eine Interoperabilität zwischen den Stakeholdern gewährleistet?
	Humanressourcen (Ereignisfall)	In welchem Umfang können Humanressourcen für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis aktiviert werden?
	Humanressourcen (Wiederherstellung)	In welchem Umfang können Humanressourcen für die Phase der Wiederherstellung aktiviert werden?
	Aus-/Weiterbildung	Verfügen die Humanressourcen über eine ausreichende Ausbildung/ausreichende Fähigkeiten, um die ihnen zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen?
	Vergleichbare Ereignisse	Gibt es Erfahrungen aus vergleichbaren disruptiven Ereignissen, welche im Ereignisfall beigezogen werden können?
WIRTSCHAFTLICH	Finanzen (Ereignisfall)	In welchem Umfang können finanzielle Mittel für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis innerhalb einer nützlichen Frist aktiviert werden?
	Finanzen (Wiederherstellung)	In welchem Umfang können finanzielle Mittel für die Phase der Wiederherstellung innerhalb einer nützlichen Frist aktiviert werden?
PHYSISCH/TECHNISCH	Materielle Ressourcen (Ereignisfall)	In welchem Umfang können materielle Ressourcen für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis aktiviert werden?
	Materielle Ressourcen (Wiederherstellung)	In welchem Umfang können materielle Ressourcen für die Phase der Wiederherstellung nach einem disruptiven Ereignis aktiviert werden?
	Kommunikationssysteme	Wie groß ist die Reichweite von Kommunikationssystemen zur Information/Warnung der Betroffenen bei einem disruptiven Ereignis?
	Krisen-/ Notfallzentrum	Existiert ein Krisen-/Notfallzentrum mit ausreichender Ausstattung?
	Technische Einrichtungen	Existieren technische Einrichtungen am Objekt, welche die Funktionalität im Bedarfsfall erhöhen?
	Alternative Routen	Wie viele kritische Objekte verfügen über valable Alternativrouten, mit einer maximalen Reisezeiterhöhung von 30 Minuten?
	Kapazität alternative Routen	Verfügen die alternativen Routen über freie Kapazitäten?
	Redundanzen	Gibt es alternative Verkehrsträger, welche bei einem disruptiven Ereignis als Alternative darstellen können?
	Verkehrsmanagement	Wie viele kritische Objekte verfügen über ein aktives Verkehrsmanagement?
	Schutzmaßnahmen	Wie viele kritische Objekte verfügen über Schutzmaßnahmen gegenüber äußeren Einflüssen?

Tab. 5-8: Kriterienkatalog mit Zuordnung der Kriterien zu den Dimensionen organisatorisch, wirtschaftlich und physisch/technisch

#### 5.2.4 Erfassung der Systemresilienz

Im ersten Schritt des Resilienzscreenings wird die Resilienz des definierten Systems anhand der oben genannten Kriterien erfasst (Nutzwertanalyse). Für jedes Kriterium wird dessen Zielerreichung anhand eines Punktesystems bestimmt. Jedem Kriterium werden anhand einer vordefinierten Bewertungsskala (Anhang A3) zwischen 0 und 5 Punkte – sogenannte Resilienzscore – zugewiesen, wobei 5 dem höchsten Zielerreichungsgrad entspricht. Die Zuteilung der Punkte auf Grundlage der definierten Resilienzskriterien erfolgt durch die Anwender.

Als Resultat erhalten die Anwender

- je einen Resilienzscore pro Kriterium.
- je einen Resilienzscore pro Dimension. Dieser errechnet sich aus dem Mittelwert der Resilienzscore derjenigen Kriterien, welche der entsprechenden Dimension angehören.
- einen Resilienzscore des Gesamtsystems (Streckenabschnitt bzw. Ingenieurbauwerk). Diese errechnet sich aus dem Mittelwert der Resilienzscore aller Kriterien.

Entsprechend ihrer Relevanz für die Systemresilienz können Gewichtungen für die einzelnen Kriterien, aber auch für ganze Dimensionen festgelegt werden. So kann beispielsweise beurteilt werden, in

welcher Dimension das größte Optimierungspotenzial bzw. Handlungsbedarf hinsichtlich einer Erhöhung der Resilienz besteht. Daraus wird der dringendste Handlungsbedarf als Grundlage der späteren Maßnahmenidentifikation und -beurteilung abgeleitet. Mit Hilfe des Resilienzscores des Gesamtsystems können verschiedene Streckenabschnitte bzw. Objekte hinsichtlich ihres Zielerreichungsgrads miteinander verglichen werden. Neben den Möglichkeiten einer quantifizierten Standortanalyse und des Benchmarkings dienen die Resilienzscores vor allem der Identifikation des potenziellen Handlungsbedarfs zur Erhöhung der Systemresilienz.

### 5.2.5 Identifikation des Handlungsbedarfs

Auf Grundlage der Resilienzscores lässt sich der Handlungsbedarf ermitteln. Dafür werden die Resilienzscores unter Einbezug einer durch die Anwender definierten Gewichtung zuerst in einen Resilienz-Defizit-Index (RDI) und anschließend in einen Handlungsbedarfs-Index (HI) überführt. Die Gewichtung gibt den Anwendern die Möglichkeit, einzelnen Kriterien oder Dimensionen einen höheren/geringeren Stellenwert zuzuweisen.

Die Berechnung der Indizes RDI und HI erfolgt anhand folgender Schritte:

1. Umwandlung der Resilienzscores (RS) der Kriterien (Skala von 0 bis 5) in einen RDI (Skala von 0 bis 100) gemäß folgender Formel:

$$\text{RDI} = (5 - \text{RS}) \times \frac{100}{5}$$

2. Der RDI umfasst Werte zwischen 0 und 100, wobei der Wert 100 dem maximalen Resilienz-Defizit entspricht. Je geringer der Wert, desto geringer das Defizit.
3. Für die Herleitung des HI wird den Kriterien, respektive den Dimensionen eine Gewichtung ( $G$ , in %) zugeordnet, mit welchem die RDIs der Kriterien zu multiplizieren sind.

$$\text{HI} = \text{RDI} \times G_{\text{Kriterium}} \times G_{\text{Dimension}}$$

Als Ausgangspunkt wird eine Gleichgewichtung aller Kriterien oder alternativ eine Gleichgewichtung der Dimensionen empfohlen. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Kriterien innerhalb der Dimensionen kann keine gleichzeitige

Gleichgewichtung von Kriterien und Dimensionen erreicht werden:

- Gleichgewichtung der Kriterien: Alle Kriterien haben die gleiche Gewichtung und werden als gleichwertig im Hinblick auf die Resilienz des Gesamtsystems erachtet. Dimensionen, welche eine geringere Anzahl an Kriterien umfassen, erhalten dadurch eine geringere Gewichtung.
- Gleichgewichtung der Dimensionen: Alle Dimensionen haben die gleiche Gewichtung und werden als gleichwertig im Hinblick auf die Resilienz des Gesamtsystems erachtet. Kriterien einer Dimension, welche eine geringere Anzahl an Kriterien umfasst, erhalten dadurch eine höhere Gewichtung.
- Individuelle Gewichtung: Die Kriterien sowie die Dimensionen können individuell gewichtet werden, um einzelnen Dimensionen oder Kriterien einen höheren/geringeren Stellenwert zuzuweisen.<sup>4</sup>

Diese Gewichtungen können durch die Anwender diskutiert und gegebenenfalls angepasst werden. Aus dem Mittelwert der gewichteten HIs der Kriterien einer Dimension lassen sich die HIs für die jeweiligen Dimensionen berechnen.

Als Resultat erhalten die Anwender

- je einen HI pro Kriterium
- je einen HI pro Dimension

Es wird angenommen, dass Handlungsbedarf zur Verbesserung der Systemresilienz für jene Kriterien oder Dimensionen besteht, deren HI entsprechend den oben beschriebenen Berechnungen besonders hoch ausfällt. Ein Wert von 0 bedeutet, dass bezüglich des entsprechenden Kriteriums respektive der entsprechenden Dimension kein Handlungsbedarf besteht.

4. Auf Grundlage

- der HIs für die einzelnen Kriterien oder
- der HIs für die Dimensionen

werden Maßnahmenfelder vorgeschlagen, aus denen sich konkrete Maßnahmen ableiten lassen. Für die Entscheidung darüber, sowie für die Definition eines Grenzwerts wie auch die Zuweisung der Punkte und der Gewichtung wird ein

<sup>4</sup> Es gilt aber zu berücksichtigen, dass die Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen verschiedener Resilienz betrachtungen nur dann gegeben ist, wenn dieselben Gewichtung der Funktionalitäten für die Analysen angesetzt werden.

Vorschlag ausgearbeitet. Der Grenzwert gibt den maximal zulässigen HI an. Liegt der HI oberhalb des Grenzwerts sollten Maßnahmen ergriffen werden.

Es obliegt nun den Anwendern, auf Grundlage dieser Ergebnisse eine Auswahl potenzieller Resilienzmaßnahmen zu treffen. Der Mehrwert eines der Maßnahmenbeurteilung vorgelagerten Resilienzscreenings besteht darin, dass durch die Identifikation des Handlungsbedarfs die gesamte Bandbreite möglicher Resilienzmaßnahmen entsprechend dem ausgewiesenen Handlungsbedarf auf die notwendigsten Wirkungsbereiche zugeschnitten wird. Nachfolgende Prozessschritte können dadurch zielgerichteter und effizienter bearbeitet werden.

### 5.2.6 Identifikation von Resilienzmaßnahmen

Jedem Kriterium und damit jeder Dimension des Handlungsbedarfs wurde ein oder mehrere vordefinierte Maßnahmenfelder zugeordnet. Unter dem Begriff Maßnahmenfeld ist eine Richtungsvorgabe infrage kommender Maßnahmen zu verstehen. Bei der Anwendung der Methodik obliegt es den Straßeninfrastrukturbetreibern/Resilienz-Managern, Maßnahmen auszuwählen und zu konkretisieren, die für das jeweilige Maßnahmenfeld zutreffend und für sein System geeignet sowie umsetzbar sind. Die Liste der Maßnahmenfelder ist nicht abschließend und kann bei Bedarf durch die Anwender erweitert werden. Die für das vorliegende Forschungsprojekt erstellte Kreuztabelle ist in Anhang A4 hinterlegt.

Am Ende dieses Vorgehensschrittes erhalten die Anwender eine Auslegeordnung möglicher Resilienzmaßnahmen über alle Resilienzphasen. Diese sind den Maßnahmenfeldern des vorgängig identifizierten Handlungsbedarfs zugeordnet und geben einen Hinweis, welche Maßnahmen im nächsten Schritt der Maßnahmenbeurteilung (Kapitel 5.3) auf ihre Resilienzwirkung hin untersucht werden sollen.

## 5.3 Maßnahmenbeurteilung

### 5.3.1 Ziel der Maßnahmenbeurteilung

Das Ziel der Maßnahmenbeurteilung besteht darin, die auf Grundlage des Resilienzscreenings identifizierten potenziellen Maßnahmen hinsichtlich ihrer Resilienzwirkung zu beurteilen. Die Resilienzwirkung einer Maßnahme lässt sich anhand ihres Ein-

flusses auf den Verlauf der Resilienzkurve (Kapitel 2.2) ermitteln.

Die Maßnahmenbeurteilung beinhaltet die folgenden Teilziele:

1. Festlegung der Systemfunktionalitäten und
2. Ermittlung der Resilienzwirkung jeder Maßnahme aufgrund ihres Einflusses auf die Funktionalität(en) des Systems respektive auf die Eintrittshäufigkeit disruptiver Ereignisse.

Wie auch das Resilienzscreening findet die Maßnahmenbeurteilung mittels einer Nutzwertanalyse statt. Sowohl für das Gesamtsystem als auch für die einzelnen Zielgrößen wird die Resilienzwirkung jeder potenziellen Maßnahme auf das kritische Objekt bzw. den kritischen Streckenabschnitt ermittelt.

### 5.3.2 Festlegung der Systemfunktionalität(en)

Die Systemresilienz kann anhand einer oder mehrerer Systemfunktionalitäten definiert werden, die jeweils auf Basis einer Funktionalitätsfunktion (= Resilienzkurve) über die Zeit dargestellt werden. Der Resilienzverlust eines Systems ist somit ermittelbar. Er entspricht der Fläche der Funktionalitätsreduktion über die Zeit (Integral bei kontinuierlichem Kurvenverlauf/Summe bei diskretem Verlauf).

Als Systemfunktionalitäten werden Zielgrößen bezeichnet, anhand derer ein System, in Anlehnung an die Funktionalitätskurve, auf seine Funktionalität hin bewertet werden kann. Die Ausgestaltung eines Ziel- und Indikatorensystems ist abhängig von der vorangegangenen Definition der übergeordneten Anforderungen und der Systemgrenzen für das Resilienzmanagement. Die Festlegung der Systemfunktionalitäten stützt sich im vorliegenden Forschungsbericht im Wesentlichen auf das Indikatorensystem des vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) herausgegebenen Bundesverkehrswegeplans 2030, das mit der Funktionalität gesamtwirtschaftliche Auswirkungen ergänzt wurde (siehe Tabelle 5-9). Die Gewichtung der einzelnen Funktionalitäten sowie der Dimensionen erfolgt auf Grundlage von Erfahrungswerten der Forschungsnehmer aus zahlreichen Bewertungen von Verkehrsinfrastrukturprojekten. Die Anwender können bei Bedarf die Gewichtungen nach seinen Bedürfnissen aber auch anpassen.

Zielgröße	Funktionalität (Teilzielgröße)	Indikator	Beschreibung	Gewichtung
WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE (70 %)	Reise- und Transportzeiten	Veränderung der Reise- und Transportzeiten	Abhängig von Länge, der zulässigen Geschwindigkeit und der Trassierung der Routen im Netz	35 %
	Kapazität im Netz	Veränderung der Kapazität	Abhängig vom Ausbaustandard und Anzahl der Routen im Netz	10 %
	Betriebskosten	Veränderung der Betriebsgrund- und Energiekosten im Personen- und Güterverkehr	Abhängig von Länge, Längsneigungen und Reisezeiten der Routen im Netz	15 %
	Innerörtliche Trennwirkung	Veränderung der Wartezeit Fußgänger zur Querung von Straßen	Abhängig von Routenverlauf durch Ortschaften im Netz	5 %
	Wertschöpfungseffekte	Veränderung der Wertschöpfung/Beschäftigung	Abhängig von potenziellen Produktionsausfällen und Arbeitsplatzeffekten	35 %
VERKEHRS-SICHERHEIT (20 %)	Unfallkosten	Veränderung des Unfallgeschehens (Personen- und Sachschäden)	Abhängig von Sicherheitsniveau und Länge der Routen im Netz	100 %
UMWELT (10 %)	Luftschadstoffemissionen und Treibhausgasemissionen	Veränderung der Luftschadstoffemissionen und Treibhausgasemissionen	Abhängig von Länge und der zulässigen Geschwindigkeit der Routen im Netz	40 %
	Lärmbelastung	Veränderung der Geräuschbelastung innerorts	Abhängig von der Lage der Routen im Netz	30 %
	Beeinträchtigung durch das Bauwerk	Einträge ins Gewässer, umweltfreundliche Baustoffe (Brand), Lage des Objekts (Beeinträchtigung von Wasserschutz-zonen, Naturschutzgebieten)	Abhängig von Maßnahme – Einfluss netzweit, ereignisunabhängig	20 %
	Landschafts- und Ortsbild	Eingriff in das Landschafts- und Ortsbild (z. B. Tunnelportale)	Abhängig von Maßnahme – Einfluss netzweit, ereignisunabhängig	10 %

Tab. 5-9: Ziel- und Indikatorensystem zur Erfassung der Resilienz Wirkung

### 5.3.3 Erfassung der Resilienz Wirkung

Die Funktionalität des vulnerablen Objekts wird durch die Gesamtheit der berücksichtigten Funktionalitäten beschrieben. Um die Resilienz Wirkung einer Maßnahme auf das vulnerable Objekt zu beurteilen, sind für jede Maßnahme die folgenden Abschätzungen vorzunehmen:

- Veränderung der Eintrittshäufigkeit einer Gefährdung durch die Maßnahme; gesondert zu bestimmen je Gefährdung (hydrologische, gravitative Gefährdung, etc.)
- Veränderung der Dauer der Betriebsunterbrechung bzw. der Funktionalitätseinbuße durch die Maßnahme; gesondert zu bestimmen je Gefährdung (hydrologische, gravitative Gefährdung, etc.)
- Veränderung des Ausmaßes der Funktionalitätseinbuße durch die Maßnahme; gesondert zu bestimmen je Funktionalität (Reisezeit, Betriebskosten, etc.)

### Einfluss auf die Eintrittshäufigkeit

Objekte sind in der Regel mehreren Gefährdungen gleichzeitig ausgesetzt (Kapitel 5.1). Deshalb soll je Maßnahme überprüft werden, wie diese die Eintrittshäufigkeit von Gefährdungen verändert. Eine Maßnahme, welche die Eintrittshäufigkeit mehrerer Gefährdungen gleichzeitig zu reduzieren vermag, ist dabei besonders wirksam. Es ist jedoch auch denkbar, dass eine Maßnahme zwar häufigkeitsmindernd gegenüber einer Gefährdung wirkt, jedoch neutrale oder gar negative Auswirkungen auf die Eintrittshäufigkeit weiterer Gefährdungen hat. Entsprechend gilt es für die Anwender für jede Maßnahme die Wirkung gegenüber den einzelnen Gefährdungen abzuwägen. Grundsätzlich tangieren organisatorische und finanzielle Maßnahmen meist eine Vielzahl an Gefährdungsszenarien; technische Maßnahmen sind vielfach eher auf spezifische Gefährdungsszenarien ausgelegt.

Die Bewertung findet anhand der in Tabelle 5-10 dargestellten Bewertungsskala je Gefährdung statt.

Wie häufig wird das Auftreten der Gefährdung erwartet?	Eintrittshäufigkeit [1/Jahr]
Mehr als 100 Ereignisse pro Jahr	> 100
In der Größenordnung von 100 Ereignissen pro Jahr	100
In der Größenordnung von 10 Ereignissen pro Jahr	10
In der Größenordnung von 1 Ereignis pro Jahr	1
In der Größenordnung von 1 Ereignis in 10 Jahren	0.1
In der Größenordnung von 1 Ereignis in 100 Jahren	0.01
Weniger als Ereignis in 100 Jahren	< 0.01

Tab. 5-10: Bewertungsskala zur Abschätzung der Eintrittshäufigkeit E einer Gefährdung

		Eintrittshäufigkeit nach Maßnahme						
		>100	100	10	1	0.1	0.01	< 0.01
Eintrittshäufigkeit vor Maßnahme	> 100	0	3	3	3	3	3	3
	100	-3	0	3	3	3	3	3
	10	-3	-3	0	2	2	2	2
	1	-3	-3	-2	0	2	2	2
	0.1	-3	-3	-2	-2	0	1	1
	0.01	-3	-3	-2	-2	-1	0	1
	< 0.01	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0

Tab. 5-11: Tabelle zur Umwandlung der Werte von ΔE in einen Wert des Wertebereichs von -3 bis +3, um eine Basis für den Vergleich mit ΔF zu schaffen.

