

# Reaktions- und Wiederherstellungs- prozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 165

**bast**

# Reaktions- und Wiederherstellungs- prozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

von

Markus Deublein  
Franziska Roth  
Frank Bruns  
Christoph Zulauf

EBP Schweiz AG  
Zollikon

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 165

**bast**

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

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

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

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

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

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

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

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 89.0330**  
Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

**Fachbetreuung**  
Kalliopi Anastassiadou

**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 978-3-95606-583-5

Bergisch Gladbach, Juni 2021

## Kurzfassung – Abstract

### Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Um die Funktionsfähigkeit sowie den Betrieb einer Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen aufrechtzuerhalten bzw. möglichst schnell wiederherzustellen, bedarf es geeigneter Methoden und Konzepte, welche eine ganzheitliche, konzeptionelle und systematische Beurteilung der Systemresilienz ermöglichen.

Auf Grundlage des aktuellen nationalen und internationalen Stands der Forschung wurde ein anwendungsorientierter Ansatz für ein Resilienzmanagementkonzept entwickelt, welches mit den Bedürfnissen der potenziellen Nutzer sowie den in Deutschland vorhandenen Ansätzen und Managementsystemen im Straßeninfrastrukturmanagement abgestimmt wurde. Durch die methodischen Elemente des Resilienzscreenings, der Maßnahmenbeurteilung sowie der Resilienzoptimierung werden geeignete Maßnahmen für eine möglichst effiziente Erhöhung der Systemresilienz identifiziert und priorisiert. Der verwendete pragmatische Ansatz zur Abschätzung des Einflusses einer Maßnahme zur Erhöhung der Resilienz wird für den Anwender nachvollziehbar auf Objektebene durchgeführt und anschließend für Aussagen der Maßnahmenwirkung auf die Resilienz des Gesamtsystems aggregiert.

Unter Berücksichtigung der jährlichen Maßnahmenkosten liefert die entwickelte Methodik für den Entscheidungsträger letztendlich pro Maßnahme vier verschiedene Kennwerte: Die Resilienzwirkung, das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis, den potenziellen Umsetzungszeitraum und die Umsetzungswahrscheinlichkeit (Machbarkeit). Auf dieser Grundlage obliegt es dem Entscheidungsträger, eine Rangliste der umzusetzenden Maßnahmen zu erstellen, die je nach strategischen oder politischen Zielvorgaben für seine Situation und sein System am geeigneten sind.

Die Anwendung der Methodik des Resilienzmanagements erlaubt es erstmals, sehr unterschiedliche Arten von Maßnahmen miteinander zu vergleichen und ihre Wirkungen und Kosten hinsichtlich Resilienz einander vergleichend gegenüberzustellen.

### Response and recovery process for the road infrastructure after disruptive events

In order to maintain the functionality and operation of a road infrastructure after disruptive events or to restore it as quickly as possible, suitable methods and concepts are required which enable a holistic, conceptual and systematic assessment of system resilience.

Based on the current national and international state of research, an application-oriented approach was developed for a concept for resilience management that is coordinated with the needs of potential users and the existing approaches and management systems in Germany for road infrastructure management. The methodological elements of resilience screening, measure assessment and resilience optimization are used to identify and prioritize suitable measures for increasing system resilience as efficiently as possible. The pragmatic approach used to estimate the influence of a measure to increase resilience is carried out comprehensibly for the user at object level and then aggregated for statements on the effect of the measure on the resilience of the overall system.

Considering the annual costs of measures, the methodology developed for the decision-maker ultimately provides four different parameters per measure: the resilience effect, the cost-effectiveness ratio, the potential implementation period and the probability of implementation (feasibility). On this basis it is incumbent upon the decision maker to provide a ranking list of the measures which are most suitable depending upon strategic or political targets for his situation and his system.

The application of the resilience management methodology makes it possible for the first time to compare very different types of measures with each other and to compare their effects and costs with regard to resilience.

## Summary

### Response and recovery process for the road infrastructure after disruptive events

#### 1 Tasks

Providing a safe and reliable road infrastructure and an efficient road infrastructure management to ensure safe operation and high availability are essential prerequisites for sustainable mobility and economic growth. These requirements present a major challenge for operators and owners of today's road infrastructures. Considering the growing demand for mobility in our society, the progressive ageing of numerous road infrastructure elements, but also the increasing complexity of infrastructural, technical and organizational aspects, these management tasks are becoming increasingly demanding. At the same time, these developments also increase the vulnerability of road infrastructures to disruptive events. A major challenge for decision-makers in road infrastructure management therefore lies in dealing with interruption and damaging effects on the system caused by disruptive events. To maintain or restore as quickly as possible the functionality and operation of a road infrastructure system after such an event, suitable methods and concepts are required which enable a holistic, conceptual and systematic assessment and prognosis of the functionality of the road infrastructure in order to identify and prioritize target-oriented measures.

In addition, it should be examined which organizational and technical conditions must be created for the responsible authorities to react immediately. This will be done by methods for selecting suitable measures in the corresponding resilience phase respond. Beyond that suitable measures are to be identified, which contribute to an improvement of the robustness of the system and reduce thus the loss of the system functionality in the case of an incident. Measures in the context of the resilience phase recover contribute to a faster recommissioning of elements of the road infrastructure after an incident. By the implementation of measures the initial condition or an even higher system functionality can be reached in the aftermath.

The aim of this research project is to develop a methodology to optimize the response and recovery process for road infrastructures. To achieve this goal, the following two main questions need to be answered:

1. How can the response and recovery process for road infrastructures be described and assessed in the context of resilience considerations?
2. What kind of resilience measures are effective in the respond and recover phase and how can potential measures be prioritized?

#### 2 Methodology

Figure 1 shows the concept for the approach to optimize the respond and recovery process after disruptive events on a road traffic system.

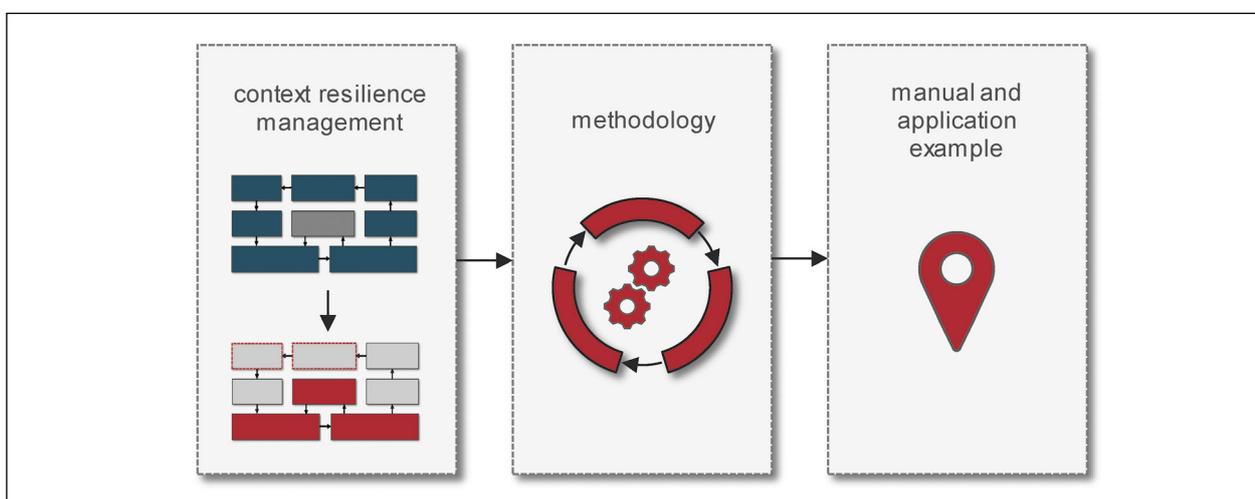


Fig. 1: Concept for optimizing the respond and recover phase

The concept is divided into the following three main elements:

1. Embedding the approach into the context of a holistic resilience management concept.
2. Developing a user-friendly methodology for identification, impact assessment and prioritization of appropriate resilience measures to assist in the identification of measures.
3. Providing practical instructions for the methodology based on a manual and an application example.

### 3 Results

Embedding the approach into the context of a resilience management

A resilience management concept for a practical implementation was developed to guarantee the resilience of a system on a long-term basis through a holistic understanding of the interaction of the individual components of the resilience analysis and to increase the resilience if necessary. On basis of the outcome of the situation analysis the resilience management process was developed (figure 2). It describes the iterative/cyclical procedure, which must be run through for an effective and efficient resilience management. At the same time the resilience management process serves as important orientation for a target-oriented implementation and application of organizational steps, to examine the resilience of a system and increase it if necessary by suitable measures. Further, interfaces to other, already existing management systems are pointed out, to produce a common increase in value. This

facilitates the coordination and the efficient identification and implementation of actions to improve the resilience.

The scope of the research project is limited in coordination with the supervisory group to those process elements, which are crucial for an evaluation of the resilience as well as the identification and prioritization of measures. The relevant process elements are highlighted in red in figure 2. Within the framework of the research project, methodological approaches were developed for the relevant process elements (resilience screening, measure evaluation, resilience optimization).

#### Methodology for practical application

With the resilience management process, a conceptual framework was created to embed the development of the methodology for the optimization of the response and recovery process for an application in practice. The developed methodology comprises the following modules in a cyclic iteration:

1. Resilience screening, consisting of the examination of the current system resilience based on a catalogue of criteria. From this the need for action can be determined and the broad selection of potential measures for the later and more complex measure evaluation can be limited.

The methodology of the resilience screening covers an examination of the resilience of a system in its actual condition, as well as the identification of potential fields of action, in which the system performance is to be improved regarding their resilience. Concretely the resilience-screening should:

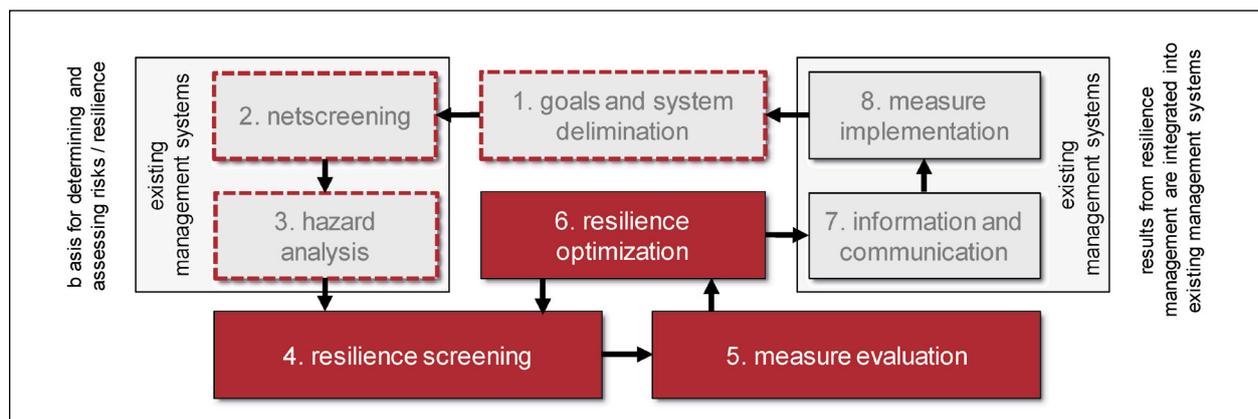


Fig. 2: Resilience management concept. The elements relevant for the proposed methodology are highlighted in red

- examine the resilience of the system based on a catalogue of criteria which covers all aspects relevant to the resilience of the defined system; for example, financial aspects (cost agreements), planning aspects (e.g. emergency plans), technical aspects (e.g. redundancies), etc.
  - limit the focus of finding actions to individual, currently least resilient fields of action, 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 regarding their resilience effect. In this way, the studies on the impact of measures can be carried out more purposefully and efficiently.
2. Measure evaluation, consisting of the determination of the system functionalities as well as the estimation of the impact of each measure on the system's resilience. The aim of the measure evaluation is to assess the potential measures identified based on the resilience screening regarding their impact on the resilience. The impact of a measure on the resilience can be determined based on its influence on the resilience curve. Measures of the phases respond and recover<sup>1</sup> change the

functionality curve after a disruptive event and thus also the resilience of the system by reducing on the one hand the absolute (vertical) loss of functionality and on the other hand the temporal impact duration (horizontal; black arrows in figure 3). The measure evaluation contains the following partial goals:

- definition of the system functionalities and
  - determination of the resilience effect of the measures.
3. Resilience optimization, consisting of the recording of the costs of the measures, the evaluation of the measures based on cost-effectiveness considerations and an optimized prioritization of individual or combined measures in terms of resilience, considering and comparing their individual and combined resilience effects as well as a holistic cost consideration.

The goal of the resilience optimization is the generation of an optimal ranking list of the prioritized measures with respect to the system's resilience, based on the determined resilience effects and under consideration of a cost-effectiveness of the individual measures. This ranking list helps the decision makers to select the most efficient measures and to implement a resilience management. The partial goals of this process step are

- recording the costs of measures,
- preparing the prioritized ranking list of measures and/or combinations of measures.

<sup>1</sup> Which phase of the resilience cycle a measure is assigned to, depends on the point in time at which its impact unfolds.

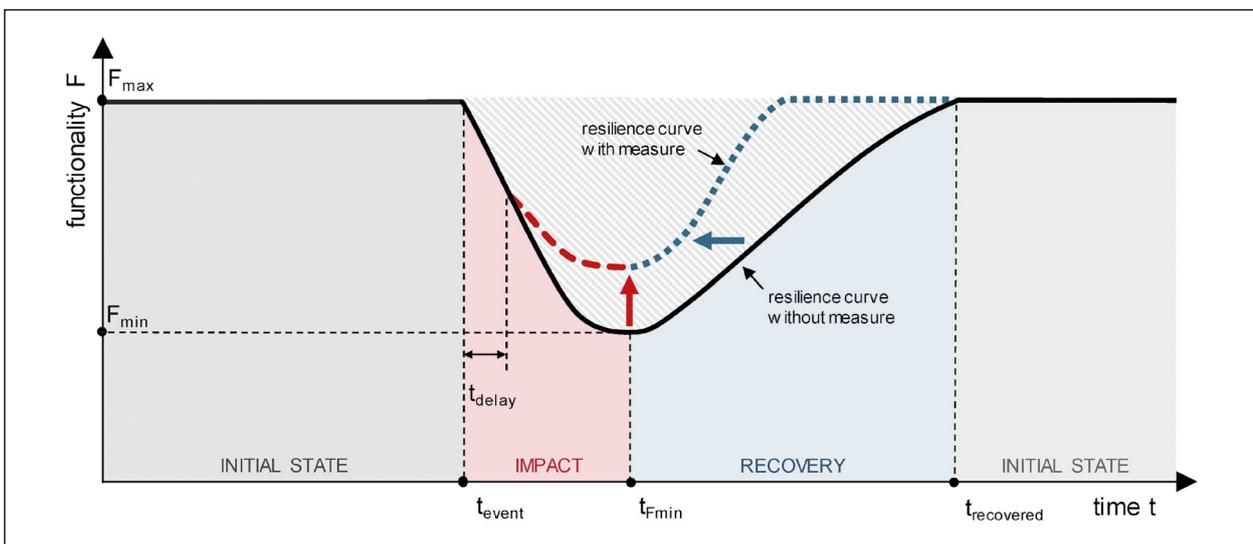


Fig. 3: Effect of the measures in the respond and recover phases on the functionality of the system – represented by black arrows

---

The theoretical development of a resilience management process as well as the methodology for the implementation of resilience screening, measure assessment and measure prioritization are supported by a developed software tool.

points can be obtained and finally a higher resilience can be achieved.

## 4 Conclusion for practice

Resilience is a buzzword often quoted in modern times. However, a closer look reveals, that the topicality of this term refers primarily to scientific studies, whereas the term resilience has only rarely been encountered in the circle of potential users (e.g. traffic authorities, traffic management institutions). This does not mean that these user groups do not consider aspects of resilience in their daily work. On the contrary, many measures, procedures and management approaches in the sense of resilience are already being discussed and implemented today. New in this context is the striving for a systemic increase in value by an efficient, decision making with respect to the system's resilience. This is achieved by combining existing measures and approaches in a consistent resilience management, considering all stakeholders. The conceptual and methodological solutions of this research project will build a bridge between the scientifically very established state of research on technical and engineering resilience assessment in the application-oriented everyday life of infrastructure managers. The developed methodology serves decision makers in road infrastructure management as an objective basis and support in the identification and prioritization of measures to increase system resilience.

The developed methodology enables an assessment and prioritization of measures regarding their impact on the system's resilience and contributes to establish a more efficient response and recovery process during and after disruptive events. The goal is based on the interest of road infrastructure operators to minimize the functional, temporal and thus financial consequences of disruptive effects on the system (triggered by disruptive events). It is important to intelligently combine existing methods and approaches for the consideration of disruptive events and to generate added value from them. To achieve this, the methodology is embedded in an overall concept of a resilience management. Thus, existing methodical approaches and management systems can be used, interfaces and connection



## Inhalt

<b>Teil A – Methodik</b> .....	11	4.3.2 Festlegung der Systemfunktio- nalität(en) .....	31
<b>1 Einleitung</b> .....	11	4.3.3 Erfassung der Resilienzwirkung .....	32
1.1 Ausgangslage .....	11	4.4 Resilienzoptimierung .....	37
1.2 Zielsetzung .....	11	4.4.1 Ziele der Resilienzoptimierung .....	37
1.3 Berichtsstruktur .....	12	4.4.2 Erfassung der Maßnahmenkosten .....	37
<b>2 Situationsanalyse</b> .....	13	4.4.3 Priorisierung der Resilienzmaß- nahmen .....	37
2.1 Definitionen .....	13		
2.2 Aktueller Forschungsstand .....	14	<b>Teil B – Handbuch und Anwendungs- beispiel</b> .....	39
2.2.1 Literaturrecherche .....	14	<b>5 Handbuch zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstel- lungsprozesses</b> .....	39
2.2.2 Resilienz eines Systems .....	16	5.1 Ziel .....	39
2.2.3 Resilienzmaßnahmen und deren Differenzierung .....	17	5.2 Anwender .....	39
2.3 Rahmenbedingungen und Grundsätze für die Konzept- und Methodenent- wicklung .....	20	5.3 Definitionen .....	39
<b>3 Konzept zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungs- prozesses</b> .....	22	5.4 Übersicht .....	40
3.1 Übersicht .....	22	5.5 Resilienzscreening .....	41
3.2 Einbettung in den Kontext des Resilienzmanagements .....	22	5.5.1 Kurzbeschreibung und Ziele .....	41
<b>4 Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungs- prozesses</b> .....	25	5.5.2 Festlegung des Kriterienkatalogs .....	41
4.1 Übersicht .....	25	5.5.3 Erfassung der Systemresilienz .....	42
4.2 Resilienzscreening .....	26	5.5.4 Identifikation des Handlungs- bedarfs .....	44
4.2.1 Ziel des Resilienzscreenings .....	26	5.5.5 Identifikation von Resilienz- maßnahmen .....	46
4.2.2 Festlegung Kriterienkatalog .....	26	5.6 Maßnahmenbeurteilung .....	48
4.2.3 Erfassung Systemresilienz .....	28	5.6.1 Kurzbeschreibung und Ziele .....	48
4.2.4 Identifikation des Handlungs- bedarfs .....	28	5.6.2 Festlegung der Systemfunktio- nalität(en) .....	49
4.2.5 Identifikation von Resilienz- maßnahmen .....	30	5.6.3 Erfassung der Resilienzwirkung .....	51
4.3 Maßnahmenbeurteilung .....	31	5.7 Resilienzoptimierung .....	53
4.3.1 Ziel der Maßnahmenbeurteilung .....	31	5.7.1 Kurzbeschreibung und Ziele .....	53
		5.7.2 Erfassung der Maßnahmenkosten .....	54
		5.7.3 Priorisierung der Resilienzmaß- nahmen .....	55

<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiel</b> .....	56	A 4	Bewertungsskalen für die Systemfunktionalitäten .....	99
6.1	Beschreibung Fallbeispiel .....	56			
6.2	Zieldefinition und Systemabgrenzung .....	56	A 5	Maßnahmenbeurteilung im Anwendungsbeispiel .....	103
6.3	Resilienzscreening .....	56	A 6	Gefährdungskatalog des schweizerischen Bundesamts für Bevölkerungsschutz (BABS) .....	105
6.3.1	Festlegung des Kriterienkatalogs .....	56			
6.3.2	Erfassung der Systemresilienz .....	56			
6.3.3	Identifikation des Handlungsbedarfs .....	57			
6.3.4	Identifikation von Resilienzmaßnahmen .....	58			
6.4	Maßnahmenbeurteilung .....	59			
6.4.1	Festlegung der Systemfunktionalität(en) .....	59			
6.4.2	Erfassung der Resilienzwirkung .....	59			
6.5	Resilienzoptimierung .....	68			
6.5.1	Erfassung der Maßnahmenkosten .....	68			
6.5.2	Priorisierung der Resilienzmaßnahmen .....	68			
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Empfehlungen</b> .....	68			
7.1	Schlussfolgerungen .....	68			
7.2	Empfehlungen und Ausblick .....	70			
7.2.1	Implementierung der entwickelten Methodik .....	70			
7.2.2	Forschungsbedarf .....	71			
	<b>Literatur</b> .....	72			
	<b>Weitergehende Literatur</b> .....	74			
	<b>Bilder</b> .....	80			
	<b>Tabellen</b> .....	81			
	<b>Anhang</b> .....	82			
A 1	Hinweise zu den Elementen des Resilienzmanagement-Prozesses .....	82			
A 2	Bewertungsskalen für die Kriterien .....	85			
A 3	Kreuztabelle für die Maßnahmenidentifikation .....	88			

## Teil A – Methodik

### 1 Einleitung

#### 1.1 Ausgangslage

Die Bereitstellung einer sicheren, gebrauchstauglichen Straßeninfrastruktur und ein effizientes Straßeninfrastrukturmanagement zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs und einer hohen Verfügbarkeit sind eine wesentliche Grundvoraussetzung für nachhaltige Mobilität und wirtschaftliches Wachstum. Diese Anforderungen stellen eine große Herausforderung für Betreiber und Eigentümer heutiger Straßeninfrastrukturen dar. Angesichts des wachsenden Mobilitätsbedürfnisses unserer Gesellschaft, der fortschreitenden Alterung zahlreicher Straßeninfrastrukturelemente, aber auch der zunehmenden Komplexität der infrastrukturellen, technischen und organisatorischen Aspekte, werden diese Management-Aufgaben für Straßeninfrastrukturbetreiber immer anspruchsvoller. Gleichzeitig wächst mit diesen Entwicklungen auch die Verletzlichkeit der Straßeninfrastrukturen gegenüber disruptiven Ereignissen. Eine wesentliche Herausforderung für Entscheidungsträger im Straßeninfrastrukturmanagement liegt demzufolge im Umgang mit Störungen und negativen Einwirkungen auf das System, ausgelöst durch disruptive Ereignisse.

Um die Funktionsfähigkeit sowie den Betrieb einer Straßeninfrastruktur nach einem solchen Ereignis aufrechtzuerhalten bzw. möglichst schnell wiederherzustellen, bedarf es geeigneter Methoden und Konzepte, welche eine ganzheitliche, konzeptionelle und systematische Beurteilung und Prognose der Funktionsfähigkeit der Straßeninfrastruktur ermöglichen, um zielführende Maßnahmen zu identifizieren und zu priorisieren.

Bereits heute liegen verschiedene Methoden und Konzepte zur Maßnahmenfindung im Straßeninfrastrukturmanagement zum Schutz vor disruptiven Ereignissen vor. Dabei findet jedoch meist nur eine isolierte Betrachtung einzelner Prozesselemente für eine Erhöhung der Systemresilienz statt. Neu ist in diesem Zusammenhang die verstärkt konzeptionelle Einbettung der bestehenden Ansätze in den Kontext des Resilienzmanagements. Die bestehenden – meist aber noch eher theoretischen – Ansätze müssen durch weiterführende und zusätzliche Konzepte ergänzt und verknüpft werden. Dies mit

dem Ziel, langfristig ein konsistentes und in der Praxis anwendbares und dadurch in den zuständigen Behörden akzeptiertes Resilienzmanagement für Straßeninfrastrukturnetze in Deutschland zu entwickeln.

Als Ausgangspunkt dienen die Erkenntnisse und Empfehlungen des durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in Auftrag gegebenen Forschungsprojekts zum «Stand der Technik hinsichtlich der Bewertung von Resilienzmaßnahmen» [13]. Die darin erarbeiteten Definitionen von Resilienz und Resilienzmaßnahmen sowie die diskutierten und empfohlenen methodischen Ansätze hinsichtlich einer Bewertung von Resilienzmaßnahmen dienen als Grundlage für ein gemeinsames Verständnis der vorliegenden Arbeit.

#### 1.2 Zielsetzung

In Deutschland dient das Vorhandensein von Rückfallebenen unter anderem dazu, die Funktionalität und den Betrieb eines Straßenelements oder -systems (z. B. Brücke oder Straßennetz) im Falle eines oder mehrerer disruptiver Ereignisse aufrecht zu erhalten. Darunter kann beispielsweise das Vorhalten von Redundanzen am Bauwerk oder auf Netzebene verstanden werden. Zusätzlich soll untersucht werden, welche organisatorischen und technischen Voraussetzungen zu einem sofortigen oder unmittelbaren Reagieren der verantwortlichen Stellen geschaffen werden müssen. Dies anhand von Methoden zur Auswahl geeigneter und verhältnismäßiger Maßnahmen in der entsprechenden Resilienzphase respond. Darüber hinaus sollen geeignete Maßnahmen identifiziert werden, die zu einer Verbesserung der Robustheit des Systems beitragen und somit den Verlust der Systemfunktionalität im Ereignisfall deutlich vermindern. Maßnahmen im Kontext der Resilienzphase recover tragen zu einer schnelleren Wiederinbetriebnahme von Elementen der Straßeninfrastruktur nach einem Ereignisfall bei. Durch den Einsatz von Maßnahmen kann im Nachgang sowohl der Ausgangszustand, als auch eine höhere Systemfunktionalität erreicht werden.

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses für Straßeninfrastrukturen. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es einer Beantwortung der beiden folgenden Hauptfragestellungen:

- (1) Wie lässt sich der Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für Straßeninfrastrukturen im Kontext von Resilienzüberlegungen beschreiben und beurteilen?
- (2) Welche Art von Resilienzmaßnahmen entfalten ihre Wirkung in der Reaktions- und Wiederherstellungsphase und wie lassen sich potenzielle Maßnahmen priorisieren?

Die Methodik soll eine Beurteilung und Priorisierung von Maßnahmen hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung ermöglichen und so dazu beitragen, den Reaktions- und Wiederherstellungsprozess während und nach disruptiven Ereignissen effektiver als bisher zu gestalten. Das Ziel gründet auf dem Interesse von Straßeninfrastrukturbetreibern, die funktionalen, zeitlichen und somit finanziellen Konsequenzen von negativen Einwirkungen auf das System (ausgelöst durch disruptive Ereignisse) möglichst zu minimieren. Dabei geht es insbesondere darum, größtenteils bestehende Methoden und Ansätze zur Berücksichtigung disruptiver Ereignisse intelligent zu kombinieren und einen Mehrwert daraus zu generieren. Um dies zu erreichen, wird die Methodik in ein Gesamtkonzept für ein konsistentes Resilienzmanagement eingebettet. Dadurch können bestehende methodische Ansätze und Managementsysteme genutzt, Schnittstellen und Verknüpfungspunkte erhalten und letztendlich eine höhere Resilienz erreicht werden. Anhand eines Anwendungsbeispiels soll die Methodik auf ihre Zweckmäßigkeit hin überprüft werden.

### 1.3 Berichtsstruktur

Die Struktur des vorliegenden Berichts ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

- Schritt 1: In einer Situationsanalyse werden nationale und internationale Projekte, Programme und Untersuchungen gesichtet, welche sich mit Resilienzüberlegungen, insbesondere im Bereich von Straßeninfrastruktursystemen, auseinandersetzen. Die Recherche umfasst eine Bestandsaufnahme bestehender Methoden, Maßnahmen und Kriterien- und Indikatorensysteme mit Fokus auf der in Schritt 1 erarbeiteten Ausrichtung des Projekts am Resilienzmanagementprozess und den Phasen respond und recover, sowie unter Berücksichtigung der bestehenden Rahmenbedingungen (Kapitel 2).
- Schritt 2: Das konzeptionelle Vorgehen zur Bearbeitung der Fragestellungen wird in Schritt 2 vorgestellt. Dabei werden der logische Aufbau und Ablauf des methodischen Lösungsansatzes beschrieben. Es fließen die Erkenntnisse aus der Situationsanalyse ein, um für das Projektziel und im Rahmen des BMVI Expertennetzwerks ein Produkt zu erarbeiten, das zum einen dem Stand der Forschung entspricht und gleichzeitig ein möglichst anwenderfreundliches und dadurch weit verbreitetes sowie akzeptiertes Hilfsmittel für eine effiziente Priorisierung von Resilienzmaßnahmen darstellt (Kapitel 3).
- Schritt 3: Es werden die für dieses Forschungsprojekt relevanten Elemente des Resilienzmanagementprozesses mit methodischen Ansätzen hinterlegt. Auf Grundlage des Forschungsstandes und unter Anwendung des konzeptionellen Vorgehens aus Schritt 2 werden einzelne Methoden für eine geeignete Maßnahmenpriorisierung für eine Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses nach disruptiven Ereignissen definiert und beschrieben (Kapitel 4).

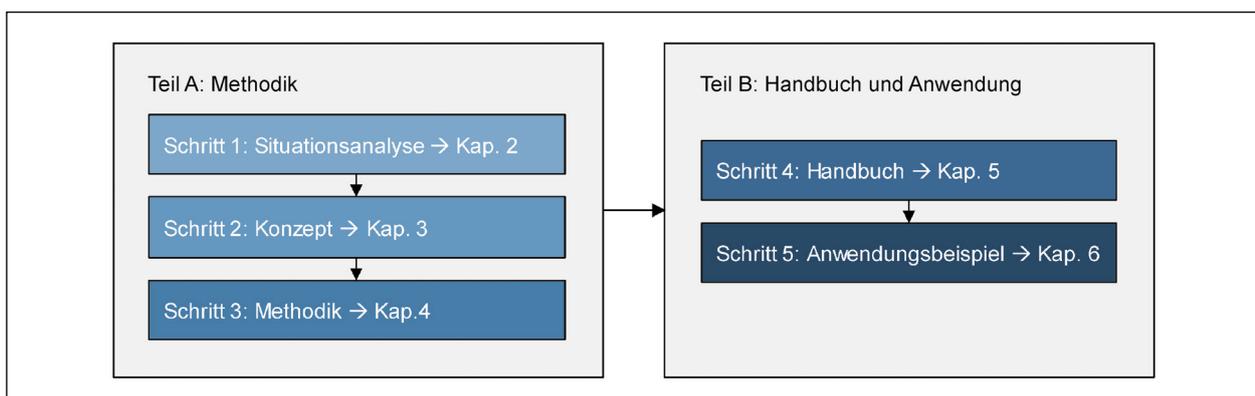


Bild 1: Struktur des Berichts mit Gliederung in methodischen Teil A und anwenderorientierten Teil B (Handbuch)

- Schritt 4: In der Form eines Anwenderhandbuchs wird die schrittweise Anleitung zur Anwendung der Methoden aus Schritt 3 beschrieben. Die Vorgehensbeschreibung erfolgt so, dass auch Anwender, die bisher keinen theoretischen Zugang zum Resilienzmanagement hatten, eine Maßnahmenpriorisierung zur Erhöhung der Systemresilienz durchführen können (Kapitel 4).
- Schritt 5: Um die Anwendbarkeit der Methodik zu demonstrieren, wird anhand eines konkreten Anwendungsbeispiels aufgezeigt, wie ausgewählte Maßnahmen bezüglich ihrer Resilienz Wirkung priorisiert werden können (Kapitel 6).

## 2 Situationsanalyse

### 2.1 Definitionen

Im Folgenden werden die für ein einheitliches Verständnis des vorliegenden Berichts benötigten Begriffe definiert. Die Definitionen wurden größtenteils im Rahmen von [13] erarbeitet und werden hier entsprechend wiedergegeben.