Die Abschätzung der Kennwerte wird im einfachsten Fall durch die Anwender vorgenommen.

Relevant für die Abschätzung der Maßnahmenwirkung ist die durch die Maßnahme herbeigeführte (absolute) Veränderung der Häufigkeit des Ereignisses:

$$\Delta E = E_{\text{vorher}} - E_{\text{nachher}}$$

Die Abschätzung der Eintrittshäufigkeit ohne Maßnahme wurde bereits in der Vulnerabilitätsanalyse vorgenommen. Den Werten für ΔE werden gemäß Tabelle 5-11 Werte zwischen -3 bis +3 zugeordnet. Negative Werte bedeuten, dass die Maßnahme einen negativen Einfluss auf die Eintrittshäufigkeit der Gefährdung hat, d. h. diese erhöht. Hat eine Maßnahme keinen oder einen kaum maßgeblichen Einfluss ergibt sich eine Differenz von 0.

### Einfluss auf die Dauer der Betriebsunterbrechung

Je Gefährdung ist die Veränderung der erwarteten Dauer der Betriebsunterbrechung nach Umsetzung

Wie lange bleibt die Strecke im Ereignisfall unterbrochen?	Punkte
mehr als 6 Monate	5
einige Wochen bis Monate	4
einige Tage bis Wochen	3
einige Stunden bis Tage	2
einige Stunden	1
weniger als eine Stunde	0

Tab. 5-12: Bewertungsskala zur Abschätzung des Betriebsunterbruchs. Es findet je eine Bewertung pro Gefährdung statt.

		Betriebsunterbrechung nach Maßnahme					
		5	4	3	2	1	0
Betriebsunterbruch vor Maßnahme	5	0	1	2	2	3	3
	4	-1	0	1	2	2	3
	3	-2	-1	0	1	2	2
	2	-2	-2	-1	0	1	2
	1	-3	-2	-2	-1	0	1
	0	-3	-3	-2	-2	-1	0

Tab. 5-13: Tabelle zur Umwandlung der Werte von Δt in einen Wert des Wertebereichs von -3 bis +3, um eine Basis für den Vergleich mit ΔF zu schaffen.

einer Maßnahme abzuschätzen. Die erwartete Dauer der Betriebsunterbrechung ist abhängig von der Gefährdung, da für die Dauer der Betriebsunterbrechung die Ursache für die Nichtverfügbarkeit relevant ist, z. B. führt die Sperrung eines Tunnels infolge eines Autounfalls zu geringeren Ausfallzeiten als die Nichtverfügbarkeit infolge eines Tunnelbrands. Im Gegensatz zum Funktionalitätsverlust kann die Bewertung der Dauer der Betriebsunterbrechung funktionalitätsunabhängig vorgenommen werden, da die Funktionalitäten (z. B. Reisezeiten, Betriebskosten) alle gleichermaßen dann wiederhergestellt sind, wenn das vulnerable Objekt wieder zur Verfügung steht.

Die Bewertung erfolgt anhand der in Tabelle 5-12 dargestellten Bewertungsskala je Gefährdung.

Die Veränderung der Dauer der Betriebsunterbrechung Δt durch die Maßnahme berechnet sich als Differenz aus der Dauer der Betriebsunterbrechung vor bzw. ohne und nach bzw. mit Umsetzung der Maßnahme:

$$\Delta t = t_{\text{vorher}} - t_{\text{nachher}}$$

Die Abschätzung der Dauer der Betriebsunterbrechung vor der Maßnahme wurde bereits in der Vulnerabilitätsanalyse vorgenommen. Δt kann Werte zwischen -5 und +5 annehmen. Negative Werte bedeuten, dass die Maßnahme einen negativen Ein-

	Indikator	Beschreibung	Bewertungsskala: $\Delta F$
Wertschöpfungseffekte	Gesamtwirtschaftliche Kosten	Abhängig von potenziellen Produktionsausfällen und Arbeitsplatzeffekten	<p>3 Punkte Die Maßnahme verhindert die ausfallbedingte Nicht-Erreichbarkeit von Wirtschaftsstandorten mit mehr als 500 Mitarbeitenden</p> <p>2 Punkte Die Maßnahme verhindert die ausfallbedingte Nicht-Erreichbarkeit von Wirtschaftsstandorten mit 300 – 500 Mitarbeitenden</p> <p>1 Punkt Die Maßnahme reduziert die ausfallbedingte Nicht-Erreichbarkeit von Wirtschaftsstandorten mit 100 – 300 Mitarbeitenden</p> <p>0 Punkte Die Maßnahme reduziert bzw. erhöht die ausfallbedingte Nicht-Erreichbarkeit von Wirtschaftsstandorten mit weniger als 100 Mitarbeitenden</p> <p>-1 Punkt Die Maßnahme erhöht die ausfallbedingte Nicht-Erreichbarkeit von Wirtschaftsstandorten mit 100 – 300 Mitarbeitenden</p> <p>-2 Punkte Die Maßnahme bewirkt die ausfallbedingte Nicht-Erreichbarkeit von Wirtschaftsstandorten mit 300 – 500 Mitarbeitenden</p> <p>-3 Punkte Die Maßnahme verhindert die ausfallbedingte Nicht-Erreichbarkeit von Wirtschaftsstandorten mit mehr als 500 Mitarbeitenden</p>

Tab. 5-14: Bewertungsskala zur Abschätzung des Einflusses einer Maßnahme auf die Funktionalität am Beispiel der Systemfunktionalität Wertschöpfungseffekte

fluss auf die Dauer der Betriebsunterbrechung hat, d. h. diese erhöht. Hat eine Maßnahme keinen oder einen kaum maßgeblichen Einfluss ergibt sich eine Differenz von 0. Den Werten für  $\Delta t$  werden gemäß Tabelle 5-13 Werte aus dem Wertebereich -3 bis +3 zugeordnet.

**Veränderung des Funktionalitätsverlusts**

Für jede Maßnahme wird beurteilt, ob und wenn ja, wie stark diese den Funktionalitätsabfall beeinflusst. Diese Beurteilung wird separat für jede Funktionalität (Reisezeit, Betriebskosten, etc.) vorgenommen. Die Veränderung des Funktionalitätsverlusts  $\Delta F$  wird anhand einer Bewertungsskala quantifiziert. Die Bewertungsskala ist absolut und reicht von -3 bis +3, wobei negative Werte einen negativen Einfluss der Maßnahme auf den Indikator darstellen. Hat eine Maßnahme keinen oder einen kaum relevanten Einfluss, erhält sie den Wert 0 in der Bewertungsskala.

Die Veränderung des Funktionalitätsverlusts ist gefährdungsunabhängig, da bei der Beurteilung von einer vorliegenden Nichtverfügbarkeit des vulnerablen Objekts ausgegangen wird, d. h. es wird z. B. beurteilt welchen Einfluss der Ausbau einer Alternativroute auf den Funktionalitätsverlust hat, falls es zu einem Ausfall des vulnerablen Objekts kommt.<sup>5</sup>

Tabelle 5-14 zeigt exemplarisch die Bewertungsskala für den Einfluss einer Maßnahme auf die Systemfunktionalität Wertschöpfungskette. Die vollständige Bewertungsskala für alle Systemfunktionalitäten findet sich in Anhang A5. Obwohl sowohl die Bewertungsskala als auch die Definition der Funktionalitäten eine quantitative Beurteilung ermöglichen, ist in erster Linie eine qualitative Abschätzung der Auswirkungen vorgesehen. Dabei geht es nicht in erster Linie darum, das System detailliert zu quantifizieren, sondern vielmehr für jede einzelne Maßnahme und jede Funktionalität den Einfluss der Maßnahme basierend auf dem Wissen respektive den Abschätzungen der Anwender zu beurteilen.

**Resilienzwirkung der Maßnahme auf das vulnerable Objekt**

Um aus der Beurteilung von  $\Delta E$ ,  $\Delta t$  und  $\Delta F$  auf die Resilienzwirkung der einzelnen Maßnahmen auf das vulnerable Objekt schließen zu können, wird wie folgt vorgegangen:

1. Gewichtung der einzelnen Funktionalitäten j entsprechend ihrer individuellen Relevanz für die Resilienz des betrachteten Streckenabschnitts respektive Objekts. In Tabelle 5-9 ist bereits ein Vorschlag für eine Gewichtung der Funktionalitäten vorhanden. Die Methode sieht aber vor,

<sup>5</sup> Gewisse Maßnahmen wirken sich lediglich auf die Eintrittshäufigkeit eines Ereignisses und somit auf die Häufigkeit einer Nichtverfügbarkeit des Objekts aus (z. B. Windschutzwände auf Brücken). Für solche Maßnahmen sind für die Bewertung von  $\Delta F$  0 Punkte zu vergeben.

dass die Anwender bei Bedarf andere Gewichtungen vornehmen können.<sup>6</sup>

2. Bildung der gewichteten Summe von  $\Delta F_{\text{ges}}$  über alle Funktionalitäten j:

$$\Delta F_{\text{ges}} = \sum_{j=1}^m g_j \times \Delta F_j$$

j: Index der Funktionalität

$\Delta F_{\text{ges}}$ : Gewichtete Summe der Veränderungen des Funktionalitätsverlusts durch die untersuchte Maßnahme

$g_j$ : Gewichtungsfaktor der Funktionalität j

$\Delta F_j$ : Veränderungen des Verlusts der Funktionalität j durch die untersuchte Maßnahme

3. Bildung des Mittelwerts  $\Delta E_{\text{ges}}$  über alle Gefährdungen i:

$$\Delta E_{\text{ges}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta E_i}{n}$$

i: Index der Gefährdung

n: Anzahl der Gefährdungen

$\Delta E_{\text{ges}}$ : Mittelwert der Häufigkeitsveränderungen durch die untersuchte Maßnahme

$\Delta E_i$ : Häufigkeitsveränderung der Gefährdung i durch die untersuchte Maßnahme

4. Berechnung des Mittelwerts  $\Delta t_{\text{ges}}$  über alle Gefährdungen i:

$$\Delta t_{\text{ges}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n}$$

i: Index der Gefährdung

n: Anzahl der Gefährdungen

$\Delta t_{\text{ges}}$ : Mittelwert der Veränderungen der Betriebsunterbrechungen durch die untersuchte Maßnahme

$\Delta t_i$ : Veränderung der Betriebsunterbrechung bei Eintritt der Gefährdung i durch die untersuchte Maßnahme

5. Berechnung des Resilienzwerths R der untersuchten Maßnahme als Summe aus  $\Delta E_{\text{ges}}$ ,  $\Delta t_{\text{ges}}$  und  $\Delta F_{\text{ges}}$ :

$$R = \Delta E_{\text{ges}} + \Delta t_{\text{ges}} + \Delta F_{\text{ges}}$$

R: Resilienzwert der untersuchten Maßnahme

## 5.4 Resilienzoptimierung

### 5.4.1 Ziele der Resilienzoptimierung

Das Ziel der Resilienzoptimierung besteht darin, auf Grundlage der ermittelten Resilienzwirkung und unter Berücksichtigung einer Kosten-Wirksamkeits-Betrachtung der einzelnen Maßnahmen eine für die Resilienz des Systems optimale Rangliste der priorisierten Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen zu erstellen. Diese priorisierte Rangliste dient dem Entscheidungsträger als Handlungshilfe bei der Auswahl der effizientesten Resilienzmaßnahmen.

Die Teilziele dieses Prozessschritts sind:

- Erfassung der Maßnahmenkosten
- Erstellung der priorisierten Rangliste an Maßnahmen und/oder Maßnahmenkombinationen

### 5.4.2 Erfassung der Maßnahmenkosten

Das Resultat aus dem Resilienzscreening ist eine Auslegeordnung von Maßnahmen, die im identifizierten Handlungsbedarf zu einer Erhöhung der Systemresilienz beitragen. Diese Maßnahmen wurden im Rahmen der Maßnahmenbeurteilung hinsichtlich ihrer Resilienzwirkung untersucht. Ziel dieses Prozessschrittes ist nun die Abschätzung der Maßnahmenkosten.

Bei der Abschätzung und Erfassung der Maßnahmenkosten werden nicht nur die initialen Investitionskosten, sondern auch die im Nachgang zu erwartenden Lebenszykluskosten (Betriebs- und diskontierte Jahreskosten z. B. des baulichen Unterhalts von technischen Einrichtungen) berücksichtigt.

Die Straßeninfrastrukturbetreiber müssen entweder aufgrund von eigenen Erfahrungswerten, durch eine empirische Analyse von dokumentierten Maßnahmenkosten oder durch (extern durchgeführte) Vorstudien eine Kostenaufstellung für jede Maßnahme durchführen und dokumentieren. Dabei ist zu vermerken, welche Genauigkeit die Kostenschätzung hat und es ist anzustreben, dass bei allen betrachteten Maßnahmen eine vergleichbare Genauigkeit angestrebt wird.

Die Wirkung von Maßnahmen kann über die alleinige Resilienzwirkung hinausgehen. Beispielsweise

<sup>6</sup> Es gilt aber zu berücksichtigen, dass die Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen verschiedener Resilienz-betrachtungen nur dann gegeben ist, wenn dieselben Gewichtung der Funktionalitäten für die Analysen angesetzt werden.



kann durch den Bau einer zusätzlichen Straße die Redundanz und somit die Resilienz des Systems erhöht werden. Gleichzeitig erzielt der Bau aber auch den Nebeneffekt, dass dadurch z. B. manche Ortschaften durch die neue/zusätzliche Erschließung eine höhere wirtschaftliche und gesellschaftliche Attraktivität erlangen. Bei einer genauen Bewertung müsste demzufolge nur ein Teil der Maßnahmenkosten der Resilienzwirkung gegenübergestellt werden (Entwicklung eines Kostenschlüssels) respektive die Maßnahme umfassend – und nicht allein bezüglich Resilienz – bewertet werden (z. B. auf Basis der Bewertungsmethodik des BVWP 2030).

#### 5.4.3 Priorisierung der Resilienzmaßnahmen

Wegen den oben genannten, möglichen Nebeneffekten findet die Priorisierung der Resilienzmaßnahmen in der vorliegenden Methodik anhand mehrerer Kriterien statt, die unter gemeinsamer Betrachtung als Grundlage und Hilfestellung für die Entscheidungsfindung der Straßeninfrastrukturbetreiber zu verstehen sind:

1. Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis (Bewertung der Maßnahmen)
2. Zeitlicher Realisierungshorizont (Bis wann ist mit einer Umsetzung der Maßnahme realistischer Weise zu rechnen?)
3. Realisierungswahrscheinlichkeit (Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Maßnahmenvorschlag tatsächlich zu einer Realisierung gelangt?)
4. Berücksichtigung von Maßnahmenabhängigkeiten

#### Zu 1. Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis

Aus den Untersuchungen aus FE 89.0320/2016 zum Stand der Forschung für die Bewertung von Resilienzmaßnahmen [18] wurden verschiedene, in der Praxis des Straßeninfrastrukturmanagements bereits etablierten Bewertungsmethoden vergleichend evaluiert. Der methodische Lösungsansatz des vorliegenden Forschungsprojekts sieht eine anwenderfreundliche Methode zur Gegenüberstellung der Resilienzwirkung von Maßnahmen und ihren geschätzten Lebenszykluskosten vor. Dafür wird die Bewertungsmethode der Kosten-Wirksamkeits-Analyse verwendet. Bei der Anwendung der Kosten-Wirksamkeits-Analyse wird unter Einbezug der

Investitions-, Betriebs- und (diskontierten) Jahreskosten einer Maßnahme ein Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis berechnet, welches die Kosten in Verhältnis zum erwarteten Nutzen setzt und als Effizienzmaß geeignet ist (Wieviel Nutzenpunkte erhält man je eingesetztem Euro?). Dieser Ansatz ermöglicht eine Maßnahmenpriorisierung unter Einbezug der Maßnahmenkosten.

#### Zu 2. Zeitlicher Realisierungshorizont

Eine Ermittlung oder Abschätzung des zeitlichen Realisierungshorizonts ist für die Maßnahmenpriorisierung entscheidend, weil dadurch eine den Rahmenbedingungen und Realisierungsmöglichkeiten angepasste Auswahl an kurz-, mittel- und langfristig realisierbaren Maßnahmen getroffen werden kann. Beispiel: Wenn der Ausbau einer Bundesstraße nicht in den Ausbaugesetzen zum aktuellen Bundesverkehrswegeplan enthalten ist, kann eine Aufnahme erst wieder mit der Erstellung des nächsten BVWP erfolgen. Dies findet in der Regel alle 10 - 15 Jahre statt. Bis dahin können aber bereits kurzfristig realisierbare Maßnahmen zur Erhöhung der Systemresilienz umgesetzt werden, z. B. Erstellung von Notfallplänen, Vorhalten von Ressourcen.

#### Zu 3. Realisierungswahrscheinlichkeit

Insbesondere für große, bauliche Maßnahmen bestehen häufig zahlreiche Hürden, bis (wenn überhaupt) eine Realisierung der Maßnahme tatsächlich stattfindet. Die Wahrscheinlichkeit für eine Realisierung wird dabei durch aufwändige Planungsprozesse, Prüfverfahren und/oder Einsprachen beeinflusst. Eine Abschätzung der Realisierungswahrscheinlichkeit durch Experten hilft dabei, den Stellenwert von potenziell resilienten Maßnahmen bei der Priorisierung von Maßnahmen zu berücksichtigen.

#### Zu 4. Gegenseitige Abhängigkeit von Maßnahmen

Für die Priorisierung sind die Maßnahmen hinsichtlich ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten zu überprüfen:

1. In einem ersten Schritt sind die Varianten miteinander zu vergleichen, welche sich gegenseitig ausschließen (Variantenvergleich). Die Bestvariante ist auszuwählen. Maßnahmen schließen sich gegenseitig aus, wenn z. B. unterschiedliche Varianten einer neuen Straße oder von Notfallplänen betrachtet und beurteilt werden.

2. Anschließend können die verbleibenden Maßnahmen priorisiert werden. Wird dabei festgestellt, dass Maßnahmen in Kombination Synergiewirkungen bezüglich des Nutzens oder der Kosten aufweisen, sind diese als Maßnahmenkombination nochmals separat zu bewerten.

Die abschließende Priorisierung der Resilienzmaßnahmen beinhaltet die Erstellung einer Rangliste durch die Anwender. Am besten bewertet sind diejenigen Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen, die nach einer sorgfältigen Abwägung der oben beschriebenen Aspekte im Hinblick auf eine Erhöhung der Systemresilienz die größte Wirkung erzielen.

Der hier beschriebene Lösungsansatz umfasst eine Priorisierung von Einzelmaßnahmen, welche subsektiv oder in Kombination ausgelöst werden können. Im einfachsten Fall erfolgt die Kombination von Maßnahmen durch eine Auswahl durch die Straßeninfrastrukturbetreiber. Optional und als zukünftige Perspektive bei der verstärkten Verwendung von IT-Tools zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur ließen sich durch die Implementierung von Optimierungsalgorithmen aber auch optimale Maßnahmenkombinationen rechnerisch und automatisiert ermitteln.

## 6 Konzept zur Übertragbarkeit der Methodik auf Schiene und Wasserstraße

Die im Zuge des Projektes weiterentwickelte Methodik zielt auf die Bewertung der Resilienz von Straßeninfrastrukturen. Grundsätzlich gilt jedoch für den gesamten Verkehrssektor, dass Infrastrukturen resilient gegenüber möglichen Gefährdungen sein sollten. Neben der Straße rücken daher vor allem auch die beiden Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße in den Fokus. Vor diesem Hintergrund wird nachfolgend – auf der Basis eines Anwenderdialogs mit Experten der beiden Verkehrsträger – ein erstes Konzept für eine mögliche Übertragung der entwickelten Methodik skizziert. Dazu werden zunächst allgemeine Besonderheiten der beiden Verkehrsträger dargestellt. Anschließend werden zu berücksichtigende Aspekte der beiden Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße für die einzelnen Schritte der Methodik aus inhaltlicher und prozessualer Sicht herausgestellt.

### 6.1 Besonderheiten der Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße

Im Unterschied zur Straße sind die beiden Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße hinsichtlich der Zuständigkeit für Planung, Bau und Betrieb der Infrastruktur zentraler aufgestellt. Für die Schiene übernehmen diese Aufgaben die Eisenbahninfrastrukturunternehmen unter der Aufsicht des Eisenbahn-Bundesamtes während für die Wasserstraße die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, die nachgeordneten Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter sowie die Wasserstraßen-Neubauämter zuständig sind.

Die Abschnitte und Strecken des Schienen- und Wasserstraßennetz sind wie auch beim Straßennetz in verschiedene Kategorien entsprechend ihrer funktionalen Bedeutung unterteilt. Insofern sind die Netze grundsätzlich vergleichbar, allerdings stehen im Wasserstraßennetz kaum und insbesondere im Süden Deutschlands (Rhein-Main-Donau-Kanal bis zum Schwarzen Meer) sogar keine Alternativrouten zur Verfügung, die bei einer vollständigen Sperrung genutzt werden könnten. Gleichzeitig ereignen sich bei der Wasserstraße nur wenige Ereignisse, die zu einem vollständigen Ausfall einer Wasserstraße führen. Für viele derartiger Ereignisse liegen darüber hinaus bereits Pläne vor, um (Teil-)Funktionalitäten rasch wieder bereitstellen zu können. So werden beispielsweise an Schleusen Ersatztore vorgehalten, um einen raschen Austausch bewerkstelligen zu können.

Eine weitere Besonderheit des Wasserstraßennetzes besteht darin, dass der Neubau von Streckenabschnitten und Infrastrukturen einen deutlich längeren zeitlichen Vorlauf benötigt als beim Verkehrsträger Straße.

Letztlich übernimmt die Wasserstraße neben ihrer verkehrlichen Funktion auch noch weitere Aufgaben im Bereich der Energieerzeugung, des Hochwasser- und Küstenschutzes sowie weitere Ökosystemleistungen.

### 6.2 Einbettung in bestehende Managementsysteme

Sowohl bei der Wasserstraße als auch der Schiene werden Infrastrukturen bereits im Zuge unterschiedlicher Managementsysteme hinsichtlich ihrer Resilienz betrachtet. So werden entsprechende Aspekte

beim Betrieb im Zuge des Bauwerksmanagements, bei der Erhaltung und bei der Planung neuer bzw. zu ersetzender Infrastrukturen bereits berücksichtigt. Eine methodisch geschlossene Vorgehensweise liegt jedoch bislang nicht vor. So fehlen für die Wasserstraße beispielsweise Zielgrößen zur Bewertung der Resilienz für die verschiedenen Funktionalitäten der Infrastruktur.

Die Managementsysteme sind datenseitig für Wasserstraße und Schiene über etablierte Vorgehensweisen zur Zustandsbewertung von Bauwerken nach Einschätzung der Experten gut versorgt und liegen bundesweit vor.

Die Einbettung der Methodik zur Bewertung der Resilienz von Infrastrukturen der Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße in bestehende Managementsystem ist daher grundsätzlich realisierbar, zumal die Zuständigkeiten – wie im vorangegangenen Kapitel erläutert – stärker gebündelt sind als für die Straße. Aufgrund dieser Struktur besteht ein guter Überblick über Strecken- und Netzabhängigkeiten, sodass eine gute Grundlage für diesbezügliche Einschätzungen im Rahmen des Resilienzscreenings und der Maßnahmenbeurteilung vorliegt.

Da noch keine vollständigen Methoden zur Resilienzbewertung bei Schiene und Wasserstraße vorliegen, scheint weiterer Bedarf nach einem entsprechenden Verfahren zu bestehen.

### 6.3 Vulnerabilitätsanalyse

Im Zusammenhang mit Vulnerabilitätsanalysen für die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße ist zu prüfen, ob hinsichtlich der zu betrachtenden Gefährdungen Unterschiede zur Straße bestehen. Aus Sicht der Experten sind beispielsweise im Bereich der Naturereignisse für die Wasserstraße vor allem Hoch- und Niedrigwasser sowie für den Verkehrsträger Schiene Stürme, Böschungsschäden, Hitze und Blitzeinschläge relevant. Gleichzeitig sind nur ca. 5 % der relevanten Ereignisse im Schienenverkehr auf Naturereignisse zurückzuführen, sodass technisches Versagen und menschliche Eingriffe von besonderer Bedeutung sind. Cyberattacken spielen beispielsweise für die Schiene eine relevante Rolle, während sie für die Wasserstraße von untergeordneter Bedeutung sind.

Im Zuge einer möglichen Anwendung der hier weiterentwickelten Methodik für Streckenabschnitte

bzw. deren Objekte der Schiene und Wasserstraße sollten daher vorab vertiefende Untersuchungen zu den relevanten Gefährdungen der beiden Verkehrsträger durchgeführt und entsprechende Anpassungen vorgenommen werden. Grundsätzlich erscheint das entwickelte Verfahren zur Einschätzung der Gefährdung jedoch auf die beiden Verkehrsträger übertragbar.

Die Merkmale zur Beurteilung der Kritikalität von Streckenabschnitten bzw. Objekten des Straßennetzes lassen sich weitgehend auf die beiden Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße übertragen. Hinsichtlich der Bemessungsgrößen sind jedoch Anpassungen vorzunehmen. So sollte beispielsweise das Merkmal Verkehrsbelastung im Schienenverkehr durch die Anzahl Züge im Schienenverkehr und die Anzahl der Schiffe für die Wasserstraße bewertet werden. Ähnlich müssen auch für die übrigen vier Merkmale sinnvolle Bemessungsgrößen benannt werden. Letztlich sollten zusammen mit Experten der beiden Verkehrsträger sinnvolle Klassengrenzen für die gewählte 5-Punkte-Skala pro Merkmal definiert werden.

Darüber hinaus weisen die Infrastrukturen der Schiene und Wasserstraße im Gegensatz zur Straße mehr bewegliche Elemente (Weichen, Schleusen, Umschlagstellen, etc.) auf. Grundsätzlich sind bewegliche Teile der Infrastruktur besonders vulnerabel, da sie aufgrund ihrer Beweglichkeit weniger massiv ausgeführt werden können. Gleichzeitig sind diese beweglichen Elemente oftmals kritisch, da sie für die Nutzbarkeit der gesamten damit in Verbindung stehenden Verkehrsinfrastruktur essenziell sind. Darüber hinaus, weisen aber auch unbewegliche Elemente wie beispielsweise Spundwände und Betriebsleitzentralen eine hohe Vulnerabilität und Kritikalität auf. Bei der möglichen Anwendung der Methodik auf Infrastrukturen der Wasserstraße und Schiene sollte diesen Spezifika der beiden Verkehrsträger Rechnung getragen werden.

### 6.4 Resilienzscreening

Der im Projekt angepasste und erweiterte Kriterienkatalog zum Resilienzscreening erscheint grundsätzlich auch für die Bewertung der Resilienz von Streckenabschnitten bzw. deren Objekte der Schiene und Wasserstraße geeignet. Die im Zuge der Frage zu technischen Einrichtungen genannten Beispiele sind insbesondere für die Wasserstraße

gegen geeignete Beispiele (zum Beispiel Vorhandensein von Ausweichstellen) zu ersetzen. Darüber hinaus können die Fragen 16 und 17 zu alternativen Routen (Tabelle 5-8) insbesondere für den Verkehrsträger Wasserstraße entfallen, da – wie im Kapitel 6.1 dargestellt – hier zumeist keine alternativen Routen bestehen.

Die Kreuztabelle zur Maßnahmenidentifikation erscheint - mit wenigen Ausnahmen beispielsweise zu Maßnahmen in Tunneln, die für die Wasserstraße nicht relevant sind – ebenfalls grundsätzlich geeignet, um geeignete Maßnahmen für die Schiene und Wasserstraße bestimmen zu können. Eine Anpassung an die Spezifika der beiden Verkehrsträger ist aber sinnvoll bzw. geboten. Für die Wasserstraße sind aus Sicht der Experten beispielsweise Maßnahmen besonders relevant, die im Bereich der Verkehrssteuerung und Verkehrslenkung und bei Ausweichstellen ansetzen oder das Vorhalten von Ressourcen zur schnellen Wiederherstellung von (Teil-)Funktionalitäten (Ersatzbauteile, Havariekommandos, etc.) beinhalten. Da die Wasserstraße einerseits auf das Medium Wasser angewiesen ist und andererseits noch weitere Funktionen (s. Beispiele oben) wahrnimmt, sind hier im Unterschied zu den beiden anderen Verkehrsträgern auch Maßnahmen von Relevanz, die beispielsweise eine angemessene Fließgeschwindigkeit sicherstellen und die nicht-verkehrlichen Funktionalitäten der Wasserstraße adressieren. Speziell für den Verkehrsträger Schiene sind gemäß den Experten im Anwenderdialog beispielsweise Maßnahmen von großer Relevanz, die z. B. Ausfälle in Folge technischer Störungen reduzieren oder bei Stürmen das Umstürzen von Bäumen auf Trassen verhindern oder reduzieren helfen. Aus Sicht der Gutachter sind hier aber auch spezifische bahnbetriebliche Maßnahmen zu ergänzen, die der Sicherstellung des Zugbetriebs bei Ausfall z. B. der Betriebssteuerung / Stellwerke dienen.

## 6.5 Maßnahmenbeurteilung

Die festgelegten Systemfunktionalitäten erscheinen grundsätzlich auch für die Wasserstraße und Schiene relevant. Da die Wasserstraße neben ihrer Rolle als Verkehrsträger noch eine Reihe weiterer Funktionalitäten erfüllt (s. Kapitel 6.1), ist vorab festzulegen, ob auch diese Funktionalitäten mitbetrachtet werden sollen. In diesem Fall wären die Funktionalitäten entsprechend zu ergänzen.

Ebenso erscheint das Vorgehen zur Erfassung der Resilienz Wirkung der Maßnahmen mit Einschätzungen zum Einfluss der Eintrittshäufigkeit, des Funktionalitätsverlusts und der Dauer der Betriebsunterbrechung auf der Basis der gewählten Bewertungsskala grundsätzlich für Schiene und Wasserstraße anwendbar.

## 6.6 Resilienzoptimierung

Auch hier erscheint die Methodik der Kosten-Wirkungs-Betrachtung grundsätzlich auf die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße übertragbar. Aufgrund des Umstands, dass im Wasserstraßennetz kaum bzw. keine Alternativrouten zur Verfügung stehen und Transporte oftmals nicht vollständig auf andere Verkehrsträger zu verlagern sein werden, könnten zusätzlich Grenzwerte für einzelne Zielgrößen (minimal zu erreichende Verkehrsleistung pro Wasserstraße, maximal akzeptable Anzahl Störungstage, etc.) definiert und bei der Priorisierung berücksichtigt werden.

Wie oben erwähnt, wäre es wünschenswert, wenn durch den gesellschaftlichen Diskurs und nachfolgende entsprechende gesetzliche Vorgaben Zielgrößen für Funktionalitäten oder Verfügbarkeiten vorliegen würden. Die Verwaltung könnte dann prüfen, mit welchen Maßnahmen z. B. eine maximal akzeptable Anzahl Störungstage mit den geringsten Kosten gewährleistet werden kann (Minimal- bzw. Sparsamkeitsprinzip).

## 7 Implementierungskonzept

### 7.1 Einführung und Übersicht

Mit der Umsetzung der Methodik in ein anwendungsorientiertes IT-Tool zur Resilienzbewertung werden die Grundlagen geschaffen, um künftig die Frage der Resilienz von Streckenabschnitten des Straßennetzes (und längerfristig u. U. auch verkehrsträgerübergreifend) in bestehenden Managementsystemen und Maßnahmenplanungen berücksichtigen zu können. Dazu bedarf es aber auch eines Konzeptes, das die Implementierung des entwickelten Resilienzansatzes und des IT-Tools in der Praxis unterstützt. Letztlich werden das Konzept und das IT-Tool nur dann einen Mehrwert leisten und die Resilienz der Verkehrssysteme erhöhen,

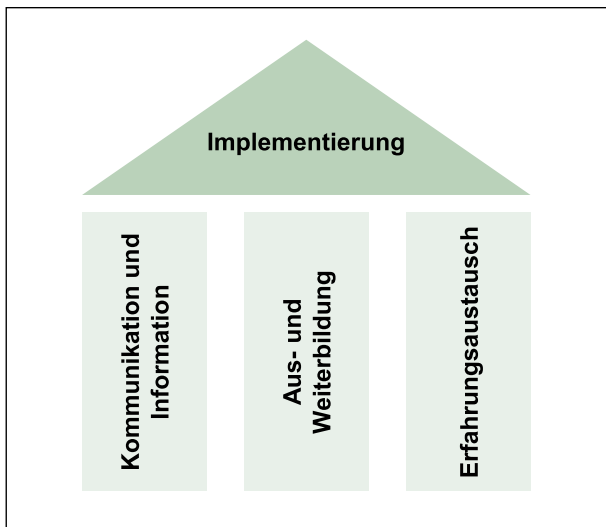


Bild 7-1: Drei Pfeiler des Implementierungskonzepts

wenn sie in der Praxis auf Akzeptanz stoßen und zur Anwendung gelangen.

Das Implementierungskonzept beruht auf den drei Pfeilern gemäß Bild 7-1.

## 7.2 Information und Kommunikation

In einem ersten Schritt gilt es das Konzept und insbesondere das entwickelte IT-Tool den potenziellen Anwendern bekannt zu machen und aufzuzeigen, welcher Mehrwert mit der Umsetzung des Konzepts erzielt werden kann. Dazu bedarf es in der Anfangsphase zuerst einer breit angelegten Information und Kommunikation, die zum Ziel hat, einen möglichst großen Adressatenkreis über das Konzept ins Bild zu setzen und das Interesse am Thema bzw. am IT-Tool zu wecken. Hierzu werden folgende Kommunikationskanäle empfohlen:

- **Informationen über bestehende Websites:**  
Es ist vorgesehen, dass das entwickelte IT-Tool über die Website der Bundesanstalt für Straßenwesen betrieben wird. Im Rahmen der Initialisierungsphase des IT-Tools sollte auf der Hauptseite der Bundesanstalt für Straßenwesen-Website eine Nachricht mit Links zur entsprechenden Site aufgeschaltet werden. Ebenfalls sollten die entsprechenden Informationen – soweit möglich – auch über andere Websites verbreitet werden, wie z. B. über die Website des BMDV-Expertennetzwerks oder die Website des BMDV selbst. Es gilt hierzu im Rahmen einer vertieften Abklärung zu prüfen, welche Websites grundsätzlich für eine solche Informationskampagne genutzt werden könnten bzw.

über welche die Zielgruppen (in erster Linie Stakeholder rund um den Straßenbetrieb und -bau) geeignet erreicht werden können.

- **Newsletter:**  
Ergänzend zu den Informationen über die Website wird empfohlen, die Zielgruppen mit einem elektronischen Newsletter über die Neuerungen und das Angebot zu informieren. Hierbei sollte beachtet werden, dass der Newsletter in knapper Form v. a. den Nutzen der Anwendung des Konzepts bzw. des IT-Tools aufzeigt und interessierten Lesern einen Hinweis erhalten, wo sie weitergehende Informationen finden. Ebenso ist zu prüfen, inwieweit die Informationen nach Zielgruppen separat aufbereitet werden müssen. Die Verbreitung des Newsletters kann unspezifisch über soziale Netzwerke (z. B. LinkedIn, Twitter etc.) oder spezifisch (z. B. mit einem Mail-Versand) an einen definierten Adressatenkreis erfolgen.
- **Netzwerke und Arbeitsgruppen:**  
Die bestehenden vielfältigen Kontakte der Bundesanstalt für Straßenwesen bzw. anderer involvierter Institutionen sollten genutzt werden, damit deren Vertreter in Netzwerken und Arbeitsgruppen, in denen sie vertreten sind, gezielt über das entwickelte Konzept bzw. das IT-Tool informieren können. Hierzu sollten geeignete Informationsmaterialien (z. B. ein kurzes Folienset) bereitgestellt werden. Insbesondere sollte das Netzwerk der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., in dem die Bundesanstalt für Straßenwesen eine aktive Rolle spielt, für die Informationsweitergabe genutzt werden. Auch die länderspezifischen Vereinigungen der Straßenbau- und Verkehrsingenieure e. V. (VSVI) sowie deren Dachverband BSVI (Bundesvereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure e. V.) mit ihren jeweiligen Fachveranstaltungen sollten in das Informationskonzept einbezogen werden.
- **Fachtagungen und Konferenzen:**  
Im Rahmen von Veranstaltungen, Fachtagungen und Konferenzen kann mit Beiträgen/Vorträgen über das entwickelte Konzept bzw. das IT-Tool informiert werden. Hierbei besteht insbesondere der Vorteil, dass die Informationen einem breiteren Publikum spezifisch je nach Schwerpunktthema vorgestellt werden können. Es gilt auch zu prüfen, inwieweit sich die Einführung des IT-Tools eignet, um eine spezifische Veranstaltung durchzuführen (als Webinar oder

in Präsenzform). Liegen einmal Erfahrungen aus der Anwendung in der Praxis vor, so sollten in der Kommunikation und Information insbesondere diese Aspekte aufgezeigt und präsentiert werden. Auch hierzu wird empfohlen geeignete Grundlagen bereitzustellen, welche bei Bedarf für entsprechende Beiträge an Veranstaltungen, Fachtagungen und Konferenzen jeweils herangezogen werden können.

Es wird empfohlen, dass insbesondere in der Initialphase die Aktivitäten im Bereich Information und Kommunikation gut aufeinander abgestimmt werden. Dabei gilt es zu beachten, dass in dieser ersten Phase konzertiert eine breite Information der Zielgruppen erfolgt. Eine gute, abgestimmte Kampagne unterstützt dabei, dass einheitlich und kongruent kommuniziert wird. Weiter wird angeregt, dass rund vier bis fünf Monate nach der Erstinformation eine zweite breite Information erfolgt. Hierbei können gesammelte Erfahrungen aus der Initialphase bei der Zielgruppenansprache berücksichtigt werden und zudem kann so das entwickelte Konzept bzw. das IT-Tool bei den Adressaten wieder in Erinnerung gerufen werden.