#### 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 [6]. 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 [6] [24] [34] [37]. 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 Wahrscheinlichkeit zu erwartenden Konsequenzen (z. B. volkswirtschaftliche Kosten eines Funktionalitätsverlusts) einen vorher festgelegten Grenzwert für ein aus Sicht Infrastrukturbetreiber und/oder Politik bzw. Gesellschaft akzeptables Risiko übersteigen. Unabhängig von der Art der Bedrohung.

#### Gefährdung

Bei einer Gefährdung handelt es sich um ein mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf das System einwirkendes, disruptives Ereignis, welches das Potenzial besitzt, die Funktionalität einer Infrastruktur zu beeinträchtigen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein All-Hazards-Ansatz verfolgt. Dabei werden alle potenziell für die Infrastruktur relevanten Gefährdungen berücksichtigt. Diese umfassen sowohl menschliche, technische als auch natürliche Gefährdungen [15] [32].

#### 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 [27] 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 [10] [22], 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 potenziellen Schadenszustände der Systemkomponenten berücksichtigt werden [27].

### Risiko

Unter Risiken sind auf das System einwirkenden Ereignisse zu verstehen, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit 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 Eintretenswahrscheinlichkeit und dem zu erwartenden Schadensausmaß definiert [19] [27] [31] [33].

### 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) [13] [25] [26].

### Resilienzmaßnahmen

Unter Resilienzmaßnahmen werden jene baulichen, technischen, planerischen und organisatorischen Maßnahmen am Einzelobjekt (z. B. Brücke oder Tunnel) oder für das gesamte Infrastrukturnetz verstanden, die über die Vorgaben aus den geltenden Regelwerken (z. B. Normen, Design Codes) hinausgehen (z. B. Verwendung von Hochleistungsbeton bei Brücken, wenn gemäß Norm aufgrund der Planungssituation eigentlich nur konventionelle Betontypen vorgesehen sind) [13].

### 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).

### 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 [29] 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.

## 2.2 Aktueller Forschungsstand

### 2.2.1 Literaturrecherche

Um den Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich der Definitionen von Resilienz und Resilienzmaßnahmen sowie geeigneter Methoden zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen abzubilden, stützt sich die Situationsanalyse in weiten Teilen auf die Erkenntnisse aus den umfangreichen Recherchen im Forschungsprojekt FE-Nr. 89.0320/2016 «Untersuchungen des Standes der Technik hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses von Resilienzmaßnahmen» [13] der BASt ab. Im Rahmen dieses Projekts wurde bereits eine umfangreiche Literaturrecherche zu Typen und bestehenden Bewertungsverfahren von Resilienzmaßnahmen durchgeführt. Diese Referenzlisten liegen im entsprechenden Schlussbericht vor und können unmittelbar für die Fragestellungen des Projekts berücksichtigt und genutzt werden.

Aufbauend auf diesem bereits vorliegenden Informationsfundus und dem zugehörigen Erkenntnisstand wurde eine erweiterte, gezielt auf die Resili-

enzphasen respond und recover ausgerichtete Literaturrecherche durchgeführt mit Fokus auf dem Aspekt der praktischen Umsetzung von Maßnahmen, die unmittelbar nach einer Einwirkung/Störung des Systems durch ein disruptives Ereignis ihre Wirkung entfalten (Resilienzphase respond) oder im Nachgang zum disruptiven Ereignis eine möglichst schnelle Erholung der Funktionalität bewirken – mindestens auf den Ausgangszustand der System-Funktionalität (Resilienzphase recover). Die Resultate der Literaturrecherche gelten als eine generische Grundlage für die Methodenentwicklung zur Berücksichtigung von Aspekten der Resilienz im Management und in der Entscheidungsfindung von Straßeninfrastrukturen. Weil der Blick dieses Forschungsprojekts auf das Gesamtsystem eines Straßeninfrastrukturnetzes gerichtet ist und dabei häufig Brücken und Tunnel die kritischsten Elemente darstellen, wird auch in der Literaturrecherche der Schwerpunkt auf diese beiden Objektarten gelegt, ohne aber wichtige Erkenntnisse für weitere Elemente der Straßeninfrastruktur auszuschließen.

Konkret wurde die im Rahmen von [13] durchgeführte Literaturanalyse zu bestehenden Bewertungsverfahren von Resilienzmaßnahmen hinsichtlich folgender Themenfelder erweitert:

- Kontextrecherche: Die bestehende Literaturrecherche wurde auf ein gesamtheitliches Resilienzmanagement ausgedehnt, mit dem Ziel Methoden und Konzepte an den Schnittstellen zur Resilienzbeurteilung im Rahmen eines Gesamtkonzepts zu identifizieren. Die Ergebnisse fließen in die Entwicklung des Resilienzmanage-

mentprozesses ein, wie er in Kapitel 3.2 beschrieben ist.

- Fokusrecherche: Die Fokusrecherche liefert Erkenntnisse zu bestehenden methodischen Ansätzen einer Resilienzbeurteilung sowie der Identifikation und Priorisierung von Maßnahmen mit Schwerpunkt auf die Resilienzphasen respond und recover.

Das Ergebnis der Literaturrecherche ist eine Ausleageordnung von nationalen und internationalen Ansätzen, Programmen, Projekten und Untersuchungen zur Auswahl und Priorisierung von Maßnahmen in den Resilienzphasen respond und recover. Bei der Ausleageordnung möglicher Resilienzmaßnahmen handelt es sich primär um eine Identifikation von bereits bekannten Maßnahmen, die neu im Kontext des Resilienzmanagements gesetzt und hinsichtlich ihrer potenziellen Resilienzwirkung überprüft werden (siehe Maßnahmenammlung z. B. im Projekt SKRIBT oder SERON). Wichtig für die exemplarisch dargestellte Liste an Maßnahmen ist deshalb auch der Einbezug bereits bestehender Maßnahmen (z. B. Luftströmungsgeschwindigkeitsmesser oder Brandmeldeanlagen in Tunneln) in die Resilienzüberlegungen.

In Tabelle 1 sind auszugsweise einige für den aktuellen nationalen und internationalen Forschungsstand repräsentative Projekte zusammengetragen. Die Erkenntnisse aus diesen Projekten wurden mit umfangreicher weiterer Literatur gespiegelt, welche der weiterführenden Literatur zu entnehmen ist.

Projekt	Projektdate	Einbettung in den Resilienzmanagementprozess
AllTrain – All Hazards Guide for Transport Infrastructure [15]	Systemgrenze: Verkehrsinfrastruktur Gefährdung: menschliche, technische und natürliche Gefährdungen (all hazards)	Gefährdungsanalyse, Maßnahmenvorschläge
NZ Transport Agency – Measuring the resilience of transport infrastructure [25]	Systemgrenze: Verkehrsinfrastruktur Gefährdung: menschliche, technische und natürliche Gefährdungen (all hazards)	Resilienzbeurteilung, Maßnahmenvorschläge
RAIN-EX – Risk-Based Approach for the Protection of Land Transport Infrastructure against Extreme Rainfall [1] – [4]	Systemgrenze: Straßen- und Bahninfrastruktur Gefährdung: natürliche Gefährdung (Starkregen)	Netscreening, Gefährdungsanalyse, Risikoanalyse
RESILENS – Realising European ReSILiencE for Critical INfraStructure [8], [16] – [18], [26], [30]	Systemgrenze: Kritische Infrastruktur (z. B. Stromversorgung, Wasserversorgung, Transportinfrastruktur, Gesundheitswesen) Gefährdung: menschliche, technische und natürliche Gefährdungen (all hazards)	Resilienzmanagement

Tab. 1: Auszug aus den berücksichtigten Projekten inklusive Projektdaten und Einbettung in den Resilienzmanagementprozess

Projekt	Projektdaten	Einbettung in den Resilienz-mangementprozess
SecMan – Security Risk Management Processes for Road Infrastructure [23]	Systemgrenze: Straßeninfrastruktur Gefährdung: menschliche und technische Gefährdungen	Netscreening, Maßnahmenvorschläge
SeRoN – Security of Road Transport Networks [36]	Systemgrenze: Verkehrsinfrastruktur Gefährdung: menschliche und technische Gefährdungen	Risikoanalyse, Maßnahmenvorschläge
SKRIBT – Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen [37] – [39]	Systemgrenze: Straßeninfrastruktur Gefährdung: menschliche, technische und natürliche Gefährdungen (all hazards)	Risikoanalyse, Maßnahmenvorschläge

Tab. 1: Fortsetzung

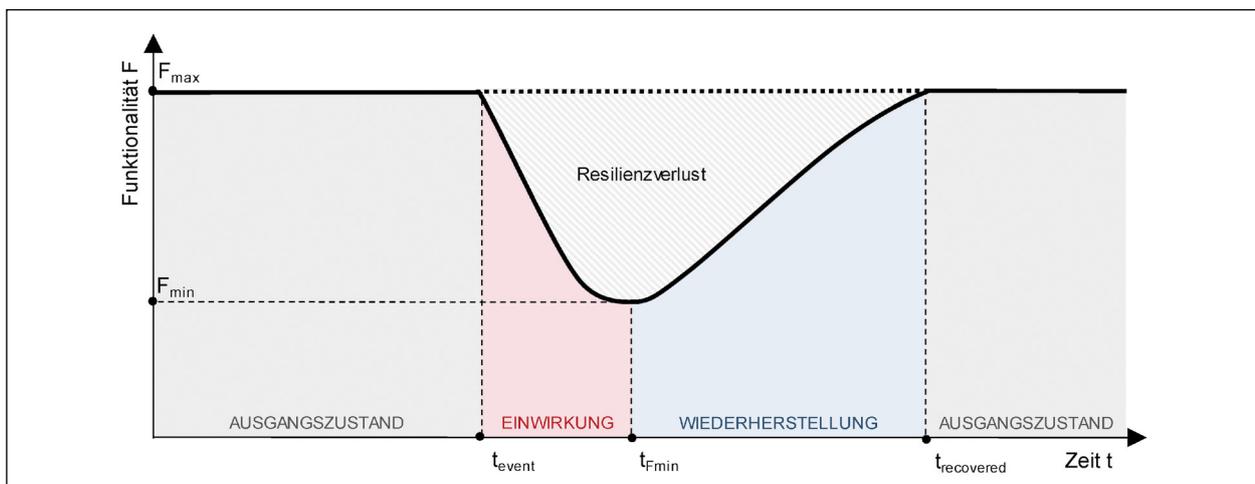


Bild 2: Die Resilienz eines Systems lässt sich anhand des Verlaufs der Funktionalitätskurve darstellen

### 2.2.2 Resilienz eines Systems

Für die Konzeption und Umsetzung der Methodik ist ein einheitliches Verständnis des Resilienzbegriffs unabdingbar. Die Grundlagen hierfür wurden in [13] erarbeitet. Der Begriff Resilienz wurde dabei gemäß Kapitel 2.1 definiert. Anhand von Bild 2 wird das aus der Literaturrecherche und den Diskussionen mit dem Betreuerkreis des vorliegenden Forschungsprojekts erarbeitete, allgemeine Verständnis von der Resilienz eines Systems illustriert.

Bild 2 zeigt eine schematische Darstellung zur Beschreibung bzw. Ermittlung/Quantifizierung der Resilienz eines Systems. Dafür werden die folgenden Kernannahmen getroffen:

- Betrachtet wird ein technisches, soziales oder finanzielles System (z. B. technisches Infrastruktursystem Verkehrsnetz).
- Das System definiert sich über seine Funktionalität: Wenn die Funktionalität eines Systems bei 100 % liegt ( $F_{max}$ ), ist sie genau auf die Bedürfnisse der Gesellschaft/des Betreibers abgestimmt – das System erfüllt die Anforderungen im Hinblick auf seine vorgesehene Funktion.
- Das System kann eine oder mehrere Funktionalitäten haben (z. B. Verkehrsleistung, Sicherheit, Reisezeit, Ästhetik).
- Disruptive Ereignisse (z. B. Starkregen, Erdbeben, Bevölkerungswachstum) führen zu einer negativen Einwirkung auf die Funktionalität des betrachteten Systems.
- Bei gleichem Ereignis kann die Einwirkung für unterschiedliche Funktionalitäten oder an unterschiedlichen Objekten in Ausmaß und Dauer differenzieren (z. B. Starkregenereignis in einer Region gefährdet nur einzelne Objekte).
- Eine ereignisbedingte (negative) Einwirkung auf die Funktionalität eines Systems äußert sich über den Verlauf der Funktionalitätskurve (durchgezogene, schwarze Linie; y-Achse) über dem betrachteten Zeitraum (x-Achse).
- Der Zeitraum lässt sich unterteilen in die Zeit vor dem disruptiven Ereignis (Ausgangszustand des

Systems), den Zeitpunkt des disruptiven Ereignisses ( $t_{\text{event}}$ ), den Zeitraum der negativen Einwirkung auf die Funktionalität bis hin zur minimalen Funktionalität/Talsole ( $F_{\text{min}}$ ) und dem Wiederherstellungszeitraum zwischen der minimalen Funktionalität ( $t_{F_{\text{min}}}$ ) und dem Wiedererlangen der Ausgangsfunktionalität  $F_{\text{max}}$  (oder darüber hinaus,  $t_{\text{recovered}}$ ).

- Vereinfacht kann angenommen werden, dass sich die Funktionalität des Systems nur wieder bis zur 100%-Linie ( $F_{\text{max}}$ ) regeneriert. Durch Adaptionen- und Lerneffekte ist aber auch das Erreichen einer höheren Funktionalität im Nachgang zur Einwirkung denkbar. Ein Adaptionseffekt zeigt sich aber auch bei gleicher wiedererlangter Funktionalität von 100 %, indem bei einem wiederkehrenden Ereignis gleicher Intensität, die Einwirkung auf die Funktionalität geringer ausfällt, als beim vorhergehenden Ereignisfall (z. B. nach 5 Jahren führt ein erneutes Starkregenereignis gleicher Intensität zu weniger Überschwemmungsschäden).
- Anhand der Funktionalitätskurve ist die Resilienz eines Systems messbar. Der durch ein disruptives Ereignis hervorgerufene Resilienzverlust eines Systems entspricht dem Integral über der Fläche zwischen der 100%-Funktionalität (gestrichelte Linie) und der tatsächlich vorliegenden Ist-Funktionalität (durchgezogene Linie) eines Systems. In Anlehnung an [5] kann der Resilienzverlust mathematisch wie folgt beschrieben werden:

$$\text{Resilienzverlust} = \int_{t_{\text{event}}}^{t_{\text{recovered}}} F_{\text{max}} - F(t) \quad (1)$$

In einfachen Worten: Je kleiner die diagonal gestrichelte Fläche, desto kleiner ist der Resilienzverlust und desto grösser ist die Resilienz des betrachteten Systems. Werden mehrere Funktionalitäten eines Systems berücksichtigt, dann werden die einzelnen Flächen (bei Bedarf gewichtet und) addiert.

- Durch die Auswahl geeigneter Resilienzmaßnahmen soll der Resilienzverlust des Systems infolge eines disruptiven Ereignisses minimiert werden. Das bedeutet, dass Maßnahmen gefunden werden müssen, die den absoluten vertikalen Funktionalitätsverlust und/oder die zeitliche Einwirkungsdauer (horizontal) möglichst stark reduzieren. Die Flächen des Referenzzustands lassen sich dann mit den (reduzierten) Flächen

nach einer Berücksichtigung der Maßnahmenwirkung vergleichen und der Resilienzgewinn ermitteln.

- Das Ziel des Resilienzmanagements ist es schließlich, anhand eines logischen und zielgerichteten Vorgehens sowie geeigneter Managementmethoden eine Priorisierung von möglichst effektiven und effizienten Resilienzmaßnahmen vorzunehmen und die Auswahl und Wirkung dieser Maßnahmen in iterativen Zyklen mit den Zielsetzungen und Anforderungen an das System vergleichend zu optimieren. Dadurch wird die Funktionalität (oder werden die multiplen Funktionalitäten) eines Systems so stabilisiert, dass eine Einschränkung der Funktionalität durch schockartige Einwirkungen oder schleichende Veränderungsprozesse zukünftig möglichst reduziert wird.