### 7.3 Aus- und Weiterbildung

Um die interessierten Zielgruppen-Vertreter zu befähigen das Konzept bzw. das IT-Tool in ihr jeweiliges Managementsystem und ihre Planungs- und Arbeitsabläufe effizient zu integrieren, sollten entsprechende Aus- und Weiterbildungsangebote geschaffen werden. Ziele der Angebote sind:

- Aufzeigen und Instruktion zur Einbettung des Konzepts in die jeweiligen Bereiche der Zielgruppen (Wie ist das Konzept bzw. das IT-Tool einzubetten?)
- Vermittlung der erforderlichen Anwenderkompetenzen zur Nutzung des IT-Tools, inkl. der methodischen Hintergründe (Wie wende ich das Konzept bzw. das IT-Tool an?)

Für die Umsetzung bestehen verschiedene Ansätze:

- **Angebote selbst bereitstellen:**  
Die Bundesanstalt für Straßenwesen kann selbst Angebote schaffen, welche interessierten Anwendern zur Verfügung stehen. Dies können beispielsweise zum Benutzerleitfaden ergänzende Tutorials in Form von reiner Informationsvermittlung (z. B. kurze Videoanleitungen) oder

aber auch spezifische Aus- und Weiterbildungsveranstaltungen (z. B. Webinare oder Tageskurse in Präsenzveranstaltungen etc.) sein. Je nach Intensität des Interesses der potenziellen Anwender, können ggf. zielgruppenspezifische Angebote geschaffen werden (z. B. Kurse für Einsteiger und erfahrene Anwender oder für unterschiedliche Fachrichtungen).

- **Train-the-Trainer:**  
In Anlehnung an die oben dargelegte Variante können Aus- und Weiterbildungsangebote geschaffen werden, welche darauf abzielen Anwender vertieft zu schulen, die anschließend in ihren Organisationen das erlernte Wissen weitergeben. Das Angebot unterscheidet sich nicht grundsätzlich von der erstgenannten Variante, erfordert aber, dass den Nutzern des Angebots ein vertieftes Wissen zum Konzept respektive zum IT-Tool vermittelt wird, damit dieses adäquat von den Trainern weitervermittelt werden kann.
- **Ausbildung bei den Anwendern:**  
Eine weitere Möglichkeit stellen Angebote dar, bei welchen interessierte Anwender eine spezifisch zugeschnittene Schulung vor Ort erhalten (in digitaler oder Präsenzform). So können interessierte Institutionen eine Weiterbildung in ihrem Haus bzw. auf ihre Bedürfnisse und Vorkenntnisse zugeschnitten nutzen. Diese Variante ist hinsichtlich der organisatorischen Belange für die ausbildende Institution deutlich aufwendiger, erlaubt es aber stärker auf die spezifischen Gegebenheiten und Rahmenbedingungen der Anwender einzugehen.

Es wird empfohlen mit einer pragmatischen und einfach umsetzbaren Variante zu starten (z. B. einem halbtägigen Webinar) und dann aufbauend auf den gesammelten Erfahrungen und Rückmeldungen der Anwender ergänzende oder alternative Angebote zu prüfen und ggf. umzusetzen.

### 7.4 Erfahrungsaustausch und Weiterentwicklung

In einer ersten Phase geht es darum, dass der Bekanntheitsgrad des Konzepts und des IT-Tools möglichst gesteigert, der Nutzen aufgezeigt und verständlich gemacht wird und dass interessierte Nutzer eine gute und praxisnahe Hilfestellung zur Umsetzung bekommen.

Aus einer mittelfristigen Perspektive wird es darum gehen, die (dezentral) gesammelten Anwendungserfahrungen wieder zusammenzutragen und die Erkenntnisse und Lehren daraus wieder in die etwaige weitere Entwicklung des Konzepts einfließen zu lassen. Zu diesem Zweck wird angeregt, rund 1 bis 2 Jahre nach der Einführung des Konzepts bzw. des IT-Tools eine Veranstaltung (Workshop, Webinar o. ä.) zu organisieren, in welcher die Anwender ihre Erkenntnisse und Erfahrungen einbringen können. Hierbei geht es sowohl um praktische Aspekte (typische Anwendungsfälle, Umgang mit Ergebnissen in der Praxis etc.) als auch technische Anwenderfragen (z. B. Abschätzungen im IT-Tool, Abbilden von Maßnahmen etc.). Besteht hinreichendes Interesse ist es auch denkbar, dass solche Anwendererfahrungen in einer institutionalisierten Form regelmäßig durchgeführt werden.

## 8 Benutzerleitfaden

### 8.1 Einleitung

Ausfälle der Verkehrsinfrastruktur bedingt z. B. durch Naturereignisse, menschliche Einwirkungen oder technisches Versagen können zu hohen volkswirtschaftlichen Kosten führen, wenn sie zu längeren Unterbrechungen von kritischen Streckenelementen führen. Ein wachsendes Mobilitätsbedürfnis, alternde Infrastrukturen sowie die Zunahme von externen Stressfaktoren wie beispielsweise dem Klimawandel stellen zusätzliche Herausforderungen für die Betreiber von Verkehrsinfrastrukturen dar. Ein umfassendes Infrastrukturmanagement ist deshalb für eine hohe Verfügbarkeit und eine Aufrechterhaltung der Funktionalität im Ereignisfall unabdingbar. Was heute mehrheitlich noch fehlt, ist ein ganzheitliches, systematisches Management, das die übergeordnete Systemresilienz beurteilt und die Beurteilung von Maßnahmen hinsichtlich ihres Beitrags zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur ermöglicht.

Dieser Benutzerleitfaden ist Bestandteil des Forschungsprojekts FE 69.0005/2020 Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde der im Forschungsprojekt FE 89.0330/2017 Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen<sup>7</sup> entwickelte Ansatz methodisch und inhaltlich optimiert und weiterentwickelt. Um den Transfer in die Praxis zu ermöglichen, wurde ein IT-Tool entwickelt, mit welchem die Resilienz der Straßeninfrastruktur sowie die Resilienzwirkung von Maßnahmen bewertet werden können.

Ziel dieses Benutzerleitfadens ist es den Anwendern die Funktionalitäten und die Handhabung des IT-Tools aufzuzeigen. Der Benutzerleitfaden ist in zwei Teile unterteilt. Im ersten Teil werden die Funktionalitäten erläutert. Im zweiten Teil wird die Anwendung des IT-Tools beschrieben.

Für Erläuterungen zur Methodik, welche dem IT-Tool zugrunde liegt, wird auf das Methodikkonzept (Kapitel 5) zum Forschungsprojekt FE 69.0005/2020 Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur verwiesen.

### 8.2 Funktionalitäten des IT-Tools

#### 8.2.1 Übersicht Bewertungsschritte und Navigation

Die Navigationsleiste (Bild 8-1) gibt eine Übersicht über die für die Resilienzbewertung zu durchlaufenden Schritte. Das IT-Tool umfasst insgesamt acht Schritte, welche zwingend nacheinander durchlaufen werden müssen. Es ist nicht möglich, einzelne Schritte zu überspringen, da die Werte und Auswahlmöglichkeiten von vorhergehenden Eingabewerten abhängig sind. Die Navigationsleiste zeigt zudem an, in welchem Schritt er sich aktuell befindet.

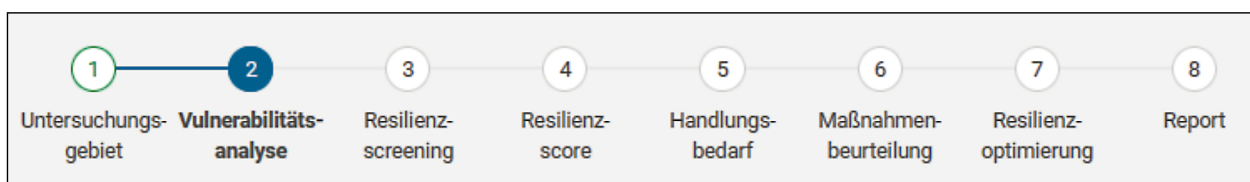


Bild 8-1: Navigation innerhalb des IT-Tools

<sup>7</sup> <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/2514>

det (blaue Einfärbung) und welche Schritte bereits abgeschlossen wurden (grüne Umrahmung).

Die Anwender können nur zum nächsten Schritt übergehen, wenn alle Pflichtfelder vollständig ausgefüllt sind. Die Vorwärts- und Rückwärtsnavigation (Bild 8-2) kann sowohl über die Navigationsleiste (Anklicken des nächsten Schritts) oder über die Weiter-Buttons am Ende der Seite erfolgen. Möchte der Anwender mehrere Schritte zurück navigieren, so empfiehlt sich die Navigation über die Navigationsleiste, da er hier direkt den gewünschten Schritt anwählen und zu diesem springen kann (das Überspringen mehrerer Schritte ist nicht möglich bei der Vorwärtsnavigation).

### 8.2.2 Validierung

Wechselt man mit Navigations- oder Weiter-Buttons den Schritt, so wird automatisch eine Validierung der getätigten Eingaben vorgenommen. Diese Validierung prüft einerseits, ob die Angaben vollständig sind (alle nötigen Felder ausgefüllt) und andererseits, ob die Eingaben korrekt sind respektive innerhalb der vorgegebenen Wertebereiche liegen. Zeigt sich bei der Validierung, dass auf der aktuellen Seite fehlende oder inkorrekte Angaben hinterlegt wurden, so wird dies durch einen roten Farbcode und, je nach Fehler, durch eine zusätzliche Beschreibung angezeigt. Solche Hinweise können beispielsweise wie in Bild 8-3 dargestellt aussehen.

Sobald die fehlenden Angaben ergänzt oder die nicht korrekten Angaben korrigiert wurden, kann via

Navigations- oder Weiter-Button zum nächsten Schritt gewechselt werden. Sind alle Fehler auf der aktuellen Seite behoben, verschwinden die Validierungsmeldungen und der nächste Schritt wird angezeigt.

### 8.2.3 Speichern und erneute Bearbeitung (Import)

Über den Speicher-Button (Bild 8-4) können die getätigten Eingaben lokal auf dem eigenen Rechner abgespeichert werden. Die Daten können ausschließlich lokal und nicht in der Online-Applikation gespeichert werden. Getätigte Eingaben werden somit zu keinem Zeitpunkt auf einem externen Server gespeichert.

Je nach Browser-Einstellung wird die .json-Datei entweder direkt im Downloads-Ordner abgespeichert oder es erscheint ein Popup-Fenster, in welchem gefragt wird, ob die Datei geöffnet oder gespeichert werden soll (Bild 8-5).

Sobald die Datei auf diese Weise gespeichert wurde, empfiehlt es sich, die Datei in einen Ordner zu verschieben, in welchem man die Datei sicher wiederfindet. Bei Bedarf kann die Datei auch umbenannt werden. Hierbei darf die Endung bzw. der Dateityp .json nicht geändert werden.

Hinweis: Die Daten werden nicht automatisch gespeichert! Schließt man das IT-Tool, ohne die Eingaben vorher auf dem eigenen Rechner abzuspei-

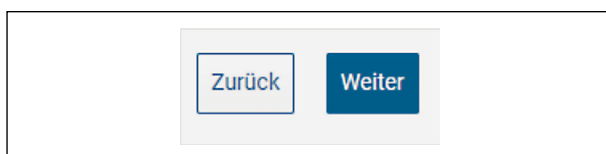


Bild 8-2: Buttons zur Vorwärts- und Rückwärtsnavigation

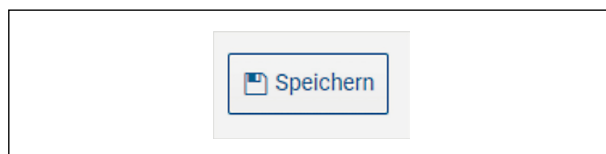


Bild 8-4: Speicher-Button zur lokalen Speicherung der Eingaben

**Technische Störungen**  
 Wie hoch schätzen Sie die Exposition des Objekts bezüglich technischer Gefährdungen (z.B. Stromausfall/Blackout, Ausfall wichtiger verkehrstechnischer Systeme, IT, Materialversagen, etc.) ein?

Auswahl ist erforderlich

**Verantwortlichkeiten** 1  
 Sind die Verantwortlichkeiten definiert sowie Rollen und Funktionen auch ausserhalb des Ereignisfalls zugewiesen?

Gewichtung [%]

Summe 102,0%  
ungleich 100%

Bild 8-3: Validierung der Angaben. Felder mit fehlerhaften Werten oder fehlenden Angaben werden rot markiert



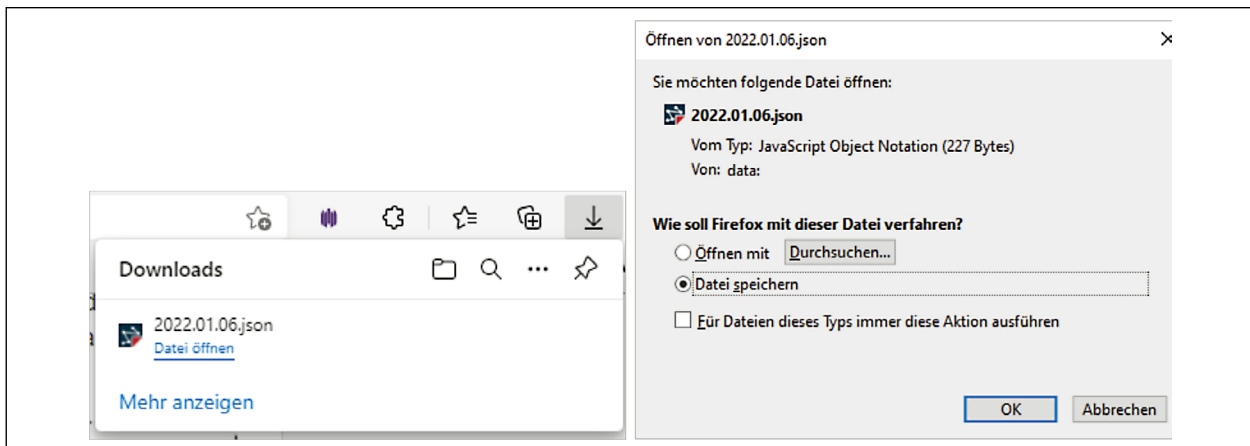


Bild 8-5: Je nach Browser-Einstellung erscheint ein Pop-up-Fenster beim Speichern der Eingaben

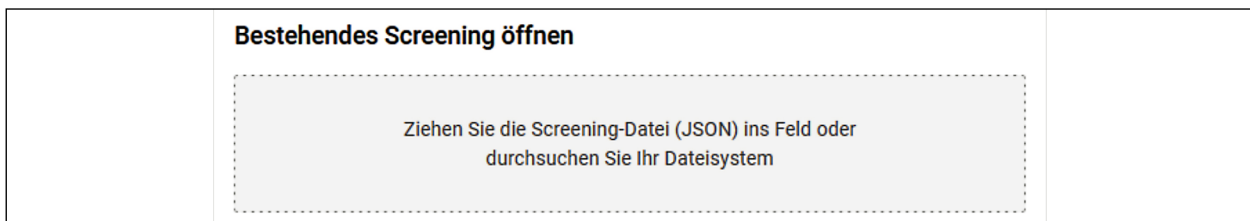


Bild 8-6: Import-Fenster

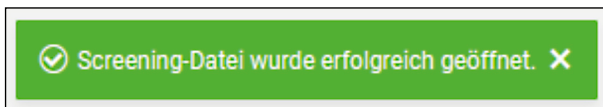


Bild 8-7: Meldung bei erfolgreichem Import

chern, gehen alle Einträge verloren und es muss erneut mit dem Ausfüllen begonnen werden.

Um ein Screening fortzusetzen, zu bearbeiten oder nochmals anzuschauen, kann die abgespeicherte .json-Datei dazu über das Import-Fenster im Schritt 1 - Untersuchungsgebiet wieder ins IT-Tool importiert werden (Bild 8-6). Alle gespeicherten Angaben werden auf diese Weise direkt wieder im IT-Tool angezeigt und stehen den Anwendern für die weitere Bearbeitung wieder zur Verfügung.

Für den Import kann die Screening-Datei entweder via Drag & Drop in das grau umrahmte Feld gezogen werden oder durch Klicken auf das Feld, aus dem sich automatisch öffnenden File Explorer ausgewählt werden. Sobald die Datei erfolgreich importiert werden konnte, erscheint die in Bild 8-7 abgebildete Meldung in der oberen rechten Ecke des IT-Tools.

#### 8.2.4 Bemerkungen/Notizen

Sowohl im Schritt 1 – Untersuchungsgebiet wie auch am Ende des Screenings in Schritt 8 – Report,

können die Anwender eigene Bemerkungen und Notizen zum Screening erfassen (Bild 8-8). Dies können beispielsweise Angaben zu den bearbeitenden Personen, zum Bearbeitungszeitraum oder detailliertere Angaben zu den betrachteten Objekten/Streckenabschnitten sein. Es können auch Links oder andere Informationen in Textform via Copy & Paste in diesen beiden Feldern erfasst werden. Die Bemerkungen aus beiden Eingabefeldern werden auch im Report aufgeführt.

#### 8.2.5 Informations-Buttons

Sind Begriffe nicht selbsterklärend oder benötigt der Anwender weitere Informationen, um eine Frage beantworten zu können, stehen im ganzen IT-Tool für ausgewählte Eingabeparameter sogenannte i-Buttons (Informations-Buttons) zur Verfügung. Durch Klicken auf einen solchen i-Button öffnet sich ein Pop-up mit weiterführenden Informationen. Durch Klicken an eine andere Stelle außerhalb des Informationsfeldes, schließt sich das Pop-up automatisch wieder (Bild 8-9).

#### 8.2.6 Report

Am Ende des Screenings lassen sich die wichtigsten Ergebnisse des Screenings in einem PDF- oder html-Report zusammenfassen. Durch Klicken auf den Button Report erstellen, wird der Report auto-

The screenshot shows a web interface with two main sections. The top section is titled 'Tunnel - Brücken - offene Strecken' and contains a 'Bemerkung' (Remarks) label above a large empty text input field. The bottom section is titled 'Report' and contains a description: 'Der Report fasst die wichtigsten Ergebnisse des Handlungsbedarfs-Index sowie der Rangierung der identifizierten Massnahmen aus der Resilienzoptimierung zusammen.' Below this is another 'Bemerkung' label above a second large empty text input field. At the bottom of the 'Report' section is a blue button labeled 'Report erstellen'.

Bild 8-8: Felder für eigene Bemerkungen

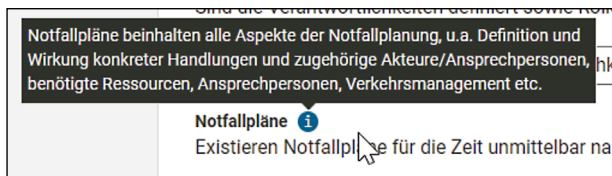


Bild 8-9: Informationsfelder (schwarz), welche beim Anklicken der Informations-Buttons (blauer Kreis) erscheinen

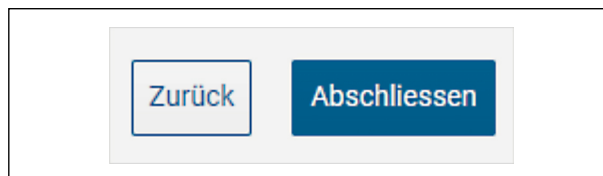


Bild 8-10: Button zum Abschluss des Screenings

matisch generiert und abgespeichert (siehe Erläuterungen zur Speicherfunktion). Der Report umfasst ein Titelblatt mit allen wichtigen Angaben zum gesamten Untersuchungsgebiet, den einzelnen Objekten sowie die erfassten Bemerkungen zum Screening. Im Anschluss sind für jedes vulnerable Objekt sowohl der Handlungsbedarf wie auch die wichtigsten zu ergreifenden Maßnahmen aufgeführt. Sind alle Objekte resilient, besteht der Report nur aus dem zusammenfassenden Deckblatt. Die der Bewertung zugrunde liegenden Eingabeparameter können jederzeit eingesehen werden, indem die gespeicherte .json-Datei in das IT-Tool impor-

tiert wird. Voraussetzung hierfür ist, dass das Screening vor Abschluss lokal abgespeichert wurde.

### 8.2.7 Abschluss des Screenings

Ist man am Ende des Screenings angelangt, hat dieses gespeichert und allenfalls auch den Report erstellt, so kann das Screening durch Klicken auf den Abschließen-Button abgeschlossen werden (Bild 8-10). Nach Abschluss des Screenings werden die gemachten Eingaben gelöscht und ein neues, leeres Screening ab Schritt 1 erstellt.

## 8.3 Vorgehen

### 8.3.1 Untersuchungsgebiet



#### Beschreibung und Ziel

Ziel dieses Schrittes ist die Beschreibung des Untersuchungsgebiets. Dafür sind die zu untersuchenden Objekte zu definieren.



#### Vorgehen

1. Zuerst ist das Screening sowie der untersuchte Streckenabschnitt zu bezeichnen.
2. Dann können die Objekte auf dem Streckenabschnitt definiert werden. Es kann zwischen Tunneln, Brücken und offenen Strecken unterschieden werden. Weiter ist die Länge des Objekts festzulegen.<sup>8</sup>



#### Resultat

Objekte, die im nächsten Schritt auf ihre Vulnerabilität respektive ihre Resilienz hin beurteilt werden sollen, sind definiert.



#### Beispiel

Neues Screening	Bestehendes Screening öffnen																		
<p><b>Titel*</b> <input type="text" value="Testscreening"/> <b>Organisation*</b> <input type="text" value="BAST"/></p> <p><b>Abschnitt</b></p> <p><b>Bezeichnung*</b> <input type="text" value="Teststrecke"/> <b>Länge [Km]</b> <input type="text" value="20,155"/></p> <p><b>Startknoten</b> <input type="text"/> <b>Endknoten</b> <input type="text"/></p> <p><b>Tunnel - Brücken - offene Strecken</b> <input type="button" value="+"/></p> <table border="0"> <tr> <td><b>Typ*</b></td> <td><b>Bezeichnung*</b></td> <td><b>Länge [Km]*</b></td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="Tunnel"/></td> <td><input type="text" value="Untergrund"/></td> <td><input type="text" value="5"/></td> </tr> <tr> <td><b>Typ*</b></td> <td><b>Bezeichnung*</b></td> <td><b>Länge [Km]*</b></td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="Brücke"/></td> <td><input type="text" value="Übergrund"/></td> <td><input type="text" value="0,155"/></td> </tr> <tr> <td><b>Typ*</b></td> <td><b>Bezeichnung*</b></td> <td><b>Länge [Km]*</b></td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="Offene Stre"/></td> <td><input type="text" value="Ebenerdig"/></td> <td><input type="text" value="15"/></td> </tr> </table> <p><b>Bemerkung</b></p> <p><input type="text" value="Die Länge der Elemente fließt nicht in die Bewertung ein."/></p>	<b>Typ*</b>	<b>Bezeichnung*</b>	<b>Länge [Km]*</b>	<input type="text" value="Tunnel"/>	<input type="text" value="Untergrund"/>	<input type="text" value="5"/>	<b>Typ*</b>	<b>Bezeichnung*</b>	<b>Länge [Km]*</b>	<input type="text" value="Brücke"/>	<input type="text" value="Übergrund"/>	<input type="text" value="0,155"/>	<b>Typ*</b>	<b>Bezeichnung*</b>	<b>Länge [Km]*</b>	<input type="text" value="Offene Stre"/>	<input type="text" value="Ebenerdig"/>	<input type="text" value="15"/>	<p>Ziehen Sie die Screening-Datei (JSON) ins Feld oder durchsuchen Sie Ihr Dateisystem</p>
<b>Typ*</b>	<b>Bezeichnung*</b>	<b>Länge [Km]*</b>																	
<input type="text" value="Tunnel"/>	<input type="text" value="Untergrund"/>	<input type="text" value="5"/>																	
<b>Typ*</b>	<b>Bezeichnung*</b>	<b>Länge [Km]*</b>																	
<input type="text" value="Brücke"/>	<input type="text" value="Übergrund"/>	<input type="text" value="0,155"/>																	
<b>Typ*</b>	<b>Bezeichnung*</b>	<b>Länge [Km]*</b>																	
<input type="text" value="Offene Stre"/>	<input type="text" value="Ebenerdig"/>	<input type="text" value="15"/>																	

Bild 8-11: Definition des Streckenabschnitts und dessen Objekte. Es können Tunnel, Brücken und offene Strecken definiert werden (links). Alternativ kann ein bereits bestehendes Screening geladen werden (rechts)

<sup>8</sup> Längenangaben sind auf drei Nachkommastellen möglich (Eingabe mit Komma). Die Längenangabe ist rein informativ und fließt nicht in die Bewertung mit ein.

### 8.3.2 Vulnerabilitätsanalyse



#### Beschreibung und Ziel

Ziel der Vulnerabilitätsanalyse ist es, abzuschätzen, ob für ein Objekt respektive Streckenabschnitt des Untersuchungsgebiets eine Erhöhung der Resilienz überhaupt angezeigt ist, oder ob auf eine entsprechende Betrachtung verzichtet werden kann. Dies wird bestimmt, indem einerseits die Kritikalität und andererseits mögliche Gefährdungen pragmatisch eingeschätzt werden.

Zudem werden Abschätzungen zur erwarteten Häufigkeit des Auftretens der jeweiligen Gefährdung sowie zur erwarteten Betriebsunterbrechung vorgenommen. Diese Angaben fließen in die Maßnahmenbeurteilung mit ein.

Hinweis: Liegt bereits eine detaillierte Vulnerabilitätsanalyse (z. B. mit Berücksichtigung von bautechnischen Aspekten) vor, respektive ist bereits bekannt, welche Objekte vertieft hinsichtlich ihrer Resilienz untersucht werden sollen, kann auf die Beurteilung der Vulnerabilität verzichtet werden. Es ist dann lediglich eine Abschätzung der Ereignishäufigkeit und Ausfalldauer je Gefährdung notwendig, welche in die Maßnahmenbeurteilung einfließt. Damit mit dem nächsten Schritt fortgefahren werden kann, ist es umsetzungstechnisch notwendig auch in den übrigen Dropdowns Werte einzugeben. Hier sollte dann jeweils die Auswahlmöglichkeit mit der niedrigsten Punktzahl ausgewählt werden, damit das Objekt als vulnerabel beurteilt wird und weiter betrachtet werden kann. Die Werte dienen lediglich als Kriterium für die weitere Betrachtung des Objekts und fließen nicht weiter in die Beurteilung mit ein.



#### Vorgehen

1. Für jedes definierte Objekt wird die Kritikalität anhand eines Kriterienkatalogs beurteilt. Anhand von Dropdownlisten können verschiedene Fragen zur Kritikalität eines Objektes beantwortet werden.
2. Für jedes definierte Objekt wird die Gefährdungssituation anhand eines Kriterienkatalogs beurteilt. Anhand von Dropdownlisten können die verschiedenen Fragen zur Gefährdung eines Objektes beantwortet werden. Für hydrologische, gravitative und meteorologische Gefahren kann keine Exposition ausgewählt werden (z. B. für einen Tunnel). Für die übrigen Gefährdungen ist dies nicht möglich, da stets eine Grundexposition besteht.
3. Wurde eine Exposition identifiziert, sind Häufigkeit des Ereignisses sowie die Ausfalldauer des Objekts infolge des Ereignisses abzuschätzen. Es soll der ungünstigste anzunehmende Fall (credible worst case) betrachtet werden.



#### Resultat

Basierend auf den Eingaben wird ein Vulnerabilitätsscore berechnet und das Objekt als vulnerabel oder nicht vulnerabel eingestuft. Ist letzteres der Fall, ist aufgrund geringer Betroffenheit oder Gefährdung keine weitere Beurteilung notwendig. Die Resilienzbewertung ist hiermit für diese Objekt abgeschlossen. Für die als vulnerabel eingestuften Objekte wird die Resilienzbewertung fortgesetzt.



#### Beispiel

**Untergrund**
^

---

### Kritikalität

Die Kritikalität ist ein Mass für die Bedeutsamkeit einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionalitätsverlust hat.

Wie hoch ist die durchschnittliche, tägliche Verkehrsbelastung im Querschnitt?

< 60'000 Fahrzeuge pro Tag
▼

Wie viele Stautunden pro Tag gibt es und wie häufig tritt dieser Stau auf?

geringes Stauaufkommen
▼

Bild 8-12: Beurteilung der Kritikalität und somit der Bedeutsamkeit des betrachteten Objekts in Bezug auf die Konsequenzen einer Störung respektive eines Funktionalitätsverlusts

### Gefährdung

Bei einer Gefährdung handelt es sich um ein mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf das System einwirkendes, disruptives Ereignis, welches das Potential besitzt, die Funktionalität einer Infrastruktur zu beeinträchtigen. Nachfolgend gilt es pro Objekt und Gefahrentyp die Exposition, die Eintretenshäufigkeit sowie die Dauer der Unterbrechung abzuschätzen.

#### Hydrologische Gefahren

Wie hoch schätzen Sie die Exposition des Objekts bezüglich hydrologischer Gefahren (z.B. Hochwasser, Überflutung durch Hangwasser) ein?

< 5% des Untersuchungsbereichs exponiert
▼

Häufigkeit der Gefährdung ⓘ

In der Grössenordnung von 1 Ereignis in 100 Jahren
▼

Dauer der Unterbrechung ⓘ

einige Stunden bis Tage
▼

#### Gravitative Gefahren

Wie hoch schätzen Sie die Exposition des Objekts bezüglich gravitativen Gefahren (z.B. Scheelawine, Murgang, Hangmuren,

Bild 8-13: Abschätzung der Exposition des betrachteten Objekts gegenüber verschiedenen Gefährdungen. Ist eine Exposition vorhanden ist die Häufigkeit und die Dauer einer möglichen Unterbrechung abzuschätzen. Diese Abschätzung fließt nicht in die Vulnerabilitätsbeurteilung mit ein, aber wird für die Maßnahmenbeurteilung benötigt

Resilienzscreening empfohlen

<div style="margin-right: 10px;"></div> <div style="flex-grow: 1;">Untergrund</div> <div style="text-align: right; padding-right: 10px;">  ▼         </div>
<div style="margin-right: 10px;"></div> <div style="flex-grow: 1;">Übergrund</div> <div style="text-align: right; padding-right: 10px;">  ▼         </div>
<div style="margin-right: 10px;"></div> <div style="flex-grow: 1;">Ebenerdig</div> <div style="text-align: right; padding-right: 10px;">  ▼         </div>

Bild 8-14: Basierend auf den Angaben zu Kritikalität und Exposition findet die Vulnerabilitätsabschätzung statt. Ob auf Grundlage dieser eine Resilienzscreening empfohlen wird oder nicht, zeigen die farbigen Icons. Für die Objekt für die kein Resilienzscreening empfohlen wird, ist die Beurteilung abgeschlossen

### 8.3.3 Resilienzscreening



#### Beschreibung und Ziel

Ziel des Resilienzscreenings ist die übergeordnete Überprüfung der Resilienz eines Systems im Ist-Zustand, sowie der Identifikation von potenziellen Handlungsfeldern, in welchen die Systemperformance hinsichtlich ihrer Resilienz verbessert werden soll.



#### Vorgehen

1. Für jedes vulnerable Objekt wird anhand eines Fragenkatalogs überprüft, welche für die Resilienz relevanten Aspekte in welchem Maß abgedeckt sind. Analog zur Vulnerabilitätsanalyse können via Dropdownlisten für die einzelnen Fragen die entsprechenden Antworten ausgewählt werden.
2. Die Dimensionen und Kriterien sind durch die Anwender zu gewichten.<sup>9</sup> Die vorgegebene Standardgewichtung sieht eine Gleichgewichtung aller Kriterien vor und kann angepasst werden. Mit Hilfe des „Standardgewichtung anwenden“-Buttons kann die Gewichtung durch Klicken wieder auf die Gleichgewichtung zurückgesetzt werden.



#### Resultat

Siehe Kapitel „Resilienzscore“ und „Handlungsbedarf“ im Benutzerleitfaden



#### Beispiel

Untergrund
! ^

[Standardgewichtung anwenden](#)

#### Organisatorisch

Gewichtung Dimension [%]

40

**Verantwortlichkeiten** ⓘ

Sind die Verantwortlichkeiten definiert sowie Rollen und Funktionen auch ausserhalb des Ereignisfalls zugewiesen?

Für das kritische Objekt sind die Verantwortlichkeiten teilweise definiert (2 Punkte)

12,5

**Notfallpläne** ⓘ

Existieren Notfallpläne für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis, welche die Bewältigung dieses Ereignisses hinreichend ermöglichen?

Die Notfallpläne sind für mindestens 25 % der Gesamtlänge des Objekts erstellt (2 Punkte)


12,5


**Wiederstellungspläne** ⓘ


Bild 8-15: Mithilfe von Leitfragen wird für jedes zu untersuchende Objekt abgeschätzt, ob eine Erhöhung der Resilienz überhaupt angezeigt ist. Möglicherweise kann davon ausgegangen werden, dass der betrachtete Streckenabschnitt bzw. das betrachtete Objekt hinreichend resilient ist und auf eine vertiefte Resilienzbeurteilung verzichtet werden kann


<sup>9</sup> Es gilt aber zu berücksichtigen, dass die Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen verschiedener Resilienzbeurteilungen nur dann gegeben ist, wenn dieselben Gewichtung der Funktionalitäten für die Analysen angesetzt werden.

### 8.3.4 Resilienzscore

 **Beschreibung und Ziel** Grafische Darstellung der Ergebnisse aus dem Resilienzscreening. Dargestellt ist der ungewichtete Resilienzscore. Der Gesamtscore ist die mittlere je Leitfrage vergebene Punktzahl im Resilienzscreening.<sup>10</sup> Neben dem erzielten Gesamtscore werden auch die Resilienzscore über die drei Dimensionen sowie für die einzelnen Kriterien je in einem horizontalen Balkendiagramm dargestellt.<sup>11</sup> Durch die Wiederaufnahme der Farbgebung ist zudem intuitiv ersichtlich, welche Kriterien, welcher Dimension angehören.

 **Vorgehen** Dieser Schritt ist rein informativ. Es müssen keine weiteren Angaben gemacht werden.

 **Resultat** Siehe Kapitel „Beschreibung und Ziel“ im Benutzerleitfaden

 **Beispiel**

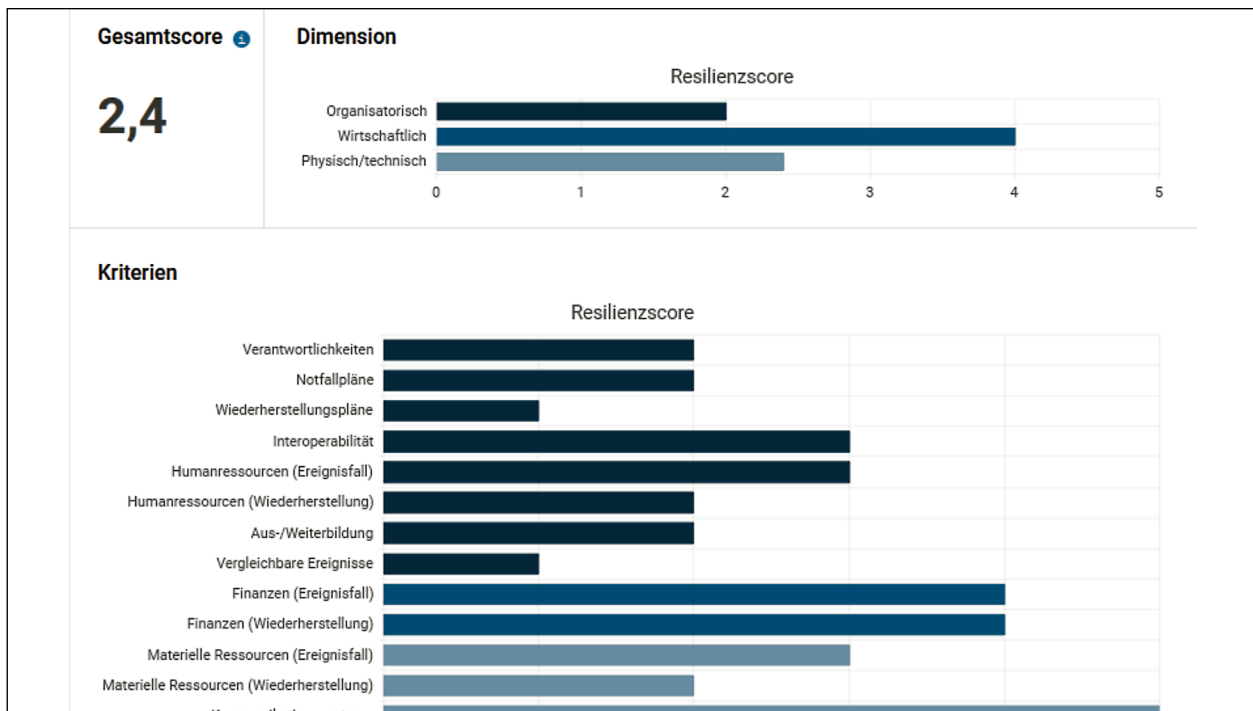


Bild 8-16: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus dem Resilienzscreening je Kriterium

<sup>10</sup> Dies entspricht einer Gleichgewichtung aller Kriterien.

<sup>11</sup> Der Resilienzscore eines Kriteriums entspricht der Punktzahl, welche im Resilienzscreening für das Kriterium vergeben wurde. Der Resilienzscore einer Dimension ist der Mittelwert der Resilienzscore über alle Kriterien der entsprechenden Dimension.

### 8.3.5 Handlungsbedarf



#### Beschreibung und Ziel

Basierend auf dem Resilienzscore und unter Berücksichtigung der Gewichtung der einzelnen Kriterien wird ein Handlungsbedarfs-Index<sup>12</sup> abgeleitet, welcher zeigt, für welche Kriterien Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz empfohlen werden. Der Fokus der Maßnahmenfindung soll so auf einzelne, aktuell am wenigsten resiliente Handlungsfelder eingegrenzt werden und basierend auf den identifizierten Handlungsfeldern eine Vorauswahl an potenziellen Maßnahmen getroffen werden, welche dann im nächsten Schritt hinsichtlich ihrer Resilienzwirkung beurteilt und priorisiert werden. So können die Untersuchungen zur Maßnahmenwirkung zielgerichteter und effizienter durchgeführt werden.