### 2.2.3 Resilienzmaßnahmen und deren Differenzierung

Resilienzmaßnahmen können hinsichtlich ihrer potenziellen Resilienzwirkung und hinsichtlich des Zeitpunkts ihrer Wirkungsentfaltung differenziert werden können. Diese Differenzierung hilft Entscheidungsträgern bei der Vorauswahl all jener Maßnahmen, die überhaupt aufgrund von Managementzielen, verfügbaren Mitteln oder langfristiger Strategie infrage kommen. So werden zum Beispiel gezielt nur jene Maßnahmen genauer betrachtet und hinsichtlich ihrer Wirkung beurteilt, die ihre Wirkung reaktiv unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis auf das System entfalten, weil dort aus Sicht des Betreibers der größte Handlungsbedarf besteht.

Ein bewährter Ansatz bei der Identifikation von Maßnahmen, wie er unter anderem von [15] verfolgt wird, besteht in der gefährdungsspezifischen Maßnahmenfindung. Hierbei werden den Gefährdungen, welche für die kritischen Objekte im System als relevant identifizierten wurden, mögliche Maßnahmen zugeordnet. Die vorliegende Arbeit verfolgt einen All-Hazards-Ansatz, das heißt, dass durch die gewählten Methoden sämtliche, für den Standort Deutschland potenzielle, Gefährdungen abgedeckt werden können. Diese umfassen natürliche, menschliche sowie technische Gefahren (Tabelle 2). Bei den menschlichen Gefährdungen muss zwischen vorsätzlichen Handlungen und nicht beabsichtigten Handlungen unterschieden werden.

Gefährdungen <sup>1</sup>	Beispiele für Ereignisse (nicht abschließend)
Natürliche Gefahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meteorologische Ereignisse (Sturm, Wind, Starkregen, Schneefall)</li> <li>• Gravitative Ereignisse (Lawinen, Steinschlag, Rutschungen)</li> <li>• Hydrologische Ereignisse (Hochwasser)</li> <li>• Sonstige Ereignisse (Waldbrand)</li> </ul>
Menschliche Gefahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorsätzliche Ereignisse (Terror, Sabotage, Cyberattacken)</li> <li>• Nicht beabsichtigte Ereignisse (Unfälle, Anprall)</li> </ul>
Technische Gefahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeugbrand, Fahrzeugexplosion</li> <li>• Freisetzung von Gefahrgut</li> <li>• Stromausfall</li> <li>• Materialermüdung, Materialversagen</li> </ul>

<sup>1</sup> Ereignisse, welche von natürlichen oder menschlichen Gefahren ausgehen, können Folgeereignisse (kaskadische Effekte) mit sich bringen, welche unter „Technische Gefahren“ fallen.

Tab. 2: Zu berücksichtigende Gefährdungen auf Grundlage von [15]

4R	Strategie	Erläuterung
Robustness	Reduktion der Vulnerabilität	Konstruktive Anpassungen von Objekten zur Eliminierung oder Reduktion ihrer Vulnerabilität im Falle von schadhafte Ereignissen
	Erhöhung der Improvisationsfähigkeiten	Resilienz hängt auch von der spontanen Improvisationsfähigkeit eines Systems ab. Unter Improvisationsfähigkeit ist die Anpassung eines Prozesses an eine Einwirkung in Echtzeit zu verstehen.
	Ausarbeitung einer Systemmodellierung	Die Funktionalität des Systems und die Abhängigkeiten des Systems von anderen Systemen werden modellhaft abgebildet. Die Kenntnis der Abhängigkeiten hilft bei der Abschätzung der Risiken.
Rapidity/ Resourcefulness	Vorhalten von Backup-Komponenten	Die Resilienz eines Systems wird durch den schnellen Einsatz vorhandener Backup-Systemkomponenten im Ereignisfall erhöht.
	Prioritärer Zugang zu wichtigen Ressourcen	Das System erhält vorrangigen Zugang zu kritischen Ressourcen (z. B. Treibstoffe, Wasser, Manpower), um schnellstmöglich den Ausgangszustand der Funktionalität wiederzuerlangen.
	Vorhalten von logistischen Backup-Lösungen	Dies beinhaltet vor allem Planungsprozesse, um Backup-Lösungen zum erforderlichen Zeitpunkt schnellstmöglich einsetzen zu können.
Redundancy	Hinzufügen von Redundanz	Das Hinzufügen von Redundanzen erhöht die Resilienz eines Systems, indem im Ereignisfall z. B. Verkehrsflüsse über eine oder mehr Alternativrouten umgeleitet werden können.
	Bereitstellen von Ersatzmöglichkeiten	Der gewünschte Prozess der Funktionalität kann von einer Systemkomponente auf eine andere übertragen werden (z. B. Straße → Schiene).

Tab. 3: Strategien zur Erhöhung der Resilienz gemäß [20]

Statt wie in [15] gefährdungsspezifische Maßnahmen zu identifizieren werden in [23] oder [37] den einzelnen Straßeninfrastrukturelementen (Netz/Objekt, Tunnel/Brücke/Begleitinfrastruktur) konkrete Maßnahmen zugeordnet. Ein weiterer Ansatz, wie er beispielweise von [25] oder [36] verfolgt wird, ist die Unterscheidung zwischen technischen und organisatorischen Maßnahmen. [25] unterscheidet zudem zwischen präventiven, verhindernden und wiederherstellenden Maßnahmen.

Grundsätzlich lassen sich die in [15] [23] [25] [36] [37] identifizierten Maßnahmen den von [20] entwickelten Strategien zur Erhöhung der Resilienz. Diese Strategien lassen sich wiederum den häufig zitierten 4R (robustness, rapidity, redundancy, resourcefulness) [21] zuordnen (Tabelle 3).

Die Situationsanalyse zeigt, dass es sich bei Resilienzmaßnahmen zu einem sehr großen Teil um bereits bestehende Maßnahmenansätze handelt, die nun im Kontext von Resilienzüberlegungen unter einem erweiterten Blickwinkel neu bewertet und priorisiert werden. Die Situationsanalyse zeigt allerdings auch, dass bei der Suche nach geeigneten und möglichst wirksamen Maßnahmen selten eine ganzheitliche Resilienzüberlegung stattfindet, sondern nur einzelne Elemente des Resilienzmanagementprozesses herausgegriffen werden. Bei der Konzeption und Umsetzung der Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses geht es deswegen darum, geeignete Wege und Ansätze aufzuzeigen, anhand derer aus den bereits vorhandenen Maßnahmen die für eine Erhöhung der Resilienz von Straßeninfrastrukturen

am besten geeigneten herauszufinden und entsprechend ihrer erwarteten Wirkung und Wirksamkeit zu priorisieren.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojekts identifizierten Maßnahmenfelder basieren auf den in Kapitel 2.1 aufgeführten Projekten, insbesondere [15] [23] [25] [36] [37] – [39], und stellen eine nicht abschließende Übersicht dar. Vielmehr handelt es sich um Hinweise auf mögliche Maßnahmen, welche im Anwendungsfall konkretisiert werden müssen. Des Weiteren sind in Abhängigkeit des Systems Ergänzungen oder Einschränkungen notwendig. Es zeigt sich zudem, dass ein großer Teil der in [15] [23] [25] [36] [37] – [39] identifizierten Maßnahmen der Phase protect zuzuordnen ist (hierbei handelt es sich primär um bauliche Schutzmaßnahmen).

Die im Rahmen der Literaturrecherche identifizierten Maßnahmenfelder zeigen außerdem, dass Maßnahmen, welche ihre Wirkung in den Phasen respond und recover entfalten, häufig als gefährdungsunspezifisch einzuordnen sind. Maßgebend ist nicht die ursächliche Gefährdung, sondern die resultierende Einwirkung auf das System. Auf eine Zuordnung der im Rahmen der Literaturrecherche identifizierten Maßnahmen zu den einzelnen Gefährdungen (wie beispielsweise von [15] praktiziert und oben beschrieben) wird aus diesem Grund verzichtet.

Der in dieser Forschungsarbeit verfolgte Ansatz ordnet die Resilienzmaßnahmen den fünf Phasen des Resilienzyklus in Bild 3 zu. Welcher Phase eine Maßnahme zuzuordnen ist, hängt davon ab, zu welchem Zeitpunkt sie ihre Wirkung entfaltet und nicht, wann sie umgesetzt wird. Die meisten Resilienzmaßnahmen werden bereits präventiv vor einem potenziellen Ereignis umgesetzt, ihre Wirkung entfalten sie aber erst zu einem späteren Zeitpunkt während oder nach einem Ereignis. Der in Bild 3 dargestellte Resilienzyklus lehnt sich insbesondere an die Darstellung aus [35] an, wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens aber unter dem Aspekt der Wirkungsentfaltung weiterentwickelt bzw. modifiziert.

Während die Maßnahmen, welche den Phasen prevent, protect, respond und recover zuzuordnen sind, ihre Wirkung in chronologischer Reihenfolge entfalten, sind Maßnahmen der Phase prepare zeitlich entkoppelt (siehe auch Bild 4). Maßnahmen der Phase prepare beinhalten die Vorbereitung auf disruptive Ereignisse, in erster Linie durch Wissensgewinn beispielsweise anhand von genaueren Datenerhebungen und/oder verbesserten Prädiktionsmo-

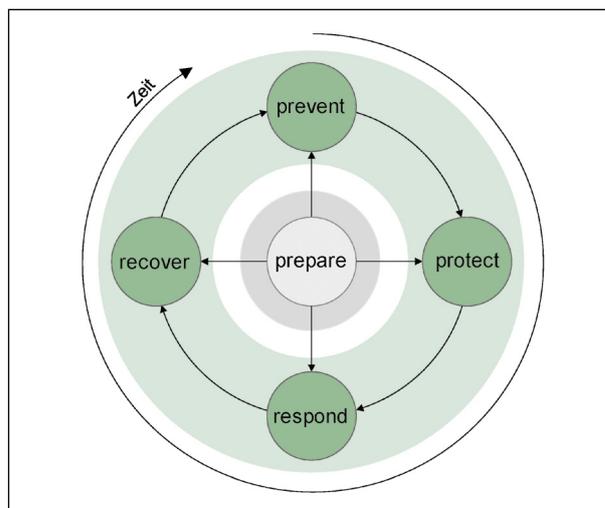


Bild 3: Resilienzyklus als Weiterentwicklung von [35]

dellen, was zu einer Erhöhung des Systemverständnisses beiträgt. Diese Maßnahmen haben keine direkte Wirkung auf den Verlauf der Funktionalitätskurve im Falle eines Eintritts eines disruptiven Ereignisses. Sie entfalten ihre Wirkung nur in Kombination mit Maßnahmen aus den übrigen Phasen und stellen gleichzeitig auch die Grundvoraussetzung für die effektive Ausführung derer dar. Die Wirkung von Maßnahmen, die der Phase prepare zugeordnet werden, besteht somit in erster Linie in einer Wirkungsverstärkung und in einer Erhöhung der Effektivität der Maßnahmen in den übrigen Phasen.

Maßnahmen der Phase prevent reduzieren die Wahrscheinlichkeit, dass es bei disruptiven Ereignissen zu einer negativen Einwirkung auf die Funktionalität des Systems kommt. Lässt sich die Einwirkung auf die Funktionalität nicht vollständig vermeiden, entfalten (meist objektbezogene) Maßnahmen, welche der Phase protect zugeordnet werden können, ihre Wirkung unmittelbar zum Zeitpunkt des Eintretens eines disruptiven Ereignisses. Der absolute Funktionalitätsverlust sowie die Zeit, welche vergeht bis die minimale Funktionalität erreicht ist, lassen sich durch diese Maßnahmen reduzieren.

Schnelle und gut organisierte Sofortmaßnahmen der Phase respond sorgen dafür, dass das aus dem Ereignis resultierende Schadensausmaß reduziert und die Funktionalität des Systems möglichst aufrechterhalten wird. Maßnahmen der Phase respond reduzieren ebenfalls den Funktionalitätsverlust sowie die Zeit, welche vergeht bis die minimale Funktionalität erreicht ist. Abschließend zeichnet sich ein resilientes System vor allem auch dadurch aus, dass es in der Lage ist, sich möglichst schnell zu erholen und adaptiv einen Lerneffekt aus dem Ge-

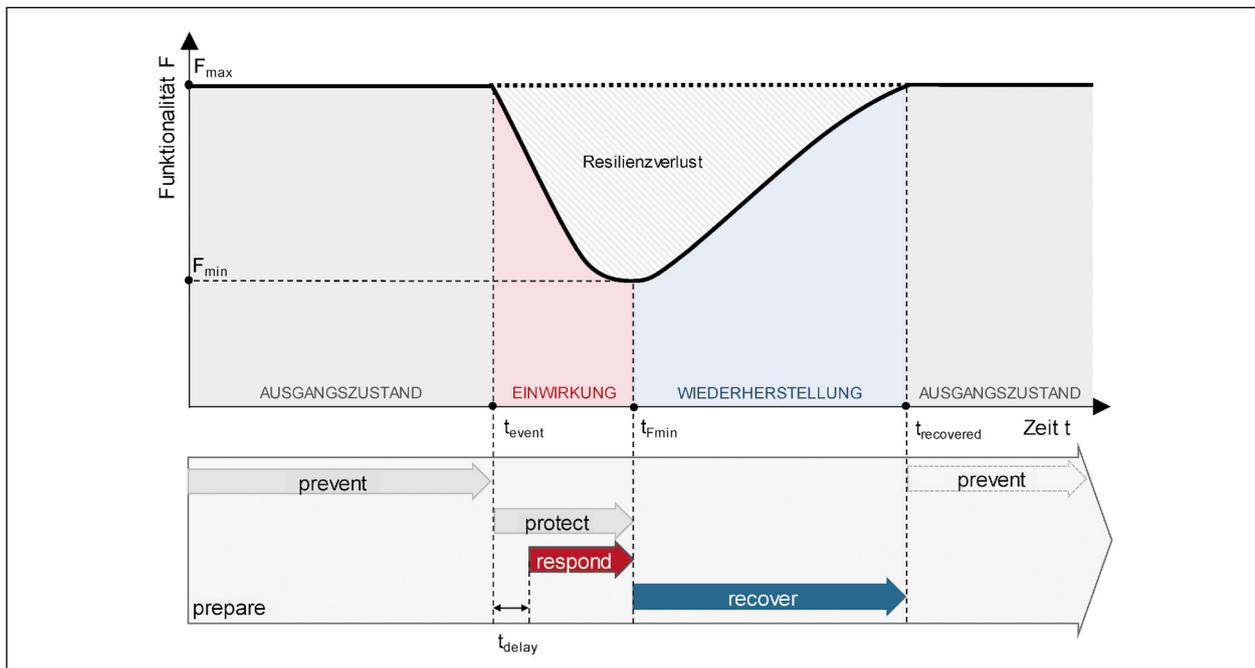


Bild 4: Zeitpunkt der Wirkungsentfaltung von Resilienzmaßnahmen der verschiedenen Phasen

schehen zu gewinnen, um für künftige Ereignisfälle besser gewappnet zu sein und die Stärke der Einwirkungen zu minimieren (Resilienzphase recover).

Bild 4 zeigt anhand der Funktionalitätskurve grafisch auf, zu welchem Zeitpunkt die Maßnahmen der einzelnen Phasen ihre Wirkung entfalten. Die Pfeile unterhalb der schematischen Resilienzkurve repräsentieren den jeweiligen Zeitraum der Wirkungsentfaltung von Resilienzmaßnahmen der Phasen prepare, prevent, protect, respond und recover. Die rot und blau markierten Pfeile weisen auf den Untersuchungsfokus des vorliegenden Forschungsvorhabens hin.

Maßnahmen der Phasen prevent, protect, respond und recover können auf Objekt- sowie Systemebene wirken und technischer oder organisatorisch/plannerischer Art sein. Maßnahmen der Phase prepare hingegen entfalten ihre Wirkung ausschließlich auf organisatorisch/plannerischer Ebene.