Jedem Kriterium und damit jeder Dimension des Handlungsbedarfs sind ein oder mehrere vordefinierte Maßnahmenfelder zugeordnet. Unter dem Begriff Maßnahmenfeld ist eine Richtungsvorgabe infrage kommender Maßnahmen zu verstehen. Bei der Anwendung der Methodik obliegt es den Straßeninfrastrukturbetreibern, Maßnahmen auszuwählen und zu konkretisieren, die für das jeweilige Maßnahmenfeld zutreffend und für sein System geeignet sowie umsetzbar sind.



#### Vorgehen

1. Der erste Teil dieses Schrittes ist analog zu Schritt 4 wieder rein informativer Natur. Für das einfachere Verständnis der dargestellten Daten wurde auch hier ein horizontales Balkendiagramm verwendet. Durch eine rote Einfärbung der einzelnen, kritischen Balken, wird intuitiv ersichtlich, für welche Kriterien Handlungsbedarf besteht, da sie aufgrund des Screenings als kritisch eingestuft werden.
2. Im zweiten Teil dieses Schrittes müssen mögliche Maßnahmen erfasst werden. Es wird eine Aufteilung der Kriterien in „Kritische“ und „Weitere“ angezeigt. Durch Klicken auf das entsprechende Kriterium erscheinen auf der rechten Seite die für dieses Kriterium empfohlenen Maßnahmenfelder. Es handelt sich dabei um übergeordnete Maßnahmenvorschläge, die als Inspiration oder Gedankenstütze dienen und die Anwender bei der Maßnahmenfindung unterstützen sollen. Diese Maßnahmenvorschläge sind durch die Anwender zu konkretisieren. Unter „Selbstdefinierte Maßnahmen“ müssen durch Klicken auf „Weitere selbstdefinierte Maßnahme hinzufügen“ die Maßnahmen erfasst und beschrieben werden, welche im nächsten Schritt hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Resilienz des Systems beurteilt werden sollen. Die blau eingefärbten Nummerierungen zeigen, wie viele Maßnahmen für die einzelnen Kriterien bereits erfasst wurden.



#### Resultat

Es sind Maßnahmen definiert, welche im nächsten Schritt auf ihre Resilienzwirkung beurteilt werden. Die in diesem Schritt erfassten Maßnahmen werden vom IT-Tool automatisch in den nächsten Schritt übernommen.



#### Beispiel

<sup>12</sup> Der Handlungsbedarfs-Index (HI, Skala von 0 bis 100) berechnet sich aus dem Resilienzscore, indem dieser zuerst in einen Resilienz-Defizit-Index (RDI) umgewandelt wird:  $RDI = (5-RS) \times \frac{100}{5}$ . Unter Einbezug der definierten Gewichtungen wird der RDI in den HI überführt:  $HI = RDI \times G_{\text{Kriterium}} \times G_{\text{Dimension}}$



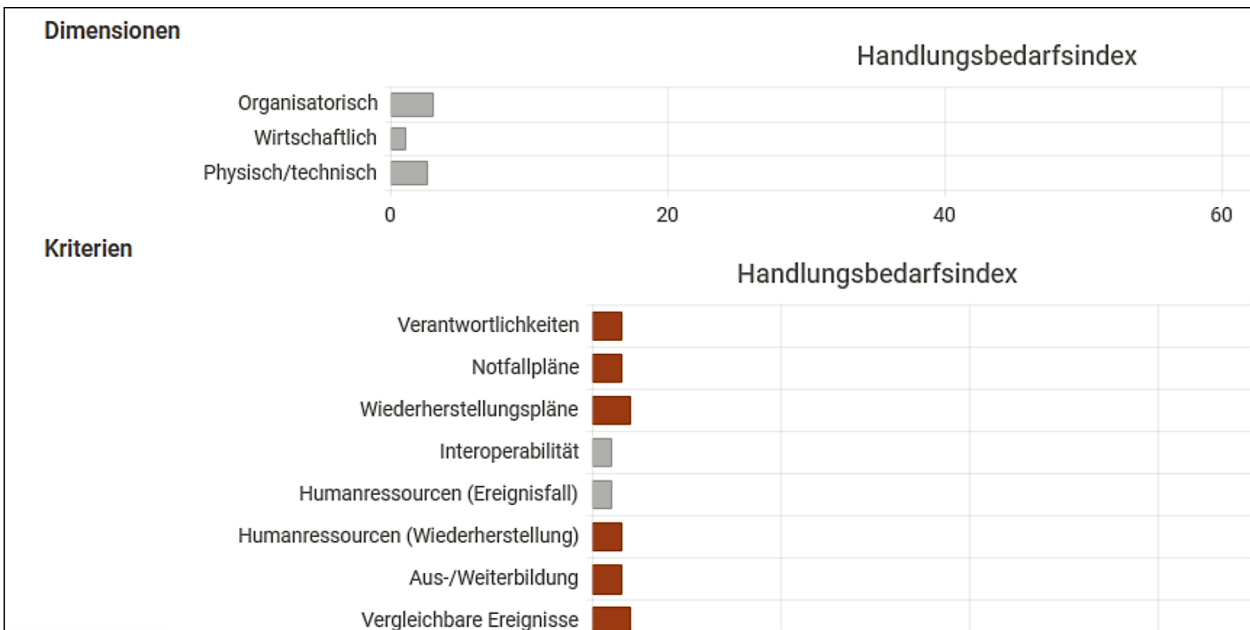


Bild 8-17: Basierend auf dem Resilienzscore und unter Berücksichtigung der Gewichtung der einzelnen Kriterien wird ein Handlungsbedarfs-Index abgeleitet. Für die rot markierten Kriterien werden Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz empfohlen

### Identifikation von Maßnahmenfeldern

Definieren Sie pro Kriterium die Maßnahmen, die im nächsten Schritt hinsichtlich ihrem Beitrag zur Resilienz des Objekts bewertet werden sollen.

Kriterien			Maßnahmen	
<b>Kritische</b>			<b>Selbstdefinierte Maßnahmen</b>	
Verantwortlichkeiten	3,0	Organisatorisch	Name*	Alternative Route
Notfallpläne	3,0	Organisatorisch	Beschreibung	Einspurige Strecke zwischen Punkt A und Punkt B gemäss Plänen.
Wiederherstellungspläne	4,0	Organisatorisch	<a href="#">+ Weitere selbstdefinierte Maßnahme hinzufügen</a>	
Humanressourcen (Wiederherstellung)	3,0	Organisatorisch	<b>Empfohlene Maßnahmenfelder</b>	
Aus-/Weiterbildung	3,0	Organisatorisch	Neubau von Routen	
Vergleichbare Ereignisse	4,0	Organisatorisch	<b>Weitere Maßnahmenfelder</b>	
Materielle Ressourcen (Wiederherstellung)	3,0	Physisch/technisch		
Technische Einrichtungen	5,0	Physisch/technisch		
Alternative Routen	4,0	Physisch/technisch		
Kapazität alternative Routen	4,0	Physisch/technisch		

Bild 8-18: Definition von Maßnahmen, die im nächsten Schritt hinsichtlich ihres Beitrags zur Resilienz des Objekts bewertet werden sollen

### 8.3.6 Maßnahmenbeurteilung



#### Beschreibung und Ziel

Bei der Maßnahmenbeurteilung wird beurteilt, welchen Einfluss eine Maßnahme auf die Resilienz des betrachteten Objekts respektive Streckenabschnitts hat. Dazu wird der Einfluss auf den Funktionalitätsverlust und die Ausfalldauer im Ereignisfall sowie die Eintrittshäufigkeit eines disruptiven Ereignisses selbst beurteilt.



#### Vorgehen

1. Im ersten Schritt wird die Veränderung des Funktionalitätsverlust je Funktionalität (Reise- und Transportzeiten, Kapazität im Netz, etc.) beurteilt. Diese Beurteilung ist unabhängig von den Gefährdungen. Es wird der Fall betrachtet, dass das Objekt nicht zur Verfügung steht, die ursächliche Einwirkung ist hierfür nicht relevant. Die Funktionalitäten können gewichtet werden. Standardmäßig ist eine Gleichgewichtung der Kriterien hinterlegt. Bei Bedarf kann auch eine Gleichgewichtung der Dimensionen oder eine benutzerdefinierte Gewichtung verwendet werden.<sup>13</sup>
2. Im zweiten Schritt wird die Eintrittshäufigkeit nach Umsetzung der Maßnahme je Gefährdung abgeschätzt. Diese wird dann ins Verhältnis zur ursprünglichen Eintrittshäufigkeit (ohne Maßnahme) gesetzt, welche bereits in der Vulnerabilitätsanalyse bestimmt wurde.
3. Zuletzt wird die Ausfalldauer des vulnerablen Objekts nach Umsetzung der Maßnahme je Gefährdung beurteilt. Diese wird dann ebenfalls ins Verhältnis zur Eintrittshäufigkeit ohne Maßnahme gesetzt, welche bereits in der Vulnerabilitätsanalyse bestimmt wurde.



#### Resultat

Aus den Angaben zum Funktionalitätsverlust, der Ausfalldauer und der Eintrittshäufigkeit wird die Resilienzwirkung der Maßnahme bestimmt.<sup>14</sup> Dieser Wert kann mit der Resilienzwirkung anderer Maßnahmen verglichen werden.



#### Beispiel

Im Folgenden wird die Maßnahmenbeurteilung anhand zweier möglicher Maßnahmen veranschaulicht:

##### **Maßnahme 1 - Schutzmaßnahme Hochwasser:**

Ein Hochwasserschutzdamm reduziert die Häufigkeit einer hochwasserbedingten Straßensperrung.

- Einfluss der Maßnahme auf den Funktionalitätsverlust: Die Maßnahme reduziert die Eintrittshäufigkeit des gewählten Referenzszenarios, nicht jedoch dessen Auswirkung. Die Maßnahme hat somit keinen Einfluss auf den Funktionalitätsverlust bei Eintritt des Referenzszenarios (0 Punkte bei allen Funktionalitäten).

<sup>13</sup> Es gilt aber zu berücksichtigen, dass die Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen verschiedener Resilienz Betrachtungen nur dann gegeben ist, wenn dieselben Gewichtung der Funktionalitäten für die Analysen angesetzt werden.

<sup>14</sup> Die Veränderung des Funktionalitätsverlusts wird mit Werten zwischen -3 und +3 bewertet. Unter Einbezug der Gewichtungen wird die gewichtete Summe über alle Funktionalitäten gebildet. Den Angaben zur Veränderung der Eintrittshäufigkeit und der Ausfalldauer werden über Matrizen Werte zwischen -3 und +3 zugeordnet. Danach findet eine Mittelung über alle Gefährdungen statt. Die Resilienz Wirkung ergibt sich als Summe aus den gemittelten Werten des Funktionalitätsverlusts, der Eintrittshäufigkeit und der Ausfalldauer.

**Hochwasserschutzdamm**

Bitte beurteilen Sie den Einfluss der Maßnahme auf die kritischen Objekte im Vergleich zum Zustand ohne Massnahme.

**Funktionalität**

	Einfluss auf Funktionalität	Gewichtung [%]
Wirtschaftliche Aspekte		70
Reise- und Transportzeiten ⓘ	0 Punkte	35
Kapazität im Netz ⓘ	0 Punkte	10

Bild 8-19: Keine Veränderung des Funktionalitätsverlusts im Ereignisfall

- Einfluss der Maßnahme auf die Eintrittshäufigkeit: Die Maßnahme reduziert die Eintrittshäufigkeit des gewählten Referenzszenarios. Die Häufigkeit der entsprechenden Gefährdung ist im IT-Tool anzupassen. Die übrigen Werte für die anderen Gefährdungen müssen nicht angepasst werden respektive es sind keine Eingaben notwendig, da standardmäßig die Werte aus der Vulnerabilitätsanalyse für den Zustand ohne Maßnahme eingefügt sind.

Häufigkeit der Gefährdung ⓘ

Hydrologische Gefahren: Weniger als 1 Ereignis in 100 Jahren

Bild 8-20: Anpassung der Häufigkeit der Gefährdung

- Einfluss der Maßnahme auf die Dauer der Unterbrechung: Die Maßnahme reduziert die Eintrittshäufigkeit des gewählten Referenzszenarios, nicht jedoch dessen Auswirkung. Die Maßnahme hat somit keinen Einfluss auf die Dauer der Unterbrechung. Die Werte für die Dauer der Unterbrechung sind somit dieselben wie für den Zustand ohne Maßnahme. Es ist keine Eingaben notwendig, da standardmäßig die Werte aus der Vulnerabilitätsanalyse für den Zustand ohne Maßnahme bereits eingefügt sind.

### Maßnahme 2 - Alternative Route:

Der Neubau einer alternativen Route bietet eine Umfahrungsmöglichkeit bei einer potenziellen Straßensperrung.

- Einfluss der Maßnahme auf den Funktionalitätsverlust: Kommt es zu einem Ereignis hat die Maßnahme einen Einfluss auf den Funktionalitätsverlust, in dem sie die Dauer respektive Länge der Umfahrungsstrecke verkürzt. Sie reduziert somit beispielsweise die Reise- und Transportkosten und die Betriebskosten und erhöht die Kapazität im Netz. Zudem kann sie die ausfallbedingte Nicht-Erreichbarkeit von Wirtschaftsstandorten verhindern (Wertschöpfungseffekte). Gleichzeitig wirkt sich der Neubau einer Straße negativ auf die Funktionalitäten „Beeinträchtigung durch das Bauwerk“ und „Landschafts- und Ortsbild“ aus. Die konkrete Bewertung hängt von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahme und den Umgebungsbedingungen ab und ist im spezifischen Anwendungsfall zu bestimmen.

**Alternative Route**

Bitte beurteilen Sie den Einfluss der Maßnahme auf die kritischen Objekte im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme.

**Funktionalität**

	Einfluss auf Funktionalität	Gewichtung [%]
<b>Wirtschaftliche Aspekte</b>		70
Reise- und Transportzeiten	3 Punkte	35
Kapazität im Netz	2 Punkte	10
Betriebskosten	3 Punkte	15
Innerörtliche Trennwirkung	2 Punkte	5
Wertschöpfungseffekte	2 Punkte	35
<b>Verkehrssicherheit</b>		20
Unfallkosten	1 Punkt	100
<b>Umwelt</b>		10
Luftschadstoffemissionen und Treibhausgasemissionen	1 Punkt	40
Lärmbelastung	1 Punkt	30
Beeinträchtigung durch das Bauwerk	-2 Punkte	20
Landschafts- und Ortsbild	-2 Punkte	10

Bild 8-21: Beispielhafte Bewertung der Funktionalitätsveränderungen

- Einfluss der Maßnahme auf die Eintrittshäufigkeit: Eine alternative Route hat im Normalfall keinen Einfluss auf die Eintrittshäufigkeit der Gefährdungen. Spezialfälle sind denkbar, in dem z. B. die Attraktivität eines Bauwerks für einen Sabotageakt abnimmt, falls eine Alternativroute zur Verfügung steht. Es sind keine Eingaben notwendig, da standardmäßig die Werte aus der Vulnerabilitätsanalyse für den Zustand ohne Maßnahme eingefügt sind.
- Einfluss der Maßnahme auf die Dauer der Unterbrechung: Inwiefern der Bau einer alternativen Route die Dauer der Unterbrechung reduziert, ist vom Einzelfall abhängig. Es wäre beispielsweise denkbar, dass das Vorhandensein einer alternativen Route es erlaubt im Ereignisfall das betroffene Objekt respektive den betroffenen Streckenabschnitt komplett zu sperren und so Reparaturarbeiten schneller durchzuführen, als wenn die Straße aufgrund fehlender Alternativen weiter im einspurigen Betrieb betrieben werden muss. Die Bewertung hängt auch hier von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahme und den Umgebungsbedingungen ab und ist im spezifischen Anwendungsfall zu bestimmen.

**Resilienzwirkung:**

Im fiktiven Beispiel erzielt die alternative Route eine höhere Resilienz Wirkung als der Hochwasserschutzdamm.


 Untergrund	! ^
<b>Alternative Route</b>	Resilienzwirkung <b>1,96</b> v
<b>Hochwasserschutzdamm</b>	Resilienzwirkung <b>0,17</b> v

Bild 8-22: Resilienz Wirkung der zwei Beispielmaßnahmen im Vergleich.

**8.3.7 Resilienzoptimierung****Beschreibung und Ziel**

Die Resilienzoptimierung hat zum Ziel, dass auf Grundlage der ermittelten Resilienz Wirkung und unter Berücksichtigung einer Kosten-Wirksamkeits-Betrachtung sowie weiterer Parameter, eine Priorisierung der Maßnahmen pro Objekt erstellt werden kann

**Vorgehen**

1. Die Anwender können im oberen Teil die Eingaben zu Parametern wie beispielsweise Lebensdauer, Kosten<sup>15</sup> oder Zeithorizont machen. Anders als bei den vorangehenden Schritten stehen in diesem Fall keine vorgegebenen Antworten in Dropdownlisten zur Verfügung, sondern er ist gänzlich frei in der Eingabe (es wird allerdings überprüft, dass nur korrekte Werte eingetragen werden können – es ist somit nicht möglich, in ein Feld, welches Zahlenwerte erwartet, Text einzugeben).
2. Die Anwender können auswählen, nach welchen Kriterien die Rangliste erstellt werden soll. Er hat dabei die Auswahl zwischen der Resilienz Wirkung, der Kostenwirksamkeit, dem Realisierungshorizont, der Realisierungswahrscheinlichkeit oder einer Rangliste, welche alle Kriterien gleichermaßen mitberücksichtigt.

**Resultat**

Als Resultat erhalten die Anwender eine Rangliste der Maßnahmen pro Objekt, basierend auf dem von ihm ausgewählten Beurteilungskriterium.

<sup>15</sup> Der hinterlegte Zinssatz in Höhe von 1,7 % bezieht sich auf den aktuellen Bundesverkehrswegeplan 2030.



## Beispiel

## Maßnahme 1 - Schutzmaßnahme Hochwasser

**Hochwasserschutzdamm**

Lebensdauer [a]\*

Kosten

Investition [EUR]\*

Unterhalt jährlich [EUR]\*  Betrieb jährlich [EUR]\*

Realisierung

Zeitlicher Horizont [a]\*  Wahrscheinlichkeit [%]\*

Jährliche Gesamtkosten [EUR/a]  Zinssatz [%]

Kostenwirksamkeit [Wirkung/Mio.EUR]  Resilienzwirkung

Bild 8-23: Zusätzliche Angaben zu Maßnahme 1.

## Maßnahme 2 - Alternative Route

**Alternative Route**

Lebensdauer [a]\*

Kosten

Investition [EUR]\*

Unterhalt jährlich [EUR]\*  Betrieb jährlich [EUR]\*

Realisierung

Zeitlicher Horizont [a]\*  Wahrscheinlichkeit [%]\*

Jährliche Gesamtkosten [EUR/a]  Zinssatz [%]

Kostenwirksamkeit [Wirkung/Mio.EUR]  Resilienzwirkung

Bild 8-24: Zusätzliche Angaben zu Maßnahme 2.

**Rangliste:**

Wird allein die Resilienz Wirkung für die Beurteilung herangezogen, liegt – im vorliegenden fiktiven Beispiel – die Maßnahme Alternative Route auf Rang 1. Werden allerdings auch Kosten, Realisierungshorizont und Realisierungswahrscheinlichkeit miteinbezogen, dreht sich die Reihenfolge um.

Rangliste					
Methode	Rang nach Resilienz Wirkung				
Maßnahme	Resilienz- wirkung	Kosten- wirksamkeit	Realisierungs- horizont [a]	Realisierungswahr- scheinlichkeit [%]	Rang
Alternative Route	1,96	5,53	15	30	1
Hochwasserschutzdamm	0,17	5,63	5	50	2

Rangliste					
Methode	Rang über alle Kriterien				
Maßnahme	Resilienz- wirkung	Kosten- wirksamkeit	Realisierungs- horizont [a]	Realisierungswahr- scheinlichkeit [%]	Rang
Hochwasserschutzdamm	0,17	5,63	5	50	1
Alternative Route	1,96	5,53	15	30	2

Bild 8-25: Rangliste der beiden Maßnahmen mit Rang nach Resilienz Wirkung (oben) und über alle Kriterien (unten).

## 9 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

### 9.1 Schlussfolgerungen

Das Gesamtziel des Projekts war es den bestehenden methodischen Ansatz zur Bewertung der Resilienz von Straßeninfrastrukturen zu optimieren und weiterzuentwickeln und Grundvoraussetzungen für eine Implementierung in die Praxis zu schaffen.

#### Meilenstein für den Transfer von der Forschung in die Praxis

Mit den methodischen Weiterentwicklungen und der Schaffung eines IT-Tools wurden wichtige Meilensteine für eine Überführung der theoretischen Konzepte aus der Forschung in die Praxis und somit für die Integration einer Resilienzbewertung als fester Bestandteil des Verkehrsinfrastrukturmanagements erreicht. Methodik und IT-Tool stellen eine wichtige Grundlage für ein ganzheitliches, systematisches Management dar, das die übergeordnete Systemresilienz beurteilt und die Beurteilung von Maßnahmen hinsichtlich ihres Beitrags zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur ermöglicht. Das Implementierungskonzept und der Benutzerleitfaden liefern ebenfalls wertvolle

Hinweise und Ansatzpunkte zur Verankerung in der Praxis.

#### Beurteilung von Maßnahmen hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung

Das IT-Tool ermöglicht eine Grobbeurteilung von Maßnahmen hinsichtlich ihres Beitrags zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der Straßenverkehrsinfrastruktur. Im Ergebnis resultiert somit aus den Resilienzbewertungen eine Liste ergänzender oder angepasster Maßnahmen des Fachbereichs, die aus Sicht des Funktionserhalts des Streckenabschnitts und/oder der Infrastrukturelemente in Frage kommen und eine zugehörige pragmatische Bewertung. Als zweckmäßig beurteilte zusätzliche Maßnahmen, die einerseits verhältnismäßig einfach umzusetzen sind und keine maßgeblichen Kostenfolgen nach sich ziehen und andererseits im Zuständigkeitsbereich des jeweiligen Fachbereichs liegen, sollen nach Möglichkeit direkt in die Maßnahmenplanung aufgenommen werden. Daneben resultieren aus der Analyse potenziell geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Resilienz, deren Zweckmäßigkeit und Verhältnismäßigkeit in einem weiteren Schritt vertieft analysiert werden sollten. Dies sind typischerweise kostenintensive Maßnahmen oder solche, die in der Umsetzung zum Bei-

spiel aufgrund von notwendigen Genehmigungen oder Koordination mit unterschiedlichen Aufgabenträgern sehr aufwendig sind. Bei Bedarf respektive bei Unsicherheit zu spezifischen Eingangsdaten können über Sensitivitätsbetrachtungen der Einfluss und die Wirkungen z. B. von spezifischen Maßnahmen abgeschätzt werden.

Die Resilienzbewertung basiert auf in der Regel einfach verfügbaren Informationen und Daten oder auf pragmatischen Einschätzungen durch die Anwender. Es kann für die Anwender hilfreich sein entsprechende Fachbereiche respektive Experten (z. B. Einsatzorganisationen) beizuziehen, da gewisse Fragen oder Maßnahmen nicht im (alleinigen) Verantwortungsbereich der Straßenbauverwaltungen liegen. Dadurch werden nebenbei die Vernetzung zwischen den für den Funktionserhalt der Straßenverkehrsinfrastruktur relevanten Akteuren gefördert und Schnittstellen aktiv bewirtschaftet. Dies wirkt sich im Ereignisfall wiederum positiv auf die Resilienz des Systems aus.

### **Umgang mit Ergebnissen und Ungenauigkeiten**

Das Verfahren nimmt bewusst in Kauf, dass mit pragmatischen Einschätzungen Unschärfen in der Bewertung einhergehen. Ziel und Zweck des Verfahrens ist eine erste Einschätzung der Resilienz und der Wirkung respektive Priorisierung von Resilienzerhöhenden Maßnahmen in einer pragmatischen und anwendungsfreundlichen Weise. Die Ergebnisse aus der Resilienzbewertung geben den Anwendern Aufschluss darüber, wie die Resilienz für den untersuchten Streckenabschnitt zu beurteilen ist, ob Handlungsbedarf hinsichtlich Verbesserung der Resilienz besteht und welche Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz im Vordergrund stehen. Die Anwendungsergebnisse können – aufgrund der oben angesprochenen Unschärfen – noch keine Grundlage für eine eigentliche Maßnahmenplanung darstellen. Vielmehr sind sie Ausgangslage, um den Handlungsbedarf auszuweisen und bei Bedarf in einer vertiefenden Betrachtung eine gezielte und detaillierte Ermittlung der Resilienzwirkung von potenziell effektiven und effizienten Maßnahmen zu analysieren. Wie eine derartige Detailanalyse aussehen könnte, wäre Bestandteil weiterer Untersuchungen.

### **Übertragbarkeit auf Schiene und Wasserstraße**

Im Rahmen des Projekts fanden erste Überlegungen zur Übertragbarkeit der Methodik auf die Ver-

kehrsträger Schiene und Wasserstraße statt. Auf der Basis eines Anwenderdialogs mit Experten der beiden Verkehrsträger wurde ein erstes Konzept für eine mögliche Übertragung der entwickelten Methodik skizziert. Dazu wurden zunächst allgemeine Besonderheiten der beiden Verkehrsträger herausgearbeitet. Anschließend wurden die zu berücksichtigenden Aspekte der beiden Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße für die einzelnen Schritte der Methodik aus inhaltlicher und prozessualer Sicht herausgestellt. Im Zusammenhang mit einer Übertragung der Methodik auf die beiden Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße stellt sich die generelle Frage der institutionellen Verankerung. Konkret wäre zu klären, welche Institution(en) für die verkehrsträgerübergreifende Weiterentwicklung der Methodik sowie die jeweils verkehrsträgerspezifischen Anpassungen und Anwendungen der Verfahren zuständig sein sollten.

## **9.2 Empfehlungen und Ausblick**

Die nachfolgenden Empfehlungen beziehen sich auf die konkrete Implementierung in die Praxis und auf die inhaltliche und technische Weiterentwicklung von Methodik und IT-Tool. Im Rahmen eines Anwenderdialogs wurde das IT-Tool mit Vertretern des Landesbetriebs Straßenbau und Verkehr, Schleswig-Holstein einem ersten Praxistest unterzogen.<sup>16</sup> Den potenziellen Anwendern wurde die dem IT-Tool zugrunde liegende Methodik sowie das IT-Tool und dessen Funktionalitäten vorgestellt. Anhand eines realen Streckenabschnitts wurden Vulnerabilität und Resilienz im heutigen Zustand beurteilt und beispielhaft eine Maßnahme hinsichtlich ihrer Resilienzwirkung bewertet. Die Ergebnisse aus dem Anwenderdialog sind in den untenstehenden Empfehlungen berücksichtigt.

### **Implementierung in die Praxis**

Das im Rahmen des Projekts entworfene Implementierungskonzept zeigt auf, welche Kanäle gespielt werden können, um den Anwendern die Methodik und das IT-Tool näherzubringen. Diese Hinweise gilt es nun auszuarbeiten. Konkret bedeutet dies:

- **Erarbeitung eines Umsetzungsplan:**  
Ziele, Aufgaben sowie Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten für Information und Kommunikation sowie für Aus- und Weiterbildung sollen ausgearbeitet und in einem Umsetzungsplan festgehalten werden. Dieser sollte auch einen

<sup>16</sup> Telefonischer Austausch vom 28.03.2022.



Zeitplan für die Umsetzung der definierten Aufgaben sowie ein Konzept zur Überprüfung der Zielerreichung enthalten. Es gilt insbesondere festzulegen wie und in welcher Art die im Implementierungskonzept genannten Kanäle bespielt werden sollen. Konkret ist zu planen, wie das IT-Tool im Rahmen von Pilotprojekten eingesetzt werden kann um potenzielle Anwender damit vertraut zu machen und erste Anwendungserfahrungen aus der Praxis zu sammeln.

- **Bereitstellen von Materialien für Information und Kommunikation:**

Für die Information über die Webseite sowie über Newsletter sind die entsprechenden Inhalte aufzuarbeiten. Dabei sollte der Einbezug von Kommunikationsexperten angedacht werden, um die Inhalte für die Zielgruppe möglichst attraktiv und informativ zu präsentieren.

- **Erarbeitung von Inhalten für die Aus- und Weiterbildung:**

Weiter sind die entsprechenden Inhalte (Schulungsunterlagen, Webinare, etc.) für die Aus- und Weiterbildung zu erarbeiten. Erklärvideos können bei der Anwendung des Benutzerleitfadens unterstützen. Auch hier wäre der Einbezug von Kommunikationsexperten anzudenken.

- **Rückmeldungen und Erfahrungen einholen:**

Längerfristig sollten Nutzerbewertungen und Nutzerakzeptanz erhoben werden. Dabei gilt es sowohl methodischen als auch technischen Weiterentwicklungsbedarf und Verbesserungsmöglichkeiten zu sammeln. Die Anwendungserfahrungen sollten ausgewertet und wo sinnvoll umgesetzt werden. Einen Mehrwert für die Anwender kann auch durch die Organisation eines Erfahrungsaustausches schaffen, an dem sich die Anwender untereinander austauschen können.

### **Inhaltliche und technische Weiterentwicklung von Methodik und IT-Tool**

Aus der Anwendung in der Praxis wird sich sowohl inhaltlicher als auch technischer Anpassungsbedarf ergeben. Diesen gilt es zusammenzutragen, zu prüfen und wo sinnvoll umzusetzen. Dies könnte beispielsweise die Präzisierung der Antwortmöglichkeiten im Resilienzscreening sein, die Ergänzung eines GIS-Teils, wo die Abschnitte/Bauwerke geographisch verortet werden können oder Anpassungen hinsichtlich Handling, Eingabe oder Layout. Sicherzustellen sind auch der Betrieb und die Wartung des IT-Tools und der Webseite.

### **Übertragung von Methodik und IT-Tool auf Schiene und Wasserstraße**

Im Bereich der Übertragung der Methodik auf die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße und die Implementierung in ein IT-Tool sollten die bereits angestellten Überlegungen zur verkehrsübergreifenden Resilienzbewertung und -planung fortgeführt werden. Konkret sind die folgenden Punkte mit Vertretern der beiden Verkehrsträger auszuarbeiten, bevor ein IT-Tool für Schiene und Wasserstraße umgesetzt werden kann:

- **Vulnerabilitätsanalyse:**

Es sollten vertiefende Untersuchungen zu den relevanten Gefährdungen der beiden Verkehrsträger durchgeführt und entsprechende Anpassungen vorgenommen werden. Auch sollten die Kritikalitätskriterien überprüft und an die beiden Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße angepasst werden.

- **Resilienzscreening:**

Der Kriterienkatalog und die Antwortmöglichkeiten sind anzupassen, insbesondere für die Wasserstraße.

- **Maßnahmenkatalog:**

Es gilt zu prüfen welche Maßnahmen aus dem bestehenden Maßnahmenkatalog übernommen werden können respektive welche Maßnahmen neu aufgenommen werden müssen.

- **Resilienzbewertung:**

Die Systemfunktionalitäten für die beiden Verkehrsträger sind festzulegen. Insbesondere für die Wasserstraße sollte berücksichtigt werden, dass diese zahlreiche weitere Funktionalitäten erfüllt, welche über die reine Transportfunktion hinausgehen (z. B. Lebensraum für Wassertiere, Erholung, etc.).

- **Resilienzoptimierung:**

Insbesondere für die Wasserstraße sollte überlegt werden, inwiefern weitere Grenzwerte (z. B. minimal zu erreichende Verkehrsleistung pro Wasserstraße, etc.) definiert und bei der Priorisierung berücksichtigt werden sollten.

Diese Anpassungen sind gemeinsam mit Experten der beiden Verkehrsträger vorzunehmen.

## Literatur

Die Literaturliste stellt eine themenspezifische Selektion wichtiger Literaturstellen dar und ist nicht abschließend. Sie umfasst wissenschaftliche Publikationen, Forschungsprojekte sowie technische Berichte.

- [1] ALIPOUR, A. (2017). Enhancing Resilience of Bridges to Extreme Events by Rapid Damage Assessment and Response Strategies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2604, 54–62.
- [2] AllTrain Konsortium (2015). All-Hazard Guide für Transportinfrastrukturen. <http://www.alltrain-project.eu/>
- [3] AMOANING-YANKSON, S., & AMEKUDZI-KENNEDY, A. (2017). Transportation System Resilience. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2604, 28–36.
- [4] AVEN, T. (2011). On Some Recent Definitions and Analysis Frameworks for Risk, Vulnerability, and Resilience. *Risk Analysis*, 31(4), 515–522.
- [5] BRABHAHARAN, P. (2006). Recent advances in improving the resilience of road networks. In 2006 New Zealand Society of Earthquake Engineering (NZSEE) Conference.
- [6] BRUNEAU, M., CHANG, S. E., EGUCHI, R. T., LEE, G. C., O'ROURKE, T. D., REINHORN, A. M., VON WINTERFELDT, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*, 19(4), 733–752.
- [7] Bundesministerium des Innern, BMI (2009). Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie).
- [8] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI (2015). Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung.
- [9] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI (2006). Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs.
- [10] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI (2016). Bundesverkehrswegeplan 2030.
- [11] CLAVIN, C., PETROPOULOS (2017). Case Studies of Community Resilience and Disaster Recovery from the 2013 Boulder County Floods.
- [12] COAFFEE, J. (2013). Rescaling and responsabilising the politics of urban resilience: From national security to local place-making.
- [13] COAFFEE, J., WOOD, D., ROGERS, P., & WOOD, D. (2008). The Everyday Resilience of the City: how cities respond to terrorism and disaster.
- [14] COCONEA, L., DELOUKAS, A., APOSTOLOPOULOU, E., CIGHERI, S., CANDELIERI, A., ZAMICHOS, A., LEUTERITZ, J. P. (2018). European Resilience Management Guidelines.
- [15] CUTTER, S. L., BURTON, C. G., & EMRICH, C. T. (2010). Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 7(1).
- [16] CUTTER, S., BORUFF, B., & SHIRLEY, W. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*.
- [17] DARWIN Konsortium (2018). Expecting the unexpected and know how to respond. <https://h2020darwin.eu/>
- [18] DEUBLEIN, M., BRUNS F., ROTH, F. & ZULAUF, C. (2017). Stand der Technik hinsichtlich der Bewertung von Resilienzmaßnahmen, BAST-Forschungsbericht FE 89.0320/2016.
- [19] DEUBLEIN, M., ROTH, F., BRUNS, F. & ZULAUF, C. (2020). Reaktion- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 165, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach. <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/2514>

- [20] Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit, GIZ (2014). Assessing and Monitoring Climate Resilience - From Theoretical Considerations to Practically Applicable Tools - A Discussion Paper.
- [21] EBINGER, J. O., & VANDYCKE, N. (2015). Moving Towards Climate-Resilient Transport. World Bank, Washington, DC.
- [22] EDWARDS, C. (2009). Resilient nation.
- [23] European Commission (1996). Cost-benefit and multi-criteria analysis for new road construction. Office for Official Publications of the European Communities.
- [24] European Commission (2018). White Paper on Resilience Management Guidelines for Critical Infrastructures. From theory to practice by engaging end-users: concepts, interventions, tools and methods. DRS-07-2014.
- [25] FAHRMEIR, L., HEUMANN, C., KÜNSTLER, R., PIGEOT, I., & TUTZ, G. (2016). Statistik: Der Weg zur Datenanalyse. Springer-Verlag.
- [26] FEHRL (2017). The Resilient Road - A Roadmap for Research. An Element of the Forever Open Road Programme.
- [27] FEKETE, A., HUFSCHEMIDT, G., BLANKGORKI, V., BLONIARZ, R., BLÜMEL, M., EDBAUER, L., TZAVELLA, K. (2016). Atlas der Verwundbarkeit und Resilienz – Pilotausgabe zu Deutschland, Österreich, Liechtenstein und Schweiz. Köln, Bonn.
- [28] FORSEE Konsortium (2020). Future proofing strategies for resilient transport networks against Extreme Events. <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-transport/infrastructure/foresee>
- [29] Fraunhofer EMI (2018). FE 15.0627/2016/ARB: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen, 2. Entwurf Schlussbericht.
- [30] FREI, R., MCWILLIAM, R., DERRICK, B., PURVIS, A., TIWARI, A., & DI MARZO SERUGENDO, G. (2013). Self-healing and self-repairing technologies. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 69(5–8), 1033–1061.
- [31] FRITZSCHE, K., SCHNEIDERBAUER, S., BUBECK, P., KIENBERGER, S., BUTH, M., ZEBISCH, M., KAHLENBORN, W., KABISCH, S., WOJTKIEWICZ, W., RICHTER, C., & BECKER, D. (2014). The Vulnerability Sourcebook. Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- [32] GALLOPÍN, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), 293–303.
- [33] GARCÍA, P., & PAPÍ, J. F. (2015). Towards climate-resilient transportation infrastructures. Smart Transportation Alliance (sta).
- [34] GILBERT, S. W. (2016). Disaster resilience: A guide to the literature. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- [35] GILBERT, S. W., BUTRY, D. T., HELGESON & J. F., CHAPMAN, R. E. (2015). Community resilience economic decision guide for buildings and infrastructure systems. NIST Special Publication, 1197.
- [36] GRANT-MULLER, S. M., MACKIE, P., NELLTHORP, J., & PEARMAN, A. (2001). Economic appraisal of European transport projects: The state-of-the-art revisited. *Transport Reviews*, 21(2), 237–261.
- [37] GUSTAVSSON, R., & STÅHL, B. (2009). Self-healing and Resilient Critical Infrastructures (pp. 84–94). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [38] HAAS, R., FELIO, G., LOUNIS, Z., & FALLS, L. (2009). Measurable performance indicators for roads: Canadian and international practice. In «Best Practices in Urban Transportation Planning: Measuring Change” Session at the 2009 Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Vancouver, British Columbia.
- [39] HAGMANN, J. (2012). 3 RG REPORT Factsheet Neue Gefahrenkonzepte in der in-