### 2.3 Rahmenbedingungen und Grundsätze für die Konzept- und Methodenentwicklung

Zusätzlich zur Literaturanalyse werden an dieser Stelle die wichtigsten Grundsätze und Anforderungen für eine Implementierung eines gesamtheitlichen Resilienzmanagements erörtert und festgelegt. Hierbei steht neben wirtschaftlichen Aspekten

insbesondere auch der Aspekt der Praxistauglichkeit/Umsetzbarkeit von Maßnahmen bzw. Konzepten im Vordergrund. Hervorgehoben werden die folgenden Rahmenbedingungen und Grundsätze:

- Die entwickelten Ansätze sind auf ihre organisatorische, rechtliche und technische Anwendbarkeit für Deutschland hin zu überprüfen. Dies wurde insbesondere durch Diskussionen im Betreuerkreis sichergestellt.
- Bei der Konzeption des Lösungsansatzes geht es nicht darum, neue Methoden und neue Maßnahmen zu entwickeln, sondern nach Möglichkeit bestehende Ansätze, Methoden und Maßnahmen im Sinne des oben geschilderten Resilienzmanagements zu identifizieren und zielgerichtet anzuwenden.
- Die Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses hilft, finanzielle Mittel möglichst effizient einzusetzen, indem sie den Anwender bei der Findung möglichst kostenwirksamer Maßnahmen für die Erhöhung der Resilienz unterstützt. Im Umkehrschluss bedeutet dies auch, dass eine argumentative Grundlage geschaffen wird, um höhere Kosten für im Vergleich zur Norm oder anderen Standards umfangreichere Resilienzmaßnahmen zu rechtfertigen: Durch geeignete, über die Vorgaben der Norm hinausreichende Resilienzmaßnahmen werden idealerweise in der Summe die volkswirtschaftlichen Kosten unter der Einwir-

kung disruptiver Ereignisse langfristig reduziert. Dabei ist aber auch zu berücksichtigen, dass die gewählten Resilienzmaßnahmen in einer vertretbaren Verhältnismäßigkeit mit dem zu erwartenden gesellschaftlichen Nutzen stehen müssen.

- In den vorliegenden Untersuchungen wird ein konzeptioneller Vorschlag für ein ganzheitliches Resilienzmanagement erarbeitet. Die zu entwickelnden methodischen Ansätze richten sich aufgrund der Zielsetzung des Projekts jedoch ausschließlich auf jene Prozess-Elemente des Resilienzmanagements, die für eine Beurteilung der Resilienz sowie die Identifikation und Priorisierung von Maßnahmen entscheidend sind.
- Bei der Identifikation und Priorisierung von Resilienzmaßnahmen liegt der Fokus der Untersuchungen auf jenen Maßnahmen, die ihre Wirkung in den Resilienzphasen respond und recover entfalten. Dabei kann es vorkommen, dass diese Maßnahmen teilweise bereits in früheren Resilienzphasen eingeleitet und umgesetzt wurden, aber ihre Wirkung erst zu einem späteren Zeitpunkt entfalten.
- Der Fokus der vorliegenden Untersuchung richtet sich auf Straßeninfrastrukturen. Eine spätere Übertragbarkeit auch auf andere Verkehrsträger (z. B. im Rahmen des BMVI Expertennetzwerks) ist wünschenswert, aber nicht als Ziel der vorliegenden Untersuchungen definiert.
- Bei der Analyse der Resilienz von Straßeninfrastrukturen stehen als besonders kritische Systemelemente Brücken und Tunnel im Fokus der Untersuchungen. Disruptive Ereignisse mit einer Einwirkung auf diese Objekte führen in der Regel zu besonders weitreichenden Konsequenzen in der Systemfunktionalität auf Netzebene. Aus diesem Grund wird bei der Konzeption, Umsetzung und exemplarischen Anwendung der zu entwickelnden Methodik eine Ausrichtung auf Brücken und Tunnel vollzogen. Gleichzeitig soll eine möglichst hohe Kompatibilität zu allen weiteren Elementen der Straßeninfrastruktur und auch zu weiteren Verkehrsträgern angestrebt werden.
- Die Methodik beschränkt sich nicht auf einen bestimmten Straßentypus. Das Ziel liegt demgegenüber darin, dass das entwickelte Konzept des Resilienzmanagements und die Methodik zur

Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses auf unterschiedlichste Straßensysteme anwendbar sein wird. Typische Anwendungsumfänge wären beispielsweise das Bundesfernstraßennetz oder aber das Straßennetz einer bestimmten Stadt.

- Das Vorgehen und die Methodik stützen sich auf die Erkenntnisse des Vorgänger-Forschungsprojekts FE 89.320/2016 und erweitern diese durch eine Einbettung in den Kontext eines gesamtheitlichen Resilienzmanagements. Die im Vorgängerprojekt erarbeiteten Definitionen von Resilienz und Resilienzmaßnahmen sowie die methodischen Ansätze zur Beurteilung von Resilienz und Bewertung von Maßnahmen bilden wichtige Grundlagen der hier weitergeführten Lösungsansätze.
- Es ist sicherzustellen, dass der hier beschriebene Lösungsansatz mit den Erkenntnissen aus dem Forschungsvorhaben FE 15.0627/2016/ARB [21] kompatibel ist.
- Das vorliegende Forschungsvorhaben soll sich in die mittelfristigen Forschungsziele der BASt (Forschungslinie 1.03) logisch eingliedern. Dies insbesondere mit dem Blick zurück auf das Vorgängerprojekt FE 89.320/2016, aber auch im Hinblick auf das parallellaufende Forschungsvorhaben FE 15.0627/2016/ARB.
- Das vorliegende Forschungsvorhaben bettet sich zudem in die Zielsetzungen des BMVI Expertennetzwerks ein, das Lösungsansätze für Verkehrsfragen der Zukunft durch Innovationen in den Bereichen Klimaanpassung, Umweltschutz und Risikomanagement anstrebt. Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es, einen konkreten Beitrag zu den Inhalten des BMVI Expertennetzwerks, insbesondere im Themenfeld 3 «Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur erhöhen» (Projekt: «Quantifizierung und Prognose der Verfügbarkeit und Sicherheit von Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen») zu leisten.

#### **Anmerkung zur Projektbegrenzung**

Bei den in diesem Forschungsvorhaben erarbeiteten Lösungsansätzen handelt es sich um generische Methoden. Das heißt, dass die Methoden nicht nur für das Straßeninfrastrukturmanagement, sondern auch für vielfältige andere Bereiche/Systeme

zum Einsatz kommen können. Gleichzeitig erlauben die methodischen Ansätze auch eine Anwendung zur Maßnahmenfindung mit einer Resilienz Wirkung in allen Phasen des Resilienzzyklus. Der Fokus des vorliegenden Forschungsprojekts liegt entsprechend der formellen Vorgaben des Forschungsgebers ausschließlich auf der Identifikation und Beurteilung von Maßnahmen, welche in den Phasen respond und recover ihre Wirkung entfalten. Dies führt dazu, dass auch im Rahmen der Methodenentwicklung ausschließlich Aspekte der Resilienzoptimierung bearbeitet werden, die dieser Projektabgrenzung entsprechen. Somit wird die Bandbreite von Kriterien zur Ermittlung der bestehenden Resilienz im Zuge des Resilienzscreenings (Kapitel 4.2) sowie die Auswahl möglicher Maßnahmenfelder zur Erhöhung der Resilienz (Kapitel 4.2.5) entscheidend eingeschränkt.

### 3 Konzept zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses

#### 3.1 Übersicht

In Bild 5 ist das Konzept für den Lösungsansatz zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses nach disruptiven Ereignissen auf ein Straßeninfrastruktursystem dargestellt.

Das Konzept gliedert sich in die drei folgenden Hauptelemente. Aufgrund ihres hohen Stellenwerts werden die Methodik sowie das Handbuch und das

Anwendungsbeispiel in separaten Hauptkapiteln dokumentiert.

- 1) Einbettung des Lösungsansatzes in den Kontext eines gesamtheitlichen Resilienzmanagements (→ Kapitel 3.2).
- 2) Entwicklung einer anwenderfreundlichen Methodik zur Identifikation, Wirkungsbeurteilung und Priorisierung von geeigneten Resilienzmaßnahmen als Hilfestellung bei der Maßnahmenfindung (→ Kapitel 4).
- 3) Praxisanleitung der Methodik anhand eines Handbuchs (→ Kapitel 5) sowie eines Anwendungsbeispiels (→ Kapitel 6).

#### 3.2 Einbettung in den Kontext des Resilienzmanagements

Die Entwicklung eines Resilienzmanagements ist insofern von Bedeutung, als dass nur durch ein gesamtheitliches Verständnis für das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten der Resilienz Betrachtung die Resilienz eines Systems dauerhaft gewährleistet, respektive im Bedarfsfall erhöht werden kann. Auf Grundlage der Erkenntnisse aus der Situationsanalyse (Kapitel 2) wurde der Resilienzmanagementprozess in Bild 6 erarbeitet. Er beschreibt das iterative/zyklische Vorgehen, welches für ein effektives und effizientes Resilienzmanagement durchlaufen werden muss. Gleichzeitig dient der Resilienzmanagementprozess als wichtige Orientierung für eine zielgerichtete Umsetzung und Anwendung von organisatorischen Schritten, um die Resilienz eines Systems zu prüfen und bei Bedarf durch

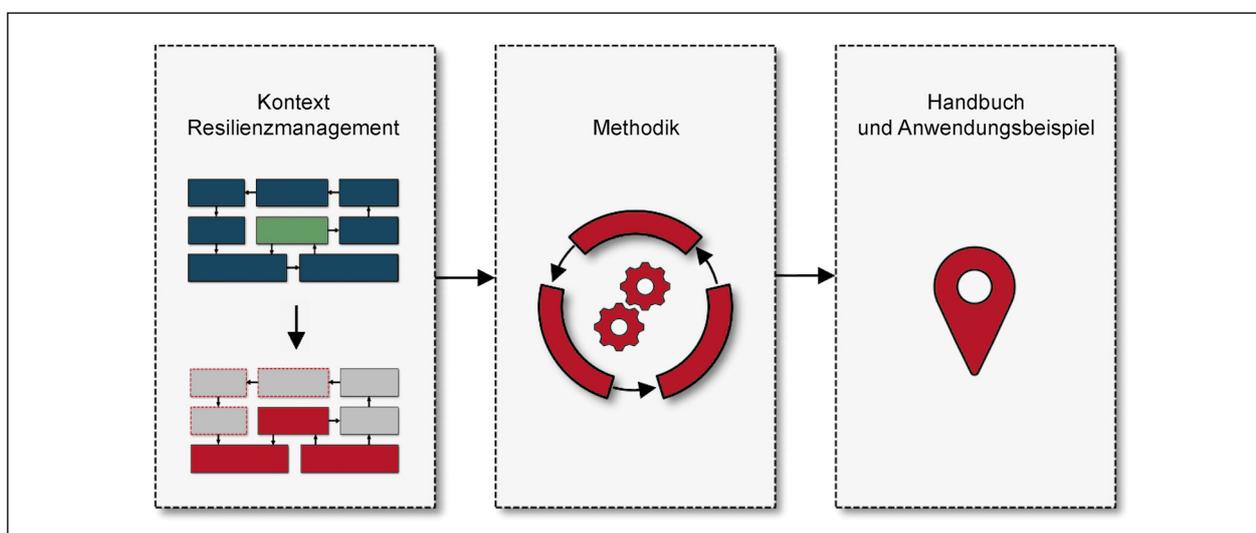


Bild 5: Konzept zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses

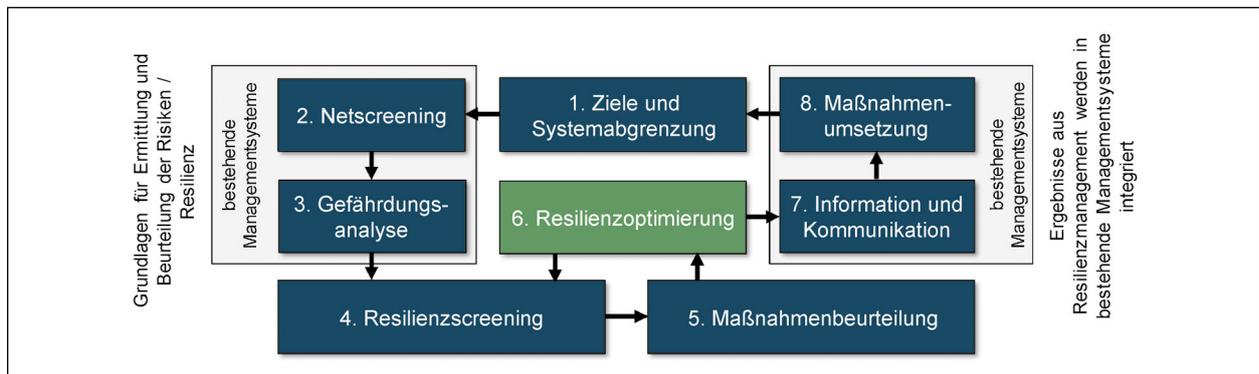


Bild 6: Grafische Darstellung des Resilienzmanagementprozesses

geeignete Maßnahmen zu erhöhen. Zudem werden Schnittstellen zu anderen, bereits weitgehend bestehenden Managementsystemen aufgezeigt, um einen gemeinsamen Mehrwert zu erzeugen. Dies fördert die Abstimmung und effiziente Maßnahmenfindung sowie Maßnahmenumsetzung.

Der Resilienzmanagementprozess umfasst die folgenden Prozesselemente:

#### 1. Ziele und Systemabgrenzung

Das Resilienzmanagement benötigt eine Zieldefinition und eine klare Systemabgrenzung. Dies erfordert eine sorgfältige Erörterung der Zielsetzungen im Diskurs mit den betroffenen Interessensvertretern/Stakeholdern, denn die Zieldefinition und Systemabgrenzung beeinflussen das weitere Vorgehen respektive die Maßnahmenfindung maßgeblich. Sowohl das Netscreening als auch die Identifikation geeigneter Kriterien im Rahmen des Resilienzscreenings, die Festlegung der Funktionalitäten bei der Maßnahmenbeurteilung sowie die Beurteilung des Systems und der Maßnahmen selbst, hängen direkt von den angestrebten Zielen und der räumlichen, zeitlichen sowie inhaltlichen Systemabgrenzung ab. Eine nachträgliche Anpassung der Zieldefinition und Systemgrenzen ist jedoch elementarer Bestandteil des iterativen bzw. zyklischen Prozesses.

#### 2. Netscreening und 3. Gefährdungsanalyse

Auf Grundlage der Zieldefinition und Systemabgrenzung werden anschließend im Rahmen des Netscreenings die kritischsten und verletzlichsten Objekte innerhalb des zu verantwortenden Systems identifiziert. Die Kritikalitätsanalyse beinhaltet eine Beurteilung möglicher direkter und indirekter Konsequenzen (Schadensausmaß) für das Objekt und das Gesamtnetz im Falle von Einwirkungen auf das System und einer dadurch

verursachten Einschränkung dessen Funktionalität. Die Konsequenzen ergeben sich aus dem zeitlich integrierten Schadensausmaß auf Objekt- und Netzebene. Es folgt eine detaillierte Auflistung der potenziellen Gefährdungsbilder (mögliche disruptive Ereignisse) sowie der Vulnerabilität der kritischen Elemente. Eine Konzentration der Resilienzüberlegungen lediglich auf die kritischsten Elemente im System ermöglicht es, die häufig finanziell und personell beschränkten Ressourcen zu konzentrieren und durch zielgerichtete Maßnahmen einen möglichst großen Effekt auf die Resilienz des Gesamtsystems zu erzeugen.

#### 4. Resilienzscreening

Das Resilienzscreening bildet zusammen mit der Maßnahmenbeurteilung und der Resilienzoptimierung das Kernstück des Resilienzmanagementprozesses. Diese drei Elemente sind sehr stark miteinander verknüpft, denn aus dem Resilienzscreening entstehen Hinweise für situationsangepasste, zielgerichtete Maßnahmen, die nach ihrer Umsetzung wiederum zu einem veränderten Resultat des Resilienzscreenings führen. Das Resilienzscreening erfolgt anhand eines Kriterienkatalogs mit übergeordneten Resilienzskriterien. Das Ziel des Resilienzscreenings liegt darin, aufzuzeigen, auf welchem (Resilienz-)Niveau sich das System aktuell befindet und wo weiterer Handlungsbedarf besteht, um die Resilienz des Systems zu erhöhen. Erfüllt das System im Ausgangszustand die durch die Zielsetzung definierten Anforderungen nicht, müssen potenzielle Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz identifiziert werden.

#### 5. Maßnahmenbeurteilung

Die Beurteilung der Maßnahmen erfolgt auf Grundlage ihrer erwarteten Resilienzwirkung.

Die Resilienz Wirkung von Maßnahmen lässt sich anhand des durch die einzelnen Maßnahmen veränderten Verlaufs der Funktionalität eines Systems über die Zeit<sup>2</sup> ermitteln. Je nach verfügbaren Ressourcen und Datengrundlagen umfasst die Beurteilung der potenziellen Resilienz Wirkung eine Spannweite von aufwändigen datengetriebenen Berechnungen der veränderten Funktionalitätskurve bis hin zu einer pragmatischen Expertenschätzung anhand einer vereinfachten Funktionalitätsstruktur.

6. Resilienzoptimierung

Die Resilienzoptimierung umfasst die Priorisierung von Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen. Dafür wird die Kostenwirksamkeit ermittelt, indem die Lebenszykluskosten der Maßnahmen der zu erwartenden Resilienz Wirkung gegenübergestellt werden. Der Resilienzgewinn zeigt sich in dem durch die Umsetzung der Resilienzmaßnahmen veränderten Resultat im Rahmen eines erneuten Resilienzscreenings. Weist das Resilienzscreening weiterhin Handlungsbedarf aus, so sind weitere Maßnahmen zu ergreifen und der Loop bestehend aus Resilienzscreening, Maßnahmenbeurteilung und Resilienzoptimierung ist erneut zu durchlaufen.

7. Information/Kommunikation und 8. Maßnahmenumsetzung

Nach dem Entscheid für eine oder mehrere Maßnahmen werden diese über geeignete Ka-

näle an zuvor definierte Adressaten kommuniziert. Im Anschluss daran erfolgt die Umsetzung der Maßnahmen. Durch die zyklische Struktur des Resilienzmanagementprozesses findet eine kontinuierliche, wiederkehrende Spiegelung der tatsächlichen Wirkung der umgesetzten Maßnahmen mit den anfänglich gesteckten Zielen des Resilienzmanagements statt. Je nach Erkenntnis startet der Zyklus von Neuem und die einzelnen Schritte des Resilienzmanagementprozesses werden erneut durchlaufen.

**Abgrenzung**

Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses. Das Forschungsprojekt behandelt somit nicht den gesamten Resilienzmanagementprozess, sondern beschränkt sich in Abstimmung mit dem Betreuerkreis auf jene Prozesselemente, welche für eine Beurteilung der Resilienz sowie die Identifikation und Priorisierung von Maßnahmen entscheidend sind. Die relevanten Prozesselemente sind in Bild 7 in Rot hervorgehoben. Für die relevanten Prozesselemente (Resilienzscreening, Maßnahmenbeurteilung, Resilienzoptimierung) werden im Rahmen des Forschungsprojekts methodische Lösungsansätze erarbeitet.

In der wissenschaftlichen Literatur liegen bereits zahlreiche Ansätze für ein „klassisches“ Risikomanagement vor. Aus diesem Grund werden für die grau dargestellten Elemente im Rahmen dieses Berichts keine neuen methodischen Lösungsansätze erarbeitet. Unter anderem haben sich auch europäische Forschungsprojekte intensiv mit Gefährdungs- und Vulnerabilitätsanalysen auseinandergesetzt, sodass an dieser Stelle auf die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeiten verwiesen wer-

<sup>2</sup> Die Veränderung des Verlaufs der Funktionalität eines Systems über die Zeit entspricht der Veränderung der Resilienzfläche durch den Maßnahmeneinfluss.

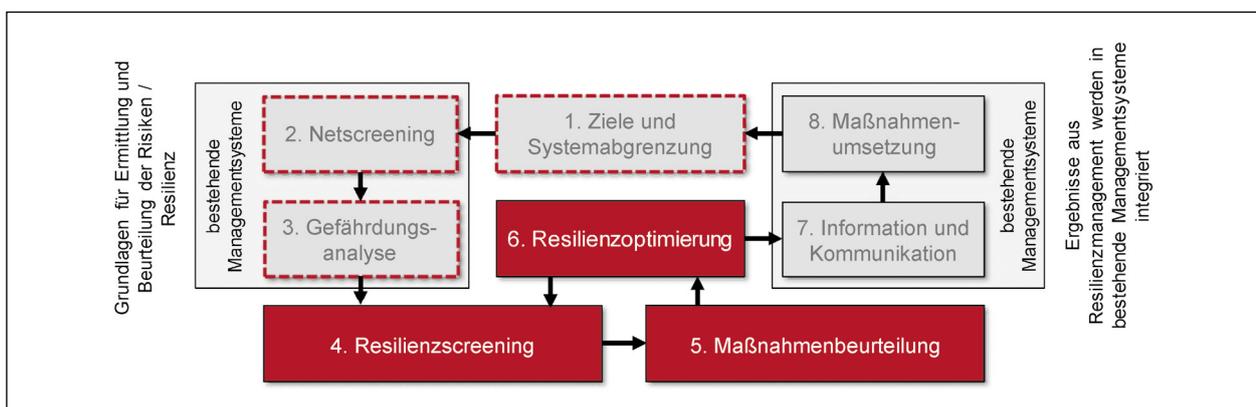


Bild 7: Für die vorliegende Arbeit relevante Prozesselemente

den kann [1] – [4] [9] [15] [23]. Die Situationsanalyse hat dem hingegen gezeigt, dass insbesondere für die Resilienzoptimierung in zirkulärer Verknüpfung mit dem Resilienzscreening und der Maßnahmenbeurteilung Forschungsbedarf besteht. Eine Durchführung der Resilienzoptimierung ist allerdings nur möglich, wenn vorgängig die Ziele und Systemgrenzen festgelegt wurden und anhand eines Netscreenings mit Gefährdungsanalyse die verletzlichsten und kritischsten Elemente des Systems erkannt wurden. Aus diesem Grund sind diese drei Elemente rot-gestrichelt umrandet.

In Anhang A1 werden deswegen Überlegungen und Hinweise zur Bearbeitung dieser Prozesselemente gegeben, ohne dabei spezifisch auf Methoden einzugehen. Für das Anwendungsbeispiel (Kapitel 6) wird eine Systemabgrenzung vorgenommen. Die kritischen Straßeninfrastrukturelemente werden als gegeben angenommen.

## 4 Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses

### 4.1 Übersicht

Bild 8 zeigt die vertieft untersuchten Prozessschritte mit den weiteren methodischen Elementen.

Die Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses umfasst in einer zyklischen Iteration die folgenden Module:

- 1) Resilienzscreening, bestehend aus der Erfassung der aktuellen Systemresilienz anhand eines Kriterienkatalogs. Daraus lässt sich der Handlungsbedarf ermitteln und die breite Auswahl potenzieller Maßnahmen für die spätere und aufwändigere Maßnahmenbeurteilung eingrenzen.
- 2) Maßnahmenbeurteilung, bestehend aus der Festlegung der zu berücksichtigenden Systemfunktionalitäten sowie der Abschätzung der Resilienzwirkung auf das System durch jede Maßnahme.
- 3) Resilienzoptimierung, bestehend aus der Erfassung der Maßnahmenkosten, der Bewertung der Maßnahmen aufgrund von Kosten-Wirksamkeits-Betrachtungen und einer im Sinne der Resilienz optimierten Priorisierung von einzelnen oder kombinierten Maßnahmen unter Berücksichtigung und Gegenüberstellung ihrer individuellen und kombinierten Resilienzwirkung sowie einer gesamtheitlichen Kostenbetrachtung.

Das methodische Vorgehen für die einzelnen Schritte wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

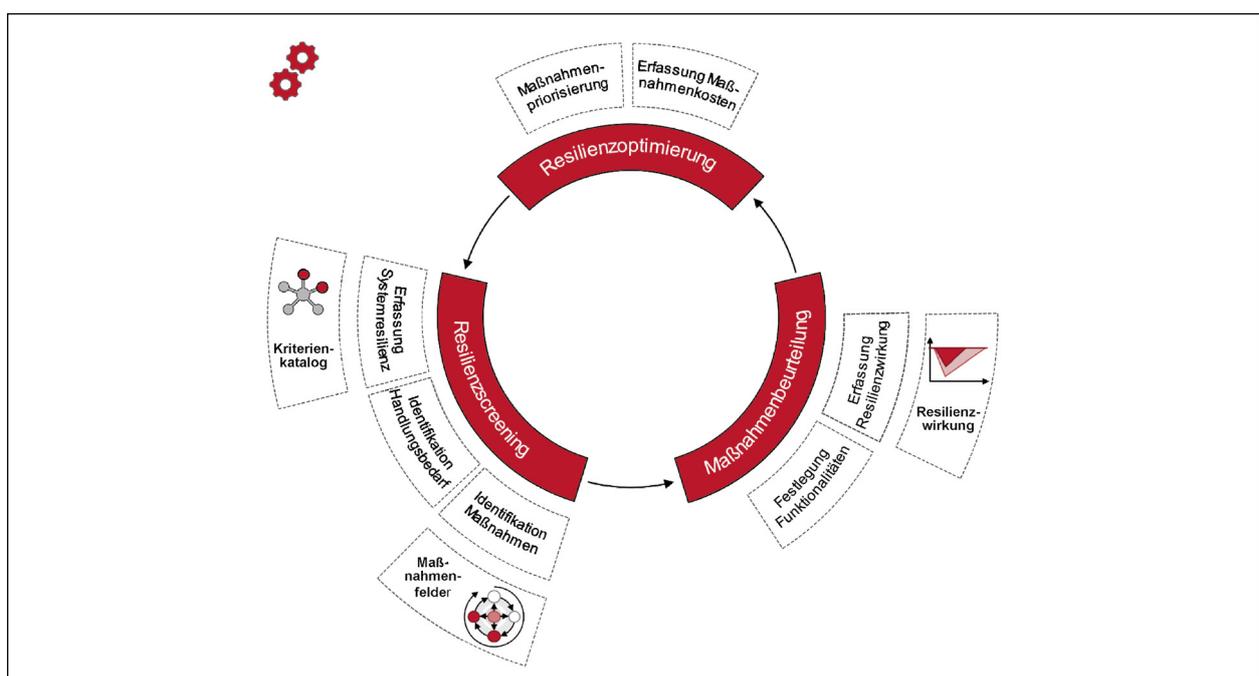


Bild 8: Bestandteile der Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses

## 4.2 Resilienzscreening

### 4.2.1 Ziel des Resilienzscreenings

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. Konkret soll durch ein der Maßnahmenbeurteilung vorgelagertes Resilienzscreening

- die Resilienz des Systems anhand eines Katalogs mit übergeordneten Fragestellungen überprüft werden, und zwar anhand von Resilienzkriterien, 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 (Kapitel 4.3) hinsichtlich ihrer Resilienzwirkung beurteilt und priorisiert werden. So können die Untersuchungen zur Maßnahmenwirkung zielgerichteter und effizienter durchgeführt werden.

### 4.2.2 Festlegung Kriterienkatalog

Für das aktuelle Forschungsprojekt ist seitens des Forschungsgebers und entsprechend der inhaltlichen Projektdefinition eine Anwendung im Straßeninfrastrukturbereich mit Fokussierung auf die Resilienzphasen respond und recover vorgegeben. Es bietet sich daher an, auf bereits aus anderen Untersuchungen und Forschungsprojekten bestehende Kriterienkataloge zurückzugreifen. Für diese Forschungsarbeit wurden die Kriterienkataloge aus dem Neuseeländischen [25] sowie dem Europäischen Forschungsprojekt RESILENS [17] als Grundlage für die Entwicklung eines Kriterienkatalogs verwendet. Diese beiden bestehenden Kriterienkataloge wurden auf ihre Anwendbarkeit auf deutsche Verhältnisse überprüft, die enthaltenen Kriterien vereint, Überschneidungen in den Fragestellungen eliminiert und mit eigenen Überlegungen und zusätzlichen Kriterien ergänzt.

Bei der Erstellung des Kriterienkatalogs für das Resilienzscreening wurde folgendermaßen vorgegangen:

#### 1. Synthese

Die teils redundanten Indikatoren aus [25] und [17] wurden in einen gemeinsamen Kriterienkatalog überführt. Dabei wurde die Kriterienliste aus [17] als Grundlage verwendet und mit den Kriterien aus [25] ergänzt. Weiter wurden nur Kriterien übernommen, welche das System hinsichtlich der Umsetzung von Resilienzmaßnahmen in den Phasen respond und recover beurteilen.

#### 2. Anpassung des Detaillierungsgrades und Bereinigung der Kriterien

Die in [25] und [17] verwendeten Kriterien besitzen einen hohen Detaillierungsgrad. Dieser ist insofern hinderlich, als dass der hier verwendete Kriterienkatalog abschließend sein soll. Dies bedeutet, dass jede denkbare Resilienzmaßnahme der Phasen respond und recover mindestens ein Kriterium beeinflusst. Ein hoher Detaillierungsgrad der Kriterien wie er in [25] und [17] zu finden ist, zielt pro Kriterium häufig auf eine einzelne, sehr konkrete Maßnahme ab. Im vorliegenden Lösungsansatz erfolgt eine Verringerung dieses Detaillierungsgrades durch verallgemeinerte Formulierungen und einer Bündelung einzelner Kriterien mit vergleichbarer Bedeutung für die Resilienz des Systems. Jedem Kriterium lässt sich nun ein oder mehrere sogenannte Maßnahmenfelder zuweisen, die eine oder mehrere konkrete Maßnahmen beinhalten. Die Anwendbarkeit der Methodik wird dadurch deutlich verbessert.

#### 3. Ergänzung des Kriterienkatalogs

Der aus den beiden bestehenden Forschungsprojekten zusammengeführte Kriterienkatalog wurde dahingehend überprüft, ob wichtige Kriterien fehlen und der Detaillierungsgrad über alle Kriterien einheitlich ist. Auf dieser Grundlage wurde der Kriterienkatalog angepasst, ergänzt und vervollständigt.

#### 4. Vereinheitlichung der Bewertungsskala

Da in [25] und [17] unterschiedliche Bewertungsskalen verwendet wurden, mussten die Kriterien sowie die Bewertungsskalen verein-

heitlicht werden. Dabei wurde die Bewertungsskala aus [17] übernommen (Skala von 0 bis 5, wobei 5 dem höchsten Zielerreichungsgrad entspricht). Die Kriterien respektive Bewertungsskalen aus [25] wurden entsprechend angepasst sowie für die eigens hinzugefügten Kriterien Bewertungsskalen definiert.

## 5. Gliederung nach Dimensionen

Die einzelnen Kriterien aus dem harmonisierten und ergänzten Kriterienkatalog wurden fünf verschiedenen Kategorien – sogenannten Dimensionen – zugeordnet. Diese Dimensionen werden auch im Bericht des deutschen Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) «Assessing and Monitoring Climate Resilience» [14] verwendet und sind unterteilt in: sozial/gesellschaftlich, ökologisch, wirtschaftlich, physisch/technisch sowie organisatorisch<sup>3</sup>. Dahinter steckt die Annahme, dass durch diese Dimensionen die gesamte Bandbreite möglicher Funktionalitäten eines Systems abgedeckt wird. Im vorliegenden Forschungsprojekt werden die Dimensionen ökologisch und sozial/gesellschaftlich im Resilienzscreening nicht berücksichtigt, da der Fokus auf der Beurteilung

der Resilienz der Straßeninfrastruktur liegt. Auch bei der auf das Resilienzscreening folgenden Maßnahmenbeurteilung lassen sich die definierten Systemfunktionalitäten diesen Dimensionen zuweisen. Auf diesem Weg wird eine Wirkungskonsistenz zwischen den drei Prozesselementen Resilienzscreening, Maßnahmenbeurteilung und Resilienzoptimierung sichergestellt. Im Unterschied zum Resilienzscreening decken die Systemfunktionalitäten in der Maßnahmenbeurteilung alle Dimensionen ab.

## 6. Teilbetrachtung und Gewichtung

Durch die Einteilung des Kriterienkatalogs in Dimensionen wird eine Teilbetrachtung des Systems ermöglicht. Neben einem Resilienzscore (vgl. Kapitel 4.2.3) für das Gesamtsystem kann ein mittlerer Resilienzwert für die einzelnen Dimensionen berechnet werden. Entsprechend ihrer Relevanz für die Systemresilienz können Gewichtungen für die einzelnen Kriterien, aber auch für die ganze Dimension 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.

<sup>3</sup> Die in mehreren Forschungsberichten neben den Dimensionen ebenfalls genannten drei relevanten System-Kapazitäten absorptive, adaptive und transformative capacities zur Definition von Resilienz sind im vorliegenden Forschungsprojekt durch die gewählte holistische Resilienzbeurteilung anhand der Resilienzkurve (siehe Bild 2) repräsentiert.