- ternationalen Sicherheitsanalyse. Zurich, Switzerland.
- [40] HERRERA, E. K., FLANNERY, A., & KRIMMER, M. (2017). Risk and Resilience Analysis for Highway Assets. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2604, 1–8.
- [41] HERZOG, M. & ROTH, F. (2013). Dritter Trilateraler Workshop D-A-CH - Schutz Kritischer Infrastrukturen, CSS Tagungsbericht.
- [42] HUGHES, J., & HEALY, K (2014). Measuring the resilience of transport infrastructure - NZ Transport Agency research report 546.
- [43] HYNES, M. W., PURCELL, S. M., WALSH, S. D., & EHIMEN, E. (2016). Formalizing Resilience Concepts for Critical Infrastructure. In IRGC (Ed.), *EU Research Project RESILENS, Resource Guide on Resilience*. Lausanne: EPFL International Risk Governance Center.
- [44] IMPROVER Konsortium (2018). Improved risk evaluation and implementation of resilience concepts to critical infrastructure. <http://www.improverproject.eu>
- [45] INTACT Konsortium (2017). Impact of extreme weather on critical infrastructure.
- [46] Joint Committee of Structural Safety, JCSS (2010). *Risk Assessment in Engineering*.
- [47] JONES, H., MOURA, F., & DOMINGOS, T. (2014). Transport infrastructure project evaluation using cost - benefit analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111, 400–409.
- [48] KIM, S., & YEO, H. (2016). A Flow-based Vulnerability Measure for the Resilience of Urban Road Network. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 218, 13–23.
- [49] KRIEGER, J.: Risiko- und Resilienzmanagement im Kontext von Asset Management, in: *Straße und Autobahn*, 7.2020, S. 582-590
- [50] KRÖGER, W. (2011). An Overview of Swiss Research on Vulnerability of Critical Infrastructure. *European Perspectives on Security Research*.
- [51] LEE, D. (2000). Methods for evaluation of transportation projects in the USA. *Transport Policy* (Vol. 7).
- [52] Lloyd's. (2017). *Future Cities: Building infrastructure resilience. Emerging Risk Report 2017*.
- [53] MACHADO-LEÓN, J. L., & GOODCHILD, A. (2017). Review of Performance Metrics for Community-Based Planning for Resilience of the Transportation System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2604, 44–53.
- [54] MASON, D., & BRABHAHARAN, P. (2016). *National State Highway Resilience. 9 Priority Programme Business Case Corridors*. NZ Transport Agency.
- [55] MASSOUD AMIN, S. (2008). Resilience and Self-healing Challenge: Present/Possible Futures. In *CRITIS'08, 3rd International Workshop on Critical Information Infrastructures Security*.
- [56] MEISSNER, J. O. (2018). Risikomanagement und Organisationale Resilienz. In *Ganzheitliches Chancen- und Risikomanagement* (pp. 29–59). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [57] MAYER, G., GROSSMANN, S., ZULAUF, C., ROTH, F., DEUBLEIN, M., KOHL, B., KAMMERER, H., DAHL, A. (2020). Resilienz der Straßenverkehrsinfrastruktur – Stand der Forschung und Potenziale im Management von außergewöhnlichen Ereignissen, *BAST-Forschungsbericht FE 01.0199/2017/ARB* (unveröffentlicht).
- [58] MICHEL, B. (2000). Methods of transport projects evaluation. *From Cost-Benefit to Multicriteria and Decision*.
- [59] MONEY, C., BITTLE, N., MAKAN, R., REINEN-HAMILL, R., & CORNISH, M. (2017). *Establishing the value of resilience*. NZ Transport Agency research report 614.
- [60] MORISUGI, H. (2000). Evaluation methodologies of transportation projects in Japan. *Transport Policy*, 7(1), 35–40.
- [61] PANOPTIS Konsortium (2020). [http://www.panopyear/2021/tis.eu/?page\\_id=154](http://www.panopyear/2021/tis.eu/?page_id=154)

- [62] POSNER, R. A. (2004). *Catastrophe: risk and response*. Oxford University Press.
- [63] PRIOR, T. (2015). *Measuring Critical Infrastructure Resilience: Possible Indicators, Risk and Resilience Report 9*.
- [64] PRIOR, T., & HAGMANN, J. (2012). *Measuring Resilience: Benefits and Limitations of Resilience Indices*.
- [65] PRIOR, T., & HERZOG, M. (2013). *The Practical Application of Resilience: Resilience Manifestation and Expression, Risk Factsheet 9*.
- [66] PRIOR, T., & ROTH, F. (2013). *Disaster, resilience and security in global cities*. *Journal of Strategic Security*.
- [67] PROAG, S., & PROAG, V. (2014). *The cost benefit analysis of providing resilience*. *Procedia Economics and Finance*, 18, 361–368.
- [68] RAIN Konsortium (2017). *Risk analysis of infrastructure networks in response to extreme weather*. <https://www.rain-project.eu>
- [69] RAINEX Konsortium (2016). *Risk-based approach for the protection of land transport infrastructure against extreme rainfall*. <http://www.rainex-project.eu/>
- [70] RANOUS, R. A. (2012). *A Compendium of Best Practices and Lessons Learned for Improving Local Community Recovery from Disastrous Hazardous Materials Transportation Incidents*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- [71] RESILENS Konsortium (2016). *Realising European resilience for critical infrastructure*. <http://www.resilens.eu>
- [72] RESIST Konsortium (2020). *Resilient transport infrastructure to extreme events*. <https://www.resistproject.eu/>
- [73] RESISTO Konsortium (2020). *Resilience enhancement and risk control platform for communication infrastructure operators*. <http://www.resistoproject.eu/>
- [74] RESOLUTE Konsortium (2016). *Resilience management guidelines and operationalization applied to urban transport environment*. <http://www.resolute-eu.org>
- [75] ROSE, A. (2015). *Measuring Economic Resilience: Recent Advances and Future Priorities*.
- [76] ROTHENGATTER, W. (2017). *Erweiterte wirtschaftliche Folgewirkungen von Verkehrsinvestitionen - Wider Economic Impacts*. *Zeitschrift für Verkehrswissenschaft*, 88(1), 1–20.
- [77] SAFEWAY Konsortium (2020). *GIS-based Infrastructure Management System for Optimized Response to Extreme Events on Terrestrial Transport Networks*. <https://www.safeway-project.eu/en>
- [78] SAIC (2002). *A Guide to Highway Vulnerability Assessment for Critical Asset Identification and Protection Prepared for The American Association of State Highway and Transportation Officials' Security Task Force as National Cooperative Highway Research Program Project*.
- [79] Schweizerische Bundesamt für Verkehr, BAV (2016). *NIBA: Nachhaltigkeitsindikatoren für Bahninfrastrukturprojekte*.
- [80] Schweizerisches Bundesamt für Bevölkerungsschutz, BABS (2013). *Katalog Möglicher Gefährdungen - Grundlage Für Gefährdungsanalysen*.
- [81] Schweizerisches Bundesamt für Straßen ASTRA (2014). *ASTRA 19003: Management von Naturgefahren auf den Nationalstrassen*.
- [82] Schweizerisches Bundesamt für Straßen, ASTRA (2003). *NISTRAS: Nachhaltigkeitsindikatoren für Straßeninfrastrukturprojekte*.
- [83] Schweizerisches Bundesamt für Straßen, ASTRA (2012). *Naturgefahren auf den Nationalstrassen: Risikokzept*.
- [84] Schweizerisches Bundesamt für Strassen, ASTRA (2012). *Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen*.
- [85] SECMAN Konsortium (2013). *Security manual for European road infrastructure*.

- <https://www.elea.si/en/portfolio/the-secman-research-project>
- [86] SeRoN Konsortium (2012). Security of Road transport Networks.
- [87] SKRIBT Konsortium (2011). Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen.
- [88] Smart Resilience (2016). Smart Resilience Indicators for Smart Critical Infrastructure.
- [89] SMR Konsortium (2018). Smart Mature Resilience. <http://smr-project.eu/home/>
- [90] STREST Konsortium (2013). Harmonized approach to stress tests for critical infrastructures against natural hazards. <http://www.strest-eu.org/>
- [91] TCRP. Improving the Resiliency of Transit Systems Threatened by Natural Disasters.
- [92] The Institution of Engineering and Technology, IET (2014). Infrastructure Risk and Resilience: Managing Complexity and Uncertainty in Developing Cities.
- [93] THOMA, K. (2014). 'Resilience-by-Design': Strategie für die technologischen Zukunftsthemen, acatech STUDIE.
- [94] Transportation Research Board, TRB (2006). Making Transportation Tunnels Safe and Secure. Washington, D.C.: Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/13965>
- [95] Transportation Research Board, TRB (2017). Resilience: Key Products & Projects.
- [96] Transportation Research Board, TRB (2017). Transportation Systems Resilience - Preparation, Recovery and Adaptation.
- [97] TURRÓ, M. (2001). Evaluation of transport projects in the European Investment Bank. Integrated Transport Infrastructure Planning in Europe.
- [98] UK Department for Transport (2014). Government Response to the Transport Resilience Review.
- [99] VUGRIN, E. D., WARREN, D. E., EHLEN, M. A., & CAMPHOUSE, R. C. (2010). A Framework for Assessing the Resilience of Infrastructure and Economic Systems. In Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems (pp. 77–116). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [100] WELLE, T., WITTING, M., BIRKMANN, J., & BROSSMANN, M. (2014). Assessing and Monitoring Climate Resilience. From Theoretical Considerations to Practically Applicable Tools – A Discussion Paper. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- [101] WINK, R. (Ed.) (2016). Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung (Studien zur Resilienzforschung). Springer Gabler.
- [102] World Energy Council (2015). World Energy Perspective: The road to resilience - managing and financing extrem weather risks.
- [103] ZHANG, W., & WANG, N. (2016). Resilience-based risk mitigation for road networks. Structural Safety, 62, 57-65.
- [104] ZHANG, W., WANG, N., & Nicholson, C. (2017). Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks. Structure and Infrastructure Engineering, 13(11), 1404–1413.

## Bilder

- Bild 2-1: Einordnung von Forschungsprojekten in die Schritte des Resilienzmanagementzyklus gemäß DEUBLEIN et al. (2020) [19] und MAYER et al. (2020) [57]
- Bild 2-2: Vereinfachte Funktionalitätskurve eines Systems. Der Resilienzverlust entspricht dem Verlust der Funktionsfähigkeit über die Zeit.  $\Delta F$  ist der maximale Funktionsfähigkeitsverlust bei einer Störung und  $\Delta t$  die Zeit, bis sich das System vollständig erholt hat. Maßnahmen können ebenfalls die Eintrittshäufigkeit eines disruptiven Ereignisses und somit die Häufigkeit eines Funktionsfähigkeitsabfalls reduzieren (nicht in der Abbildung dargestellt) (DEUBLEIN et al. (2020) [19])

- Bild 2-3: Resilienzyklus mit den fünf Ansatzpunkten zur Erhöhung der Resilienz eines Systems (THOMA (2014) [93], adaptiert von DEUBLEIN et al. (2020) [19])
- Bild 2-4: Schematische Darstellung der drei Kernschritte der Resilienzbewertung gemäß DEUBLEIN et al. (2020) [19]
- Bild 2-5: Resilienzmanagementzyklus gemäß DEUBLEIN et al. (2020) [19]
- Bild 4-1: Schematische Darstellung zum Prozess der Resilienzbewertung
- Bild 7-1: Drei Pfeiler des Implementierungskonzepts
- Bild 8-1: Navigation innerhalb des IT-Tools
- Bild 8-2: Buttons zur Vorwärts- und Rückwärtsnavigation
- Bild 8-3: Validierung der Angaben. Felder mit fehlerhaften Werten oder fehlenden Angaben werden rot markiert
- Bild 8-4: Speicher-Button zur lokalen Speicherung der Eingaben
- Bild 8-5: Je nach Browser-Einstellung erscheint ein Popup-Fenster beim Speichern der Eingaben
- Bild 8-6: Import-Fenster
- Bild 8-7: Meldung bei erfolgreichem Import
- Bild 8-8: Felder für eigene Bemerkungen
- Bild 8-9: Informationsfelder (schwarz), welche beim Anklicken der Informations-Buttons (blauer Kreis) erscheinen
- Bild 8-10: Button zum Abschluss des Screenings
- Bild 8-11: Definition des Streckenabschnitts und dessen Objekte. Es können Tunnel, Brücken und offene Strecken definiert werden (links). Alternativ kann ein bereits bestehendes Screening geladen werden (rechts)
- Bild 8-12: Beurteilung der Kritikalität und somit der Bedeutsamkeit des betrachteten Objekts in Bezug auf die Konsequenzen einer Störung respektive eines Funktionalitätsverlusts
- Bild 8-13: Abschätzung der Exposition des betrachteten Objekts gegenüber verschiedenen Gefährdungen. Ist eine Exposition vorhanden ist die Häufigkeit und die Dauer einer möglichen Unterbrechung abzuschätzen. Diese Abschätzung fließt nicht in die Vulnerabilitätsbeurteilung mit ein, aber wird für die Maßnahmenbeurteilung benötigt
- Bild 8-14: Basierend auf den Angaben zu Kritikalität und Exposition findet die Vulnerabilitätsabschätzung statt. Ob auf Grundlage dieser eine Resilienzscreening empfohlen wird oder nicht, zeigen die farbigen Icons. Für die Objekt für die kein Resilienzscreening empfohlen wird, ist die Beurteilung abgeschlossen
- Bild 8-15: Mithilfe von Leitfragen wird für jedes zu untersuchende Objekt abgeschätzt, ob eine Erhöhung der Resilienz überhaupt angezeigt ist. Möglicherweise kann davon ausgegangen werden, dass der betrachtete Streckenabschnitt bzw. das betrachtete Objekt hinreichend resilient ist und auf eine vertiefte Resilienzbeurteilung verzichtet werden kann
- Bild 8-16: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus dem Resilienzscreening je Kriterium
- Bild 8-17: Basierend auf dem Resilienzscore und unter Berücksichtigung der Gewichtung der einzelnen Kriterien wird ein Handlungsbedarfs-Index abgeleitet. Für die rot markierten Kriterien werden Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz empfohlen
- Bild 8-18: Definition von Maßnahmen, die im nächsten Schritt hinsichtlich ihres Beitrags zur Resilienz des Objekts bewertet werden sollen
- Bild 8-19: Keine Veränderung des Funktionalitätsverlusts im Ereignisfall
- Bild 8-20: Anpassung der Häufigkeit der Gefährdung
- Bild 8-21: Beispielhafte Bewertung der Funktionalitätsveränderungen
- Bild 8-22: Resilienzwirkung der zwei Beispielmaßnahmen im Vergleich

- Bild 8-23: Zusätzliche Angaben zu Maßnahme 1
- Bild 8-24: Zusätzliche Angaben zu Maßnahme 2
- Bild 8-25: Rangliste der beiden Maßnahmen mit Rang nach Resilienz Wirkung (oben) und über alle Kriterien (unten)
- Bild A2-1: Exemplarische Darstellung der Ergebnisse der Resilienzbewertung
- Bild A2-2: Stark vereinfachte Darstellung der Architektur des IT-Tools bestehend aus Frontend und Backend
- Bild A2-3: Detailliertere Ansicht der Komponenten des Backend
- Bild A2-4: Architekturübersicht
- Tab. 5-12: Bewertungsskala zur Abschätzung des Betriebsunterbruchs. Es findet je eine Bewertung pro Gefährdung statt
- Tab. 5-13: Tabelle zur Umwandlung der Werte von  $\Delta t$  in einen Wert des Wertebereichs von -3 bis +3, um eine Basis für den Vergleich mit  $\Delta F$  zu schaffen
- Tab. 5-14: Bewertungsskala zur Abschätzung des Einflusses einer Maßnahme auf die Funktionalität am Beispiel der Systemfunktionalität Wertschöpfungseffekte
- Tab. A-21: Spezifikationen des V40 Windows Server von Strato

## Tabellen

- Tab. 5-1: Bewertungskriterien Kritikalität
- Tab. 5-2: Bewertungskriterien naturbedingte Gefährdungen
- Tab. 5-3: Bewertungskriterien menschbedingte Gefährdungen
- Tab. 5-4: Bewertungskriterien technische Gefährdungen
- Tab. 5-5: Gliederung der Einschätzung der Eintrittshäufigkeiten (je Gefährdung)
- Tab. 5-6: Gliederung der Einschätzung der Dauer bis zur Wiederherstellung der Systemfunktionalität (je Gefährdung)
- Tab. 5-7: Ermittlung der Vulnerabilität
- Tab. 5-8: Kriterienkatalog mit Zuordnung der Kriterien zu den Dimensionen organisatorisch, wirtschaftlich und physisch/technisch
- Tab. 5-9: Ziel- und Indikatorensystem zur Erfassung der Resilienz Wirkung
- Tab. 5-10: Bewertungsskala zur Abschätzung der Eintrittshäufigkeit E einer Gefährdung
- Tab. 5-11: Tabelle zur Umwandlung der Werte von  $\Delta E$  in einen Wert des Wertebereichs von -3 bis +3, um eine Basis für den Vergleich mit  $\Delta F$  zu schaffen



## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 2021

**B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager**

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 161: Lagerwege von Brücken**

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit**

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen**

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten**

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen**

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen**

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan**

Staeck, Eilers

€ 15,50

**B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen**

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen**

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt**

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)**

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren**

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelnenschalen aus Stahlbeton**

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2022

**B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen**

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)**

Purtak, Möbius

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen**

Staeck

€ 15,00

**B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten**

Freundt, Böning, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn**

Windmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland**

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung**

Schreck, Decker, Wawrzyniak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten**

Maurer, Wentzek, Hegger, Adam, Rombach, Harter, Zilich, Tecusan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau**

Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 183: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen**

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brennberger, Zulauf, Locher

€ 18,00

**B 184: Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken**

Kindl, Stadler, Walther, Bornmann, Freitag  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 185: Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität**

Hill, Bahlau, Butenhof, Degener, Klein, Kukushkin, Riedlinger, Oppermann, Lambracht, Mertens  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2023

**B 186: Integration der Handlungsanweisungen Spannungsrisskorrosion und Koppelfugen in die Nachrechnungsrichtlinie**

Zilch, Kriechbaum, Maurer, Heinrich, Weiher, Runtemund  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 187: Verstärkung des Deckblechs orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen**

Friedrich € 18,00

**B 188: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm**

Butz, Rill, Freundt, Böning, Werner, Fischer, Lau  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 189: Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie – Validierung erweiterter Nachweisformate zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken**

Fischer, Thoma, Hegger, Schmidt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 190: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken**

Morgenthal, Rau, Hallermann, Schellenberg, Martín-Sanz, Schuber, Kübler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 191: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau**

Thewes, Vollmann, Wahl, König, Stepien, Riepe, Weißbrod  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 192: Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur**

Lindström, Zulauf, Rothenfluh, Bruns, Brunner, Roth, Caminada, Graf, Dahl  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

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.