In Tabelle 4 ist der entwickelte Kriterienkatalog dargestellt. Da sich die Identifikation von Maßnahmen auf jene der Phasen respond und recover beschränkt (Kapitel 4.2.5), fokussieren die Kriterien ebenfalls auf die Maßnahmenfelder dieser beiden

Dimension	Kriterien
ORGANISATORISCH	1 Sind die Verantwortlichkeiten definiert und den Verantwortlichen Rollen und Funktionen zugewiesen (auch außerhalb des Ereignisfalls)?
	2 Existieren Notfallpläne für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis (respond), welche die Bewältigung dieses Ereignisses hinreichend ermöglichen?
	3 Existieren Wiederherstellungspläne, welche die Bewältigung von disruptiven Ereignissen hinreichend ermöglichen/die Wiederherstellung (recover) beschleunigen?
	4 Ist eine Interoperabilität (d. h. z. B. Harmonisierung Kommunikation, Harmonisierung Notfallpläne, Harmonisierung IT-Systeme, Harmonisierung technische Ausrüstung, funktionierende Zusammenarbeit zwischen den Akteuren) zwischen den Stakeholdern gewährleistet?
	5 In welchem Umfang können Humanressourcen für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis (respond) aktiviert werden?
	6 In welchem Umfang können Humanressourcen für die Phase der Wiederherstellung (recover) aktiviert werden?
	7 Verfügen die Humanressourcen über eine ausreichende Ausbildung/ausreichende Fähigkeiten, um die ihnen zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen?

Tab. 4: Kriterienkatalog mit Zuordnung der Kriterien zu den Dimensionen organisatorisch, wirtschaftlich und physisch/technisch

Dimension	Kriterien
WIRTSCHAFTLICH	8 In welchem Umfang können innerhalb einer nützlichen Frist finanzielle Mittel für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis (respond) aktiviert werden?
	9 In welchem Umfang können innerhalb einer nützlichen Frist finanzielle Mittel für die Phase der Wiederherstellung (recover) aktiviert werden?
PHYSISCH/TECHNISCH	10 In welchem Umfang können materielle Ressourcen/technische Ausrüstung für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis (respond) aktiviert werden?
	11 In welchem Umfang können materielle Ressourcen/technische Ausrüstung für die Phase der Wiederherstellung (recover) aktiviert werden?
	12 Wie groß ist die Reichweite von Kommunikationssystemen zur Information/Warnung der Betroffenen bei einem disruptiven Ereignis?
	13 Existiert ein Krisen-/Notfallzentrum mit ausreichender Ausstattung?
	14 Existieren technische Einrichtungen am Objekt, welche die Funktionalität im Bedarfsfall erhöhen? (z. B. Sprinkleranlagen, Rauchgasabsaugungsanlagen, verkürzte Notausgangsabstände in Tunnel)
	15 Wie viele kritische Objekte verfügen über alternative Routen, mit einer maximalen Reisezeiterhöhung von 30 Minuten?
	16 Verfügen die alternativen Routen über freie Kapazitäten?
17 Wie viele kritische Objekte verfügen über alternative Verkehrsträger, welche bei einem disruptiven Ereignis als Alternative darstellen können?	

Tab. 4: Fortsetzung

Phasen. Der Kriterienkatalog inklusive der Bewertungsskala kann Anhang A2 entnommen werden.

#### 4.2.3 Erfassung Systemresilienz

Während der dem Resilienzscreening vorausgehenden Schritte des Resilienzmanagementprozesses (Ziele und Systemdefinition, Netscreening und Gefährdungsanalyse, siehe Bild 7) muss exakt definiert werden, für welche Systemelemente, innerhalb welcher inhaltlichen, räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen und unter Berücksichtigung welcher Zielsetzungen das Resilienzscreening durchgeführt werden soll.

Im ersten Schritt des Resilienzscreenings wird die Resilienz des definierten Systems anhand der oben genannten Kriterien quantitativ erfasst (Nutzwertanalyse). Für jedes Kriterium wird dessen Zielerreichung anhand eines Punktesystems bestimmt. Jedem Kriterium werden anhand einer vordefinierten Bewertungsskala (Anhang A2) zwischen 0 und 5 Punkte – sogenannte Resilienzscore – zugewiesen. Die Zuteilung der Punkte auf Grundlage der definierten Resilienzkriterien basiert auf Expertenschätzungen und erfolgt durch den verantwortlichen Straßeninfrastrukturbetreiber, gegebenenfalls unter dem Beirat der für sein System relevanten Stakeholder. Für die gemeinsame konsolidierte Abschätzung des Resilienzscore bietet sich ein Delphi-Verfahren [11] [12] [28] an.

Als Resultat erhält der Anwender

- je einen Resilienzscore pro Kriterium als direktes Resultat aus den Expertenschätzungen;
- je einen Resilienzscore pro Dimension. Dieser errechnet sich aus dem Mittelwert der Resilienzscore derjenigen Kriterien, welche der entsprechenden Dimension angehören;
- einen Resilienzscore des Gesamtsystems. Dieser errechnet sich aus dem Mittelwert der Resilienzscore aller Kriterien.

Mithilfe des Resilienzscore des Gesamtsystems können verschiedene Systeme (z. B. Teilnetze einer Stadt, regionale Autobahnnetze) hinsichtlich ihres Zielerreichungsgrads miteinander verglichen werden. Weiter können die Resilienzscore der Kriterien und Dimensionen verwendet werden, um einzelne Elemente des Systems untereinander zu vergleichen. Neben den Möglichkeiten einer quantifizierten Standortanalyse und des Benchmarkings dienen die Resilienzscore vor allem der Identifikation des potenziellen Handlungsbedarfs zur Erhöhung der Systemresilienz.

#### 4.2.4 Identifikation des Handlungsbedarfs

Auf Grundlage der Resilienzscore lässt sich der Handlungsbedarf ermitteln. Dafür werden die Resilienzscore unter Einbezug einer durch den Anwen-

der definierten Gewichtung zuerst in einen Resilienz-Defizit-Index (RDI) und anschließend in einen Handlungsbedarfs-Index (HI) überführt. Die Gewichtung gibt dem Anwender 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 Resilienz-Defizit-Index (Skala von 0 bis 100) gemäß folgender Formel:

$$\text{RDI} = (5 - \text{RS}) \times \frac{100}{5} \quad (2)$$

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.

2. Für die Herleitung des HI wird den Kriterien, respektive den Dimensionen ein Gewicht (G, in %) zugeordnet, mit welchem die RDIs der Kriterien zu multiplizieren sind.

$$\text{HI} = \text{RDI} \times G_{\text{Kriterium}} \times G_{\text{Dimension}} \quad (3)$$

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 das gleiche Gewicht und werden als gleichwertig im Hinblick auf die Resilienz des Gesamtsystems erachtet. Dimensionen, welche eine geringere Anzahl an Kriterien umfassen, erhalten dadurch ein geringeres Gewicht.
- Gleichgewichtung der Dimensionen: Alle Dimensionen haben das gleiche Gewicht und werden als gleichwertig im Hinblick auf die Resilienz des Gesamtsystems erachtet. Kriterien einer Dimension, welche eine geringere Anzahl an Kriterien umfasst, erhalten dadurch ein höheres Gewicht.
- Individuelle Gewichtung: Die Kriterien sowie die Dimensionen können individuell gewich-

tet werden, um einzelnen Dimensionen oder Kriterien einen höheren/geringeren Stellenwert zuzuweisen.

Diese Gewichtungen sollen in der genannten Expertengruppe diskutiert und gegebenenfalls angepasst werden. Die mit der Gewichtung multiplizierten Werte werden auf 100 normiert. Aufgrund der Normierung sind die resultierenden Handlungsbedarfs-Indizes systeminhärent und dürfen nicht für einen direkten Vergleich mit den Handlungsbedarfs-Indizes anderer Systeme herangezogen werden.

Aus dem Mittelwert der gewichteten Handlungsbedarfs-Indizes der Kriterien einer Dimension lassen sich die Handlungsbedarfs-Indizes für die jeweiligen Dimensionen berechnen.

Als Resultat erhält der Anwender

- je einen Handlungsbedarfs-Index pro Kriterium,
- je einen Handlungsbedarfs-Index pro Dimension.

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

3. Auf Grundlage

- der Handlungsbedarfs-Indizes für die einzelnen Kriterien oder
- der Handlungsbedarfs-Indizes für die Dimensionen

werden Maßnahmenfelder vorgeschlagen, aus denen sich konkrete Maßnahmen ableiten lassen. Der Entscheid darüber, sowie die Definition eines Grenzwerts ist wie auch die Zuweisung der Punkte und der Gewichtung in Kapitel 4.2.3 Aufgabe des verantwortlichen Straßeninfrastrukturbetreibers, gegebenenfalls unter dem Beirat der für sein System relevanten Stakeholder. Der Grenzwert gibt den maximal zulässigen Handlungsbedarfs-Index an. Liegt der Handlungsbedarfs-Index oberhalb des Grenzwerts sollten Maßnahmen ergriffen werden.

Es obliegt nun dem Anwender, 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 des ausgewiesenen Handlungsbedarfs auf die notwendigsten Wirkungsbereiche zugeschnitten wird. Nachfolgende Prozessschritte können dadurch zielgerichteter und effizienter bearbeitet werden.

#### 4.2.5 Identifikation von Resilienzmaßnahmen

Jedem Kriterium und damit jeder Dimension des Handlungsbedarfs wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit ein oder mehrere vordefinierte Maßnahmenfelder zugeordnet. Die Maßnahmenfelder werden zusätzlich hinsichtlich ihres Wirkungspotenzials klassifiziert. Das Wirkungspotenzial berechnet sich aus der Anzahl Kriterien, auf welche ein Maßnahmenfeld wirkt, sowie aus dem Handlungsbedarfs-Index dieser Kriterien. Je mehr Kriterien ein Maßnahmenfeld beeinflusst und je höher der Handlungsbedarfs-Index ist (größerer Handlungsspielraum), desto höher das Wirkungspotenzial. Die Maßnahmenfelder werden hierfür zehn Klassen zugeordnet, wobei die Klasse 10 dem höchsten Wirkungspotenzial entspricht. Unter dem Begriff Maßnahmenfeld ist eine Richtungsvorgabe infrage kommender Maßnahmen zu verstehen. Bei der Anwendung der Methodik obliegt es letztendlich dem Straßeninfrastrukturbetreiber/Resilienz-Manager, Maßnahmen auszuwählen und zu konkretisieren, die für das jeweilige Maßnahmenfeld zutreffend und für sein System geeignet sowie umsetzbar sind. Die Liste der Maßnahmenfelder ist zudem nicht abschließend und kann bei Bedarf erweitert werden. Die für das vorliegende Forschungsprojekt erstellte Kreuztabelle ist in Anhang A2 hinterlegt.

Bei Maßnahmen, welche der Phase *respond* zuzuordnen sind, handelt es sich um ausmaßmindernde Maßnahmen, die ihre Wirkung während oder unmittelbar nach dem Ereignis entfalten. Sie zielen darauf ab, im Ereignisfall die Funktionalität des Gesamtsystems möglichst aufrecht zu erhalten (inkl. Schutz noch nicht betroffener Personen, Rettung und Ersthilfe der betroffenen Personen). Sie minimieren die negative Einwirkung und somit den Verlust der Funktionalität im Ereignisfall und erhöhen dadurch die Robustheit des Systems. Dies beinhaltet

zum Beispiel die Erarbeitung von Gefahrenabwehrplänen, schnelle und funktionierende Sofortmaßnahmen oder das Vorhandensein von redundanten Brücken/Tunneln.

Maßnahmen können der Resilienzphase *recover* zugeordnet werden, wenn sie durch ihre Wirkung nach einem disruptiven Ereignis dazu beitragen, dass die Funktionalität und der Betrieb des betroffenen Systems innerhalb möglichst kurzer Zeit wiederhergestellt oder durch Adaptions- oder Lernprozesse gar über den Ausgangszustand hinaus verbessert werden. Als Beispiele können die präventive Festlegung/Bereitstellung von alternativen Routen oder auf Objektebene der zügige, temporäre Austausch nicht funktionsfähiger Elemente durch Lagerung von Ersatzelementen vor Ort genannt werden.

Am Ende dieses Vorgehensschrittes erhält der Anwender eine Auslegeordnung möglicher Resilienzmaßnahmen der Phasen *respond* und *recover*, die den Maßnahmenfeldern des vorgängig identifizierten Handlungsbedarfs zuzuordnen sind und welche im nächsten Schritt in der Maßnahmenbeurteilung auf ihre Resilienzwirkung hin untersucht werden sollen.

Für die anschließend folgenden Prozesselemente der Maßnahmenbeurteilung und Resilienzoptimierung sind für jede hier ausgewählte Maßnahme prinzipiell eigene Planfälle zu definieren, welche den Zustand des Systems nach Umsetzung der Maßnahme repräsentieren. Die Planfälle können dann mit dem Referenzfall verglichen werden. Der

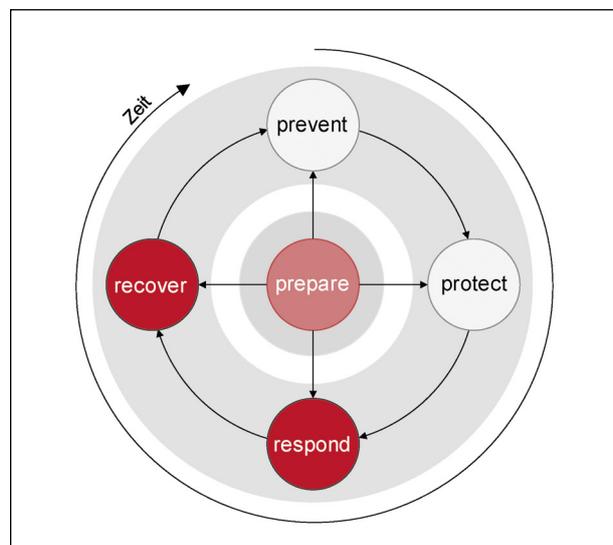


Bild 9: Resilienzzyklus mit Beschränkung auf die Phasen *respond* und *recover*

Referenzfall beschreibt das betrachtete System im Ist-Zustand ohne Maßnahme. Des Weiteren sind die zeitlichen, räumlichen und inhaltlichen Systemabgrenzungen zu berücksichtigen. Die Annahmen zu Referenz- und Planfall sowie zur Systemabgrenzung sind vollständig zu dokumentieren, da sie das spätere Bewertungsergebnis wesentlich beeinflussen und die Kenntnisse der Annahmen zum Verständnis der Resultate notwendig sind.

## 4.3 Maßnahmenbeurteilung

### 4.3.1 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 Einflusses auf den Verlauf der Resilienzkurve ermitteln. Maßnahmen der Phasen respond und recover verändern 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 (Pfeile in Bild 10).

Die Maßnahmenbeurteilung beinhaltet die folgenden Teilziele:

- 1) Festlegung der Systemfunktionalitäten und
- 2) Ermittlung der Resilienzwirkung der Maßnahmen.

### 4.3.2 Festlegung der Systemfunktionalität(en)

Die Systemresilienz kann anhand einer oder mehrerer Systemfunktionalitäten definiert werden, die jeweils anhand einer Funktionalitätsfunktion (= Resilienzkurve) über die Zeit dargestellt werden. Der Resilienzverlust eines Systems ist somit messbar. 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 (Bild 10), auf seine Funktionalität hin überprüft werden kann. Die Ausgestaltung eines Ziel- und Indikatorensystems ist abhängig von der vorangegangenen Definition der übergeordneten Anforderungen und der Systemgrenzen für das Resilienzmanagement. Im Rahmen von Resilienz-betrachtungen sowie von Verkehrsinfrastrukturspezifischen Nutzen-Kosten-Analysen wurden bereits umfassende Ziel- und Indikatorensysteme entwickelt. Aus diesem Grund und auch mit der Absicht, eine Verbindung zu den in der Praxis etablierten Bewertungsverfahren und Ziel- und Indikatorensystemen herzustellen, stützt sich die Festlegung der Systemfunktionalitäten im vorliegenden Forschungsbericht auf das Indikatorensystem des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur herausgegebenen Bundesverkehrswegeplans 2030 [7], das mit der Funktionalität gesamtwirtschaftliche Auswirkungen ergänzt wurde (siehe Tabelle 5). Die Gewichtung der einzelnen Funktionalitäten (Spalte 3 in Tabelle 5) sowie der Dimensionen (Spalte 1 in Tabelle 5 in Klammern) erfolgt auf Grundlage von Erfahrungswerten der Forschungsnehmer aus zahlrei-

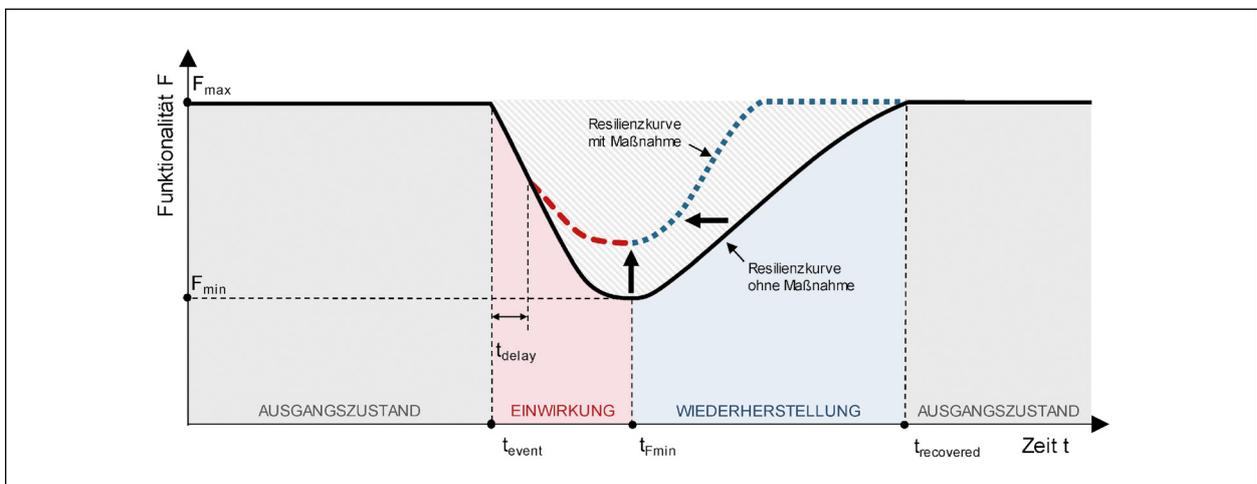


Bild 10: Wirkung der Maßnahmen in den Phasen respond und recover auf die Funktionalität des Systems dargestellt durch die dicken schwarzen Pfeile

Zielgröße	Funktionalität (Teilzielgröße)	Indikator	Beschreibung	Gewichtung
WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE (70 %)	Reise- und Transportzeiten	Fahrzeugstunden	Abhängig von Länge und signalisierter Geschwindigkeit der Routen im Netz	35 %
	Kapazität im Netz	Kapazität	Abhängig vom baulichen Ausbaustandard und Anzahl der Routen im Netz	10 %
	Betriebskosten	Beförderungs- und Transportkosten im Personen- und Güterverkehr	Abhängig von Länge der Routen im Netz und den Reisezeiten	15 %
	Innerörtliche Trennwirkung	Wartezeit Fußgänger zur Querung von Straßen	Abhängig von Routenverlauf durch Ortschaften im Netz (Wird Ortschaft durchschnitten und wenn ja wo und wie?)	5 %
	Wertschöpfungseffekte	Wertschöpfung/Beschäftigung	Abhängig von potenziellen Produktionsausfällen und Arbeitsplatzeffekten	35 %
VERKEHRS-SICHERHEIT (20 %)	Unfallkosten	Veränderung der Unfallkosten (Personen- und Sachschäden)	Abhängig von Exposition (Anzahl Fahrzeuge auf Ausweichroute und Länge)	100 %
UMWELT (10 %)	Luftschadstoffemissionen und Treibhausgasemissionen	Fahrleistung	Abhängig von Weglänge und Geschwindigkeit	40 %
	Lärmbelastung	Fahrleistung innerorts	Abhängig von Anzahl Fahrzeuge und Geschwindigkeit	30 %
	Beeinträchtigung durch das Bauwerk	Einschätzung z. B. aufgrund von Einträgen ins Gewässer, umweltfreundlich Baustoffe (Brand), Lage des Objekts (Beeinträchtigung von Wasserschutzzonen, Naturschutzgebieten)	Abhängig von Maßnahme – Einfluss netzweit, ereignisunabhängig	20 %
	Landschafts- und Ortsbild	Einschätzung zum Eingriff einer Maßnahme in das Landschafts- und Ortsbild (z. B. Tunnelportale)	Abhängig von Maßnahme – Einfluss netzweit, ereignisunabhängig	10 %

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

chen Bewertungen von Verkehrsinfrastrukturprojekten. Der Anwender kann die Gewichtungen nach seinen Bedürfnissen anpassen.

### 4.3.3 Erfassung der Resilienz Wirkung

#### Funktionalitätskurve

Die Erfassung der Resilienz Wirkung einer Maßnahme basiert auf der Ermittlung der Veränderung der Flächengröße oberhalb der Funktionalitätskurve (gestrichelte Fläche in Bild 10). Der Resilienzverlust eines Systems entspricht dabei dem Integral über der Fläche zwischen Soll-Funktionalität (100%-Funktionalität, horizontale Linie) und tatsächlich vorliegender Ist-Funktionalität (verminderte-Funktionalität durch eine Einwirkung) eines Systems. Die Ermittlung des Verlaufs der Funktionalität unter Ein-

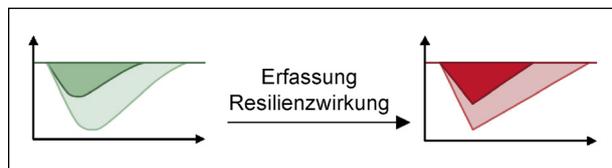


Bild 11: Vereinfachte Darstellung der Resilienz Kurve durch eine Dreiecksfunktion. Die helle Kurve repräsentiert den Verlauf der Funktionalität im Referenzfall ohne Maßnahme, die dunkle Kurve den Verlauf im Planfall mit Maßnahme

wirkung eines disruptiven Ereignisses kann je nach Aufwand, Wissenstand und verfügbarer Mittel von sehr komplex bis stark vereinfacht erfolgen. Von der Wahl des Komplexitätsgrades hängt auch ab, ob die Festlegung und Darstellung der Funktionalitäten anhand einer kontinuierlichen oder diskreten Resilienz Kurve erfolgt. In Bild 11 ist in Grün eine kontinuierliche und in Rot eine vereinfachte, diskrete Funk-

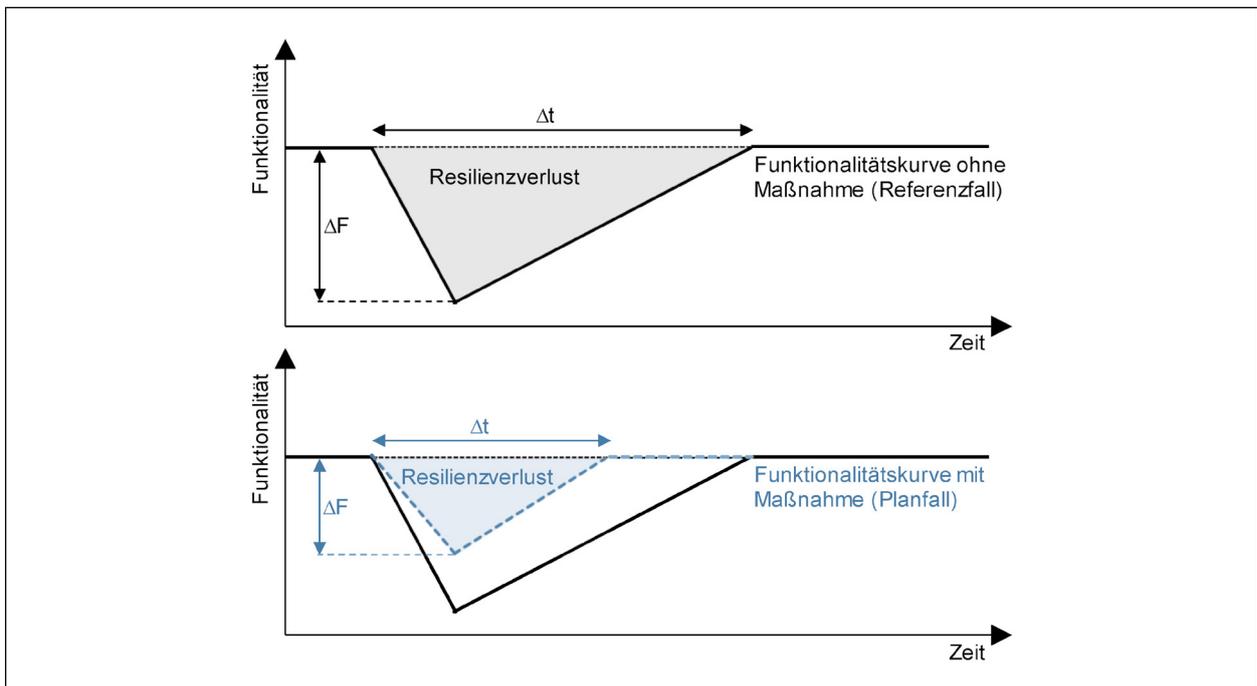


Bild 12: Vorgehen zur Ermittlung der Kennwerte der Resilienzwirkung von Maßnahmen

tionalitätskurve bzw. ein Funktionalitätsdreieck dargestellt. Eine mögliche Veränderung der Fläche des Resilienzverlusts aufgrund von Maßnahmen ist durch den veränderten Verlauf zwischen heller und dunkler Einfärbung der Flächen zu erkennen.

Ein komplexer Ansatz zur Ermittlung der Funktionalitätskurve erfordert umfangreiche Datenerhebungen von beobachtbaren und messbaren Größen der Funktionalität. Aus diesen Daten lässt sich dann eine mathematische Funktionsgleichung ableiten und die Resilienzfläche mittels Integralrechnung ermitteln. Eine wichtige Schnittstelle für das vorliegende Forschungsprojekt und gutes Beispiel für einen komplexen Ansatz zur Ermittlung der Resilienzfläche stellen die Zwischenergebnisse des bereits laufenden Forschungsprojekts FE-Nr. 15.0627/2016/ARB «Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen» [21] dar.

Entsprechende Quantifizierungen stoßen aber auf zeitliche und finanzielle Engpässe. Deshalb sehen die Rahmenbedingungen des vorliegenden Forschungsprojekts vor, dass die entwickelte Methodik möglichst anwenderfreundlich ist und auf Basis qualitativer Einschätzungen umgesetzt werden kann. Deshalb wird eine Vereinfachung des kontinuierlichen Funktionsverlaufs der Funktionalität anhand einer Dreiecksfunktion verwendet.

### Funktionalitätsverlust und Einwirkungsdauer

Die Funktionalität des gesamten Systems wird durch die Gesamtmenge, der in Kapitel 4.3.2 identifizierten Funktionalitäten beschrieben. Um die Resilienzwirkung einer Maßnahme auf die Funktionalität des gesamten Systems beurteilen zu können, muss somit für jede Funktionalität die folgende Frage beantwortet werden: Wie stark beeinflusst jede einzelne Resilienzmaßnahme die Dreiecksfläche, indem durch die Maßnahme vertikal der absolute Abfall der Funktionalität ( $\Delta F$ ) und/oder horizontal die Einwirkungsdauer ( $\Delta t$ ) reduziert werden (siehe Bild 12)?

### Von den kritischen Objekten zum Gesamtsystem

Aufgrund der Komplexität des betrachteten Systems ist unter Umständen eine direkte Abschätzung der Einwirkungen einer Maßnahme bei Ausfall eines beliebigen kritischen Objekts auf die Funktionalität des Gesamtsystems nicht möglich. Beispielsweise kann sich die Abschätzung der Einwirkung einer zusätzlichen Straße (= Maßnahme) auf die Reisezeit (= Funktionalität) im Gesamtsystem (Straßennetz) bei Ausfall eines beliebigen kritischen Objekts im System ohne Anwendung von Verkehrsmodellen als schwierig erweisen.

Stattdessen soll für jede Maßnahme deren Einwirkung auf die Funktionalitäten für jedes einzelne kri-

tische Objekt im Gesamtsystems separat beurteilt werden. Das heißt im Falle des dargelegten Beispiels der zusätzlichen Straße wird für jedes kritische Objekt im Straßennetz separat beurteilt, ob und falls ja wie stark sich die Maßnahme auf die Reisezeit (= Funktionalität) auswirkt, falls es zu einem Ausfall des entsprechenden kritischen Objekts kommt. Die Bewertungen für die einzelnen Objekte werden dann addiert und somit die Resilienz Wirkung des Gesamtsystems ermittelt. Durch Bildung der Summe wird berücksichtigt, dass eine Maßnahme, welche eine positive Einwirkung auf mehrere kritische Objekte hat, potenziell eine höhere Resilienz Wirkung besitzt. Dies wiederum führt zu einem verbesserten Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis.

Eine Ausnahme stellen die Funktionalitäten Umweltwirkung und Landschaftsbild dar. Hinsichtlich dieser beiden Funktionalitäten kann die Umsetzung einer Maßnahme selbst wiederum ein disruptives Ereignis darstellen und diese Funktionalitäten dauerhaft negativ beeinflussen. Der Neubau einer Straße beispielsweise verändert das Landschaftsbild dauerhaft und unabhängig von der Anzahl kritischer Objekte, welche von der Maßnahme beeinflusst werden. Für diese beiden Funktionalitäten muss

deshalb keine objektspezifische Beurteilung vorgenommen werden. Es wird direkt die Resilienz Wirkung in Bezug auf das Gesamtsystem abgeschätzt.

**Bewertungsskala**

Die Veränderungen des Funktionalitätsverlusts und der Einwirkungsdauer durch spezifische Maßnahmen werden anhand einer Bewertungsskala quantifiziert. Die Bewertungsskala ist relativ<sup>4</sup>. Die Punktezuordnung ist abhängig davon, wie stark sich der Funktionalitätsverlust  $\Delta F$  und die Dauer bis zur Wiederherstellung  $\Delta t$  im Planfall (mit Maßnahme) relativ im Vergleich zum Referenzfall (ohne Maßnahme) verändern (Tabelle 6 sowie Bild 13 und Bild 14). Dies bedeutet auch, dass die Punktevergabe abhängig von den Systemgrenzen sowie den Eigenschaften des Systems sind. So ist beispielsweise nicht die absolute Reduktion der Unfallkosten, son-

<sup>4</sup> Soll berücksichtigt werden, dass der Ausfall bestimmter kritischer Objekte zu größeren negativen Auswirkungen führt (beispielsweise durch eine stärkere Nutzung) als anderer kritische Objekte, so können die kritischen Objekte entsprechend gewichtet werden.

	<b>Funktionalitätsverlust <math>\Delta F</math></b>	<b>Wiederherstellung <math>\Delta t</math></b>
3	Die Maßnahme führt zu einer Reduktion des Funktionalitätsverlusts (z. B. Verkürzung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 80 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verkürzung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 80 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.
2	Die Maßnahme führt zu einer Reduktion des Funktionalitätsverlusts (z. B. Verkürzung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 50 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verkürzung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 50 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.
1	Die Maßnahme führt zu einer Reduktion des Funktionalitätsverlusts (z. B. Verkürzung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 20 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verkürzung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 20 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.
0	Die Maßnahme hat keinen Einfluss auf den Funktionalitätsverlust.	Die Maßnahme hat keinen Einfluss auf die Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes.
-1	Die Maßnahme führt zu einer Zunahme des Funktionalitätsverlusts (z. B. Erhöhung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 20 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verlängerung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 20 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.
-2	Die Maßnahme führt zu einer Zunahme des Funktionalitätsverlusts (z. B. Erhöhung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 50 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verlängerung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 50 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.
-3	Die Maßnahme führt zu einer Zunahme des Funktionalitätsverlusts (z. B. Erhöhung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 80 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verlängerung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 80 % (inkl. dauerhafter Veränderungen), verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.

Tab. 6: Bewertungsskala zur Abschätzung des Einflusses einer Maßnahme auf die identifizierten Systemfunktionalitäten. Eine detaillierte Darstellung mit separater Bewertungsskala für jede Funktionalität kann Anhang A4 entnommen werden.

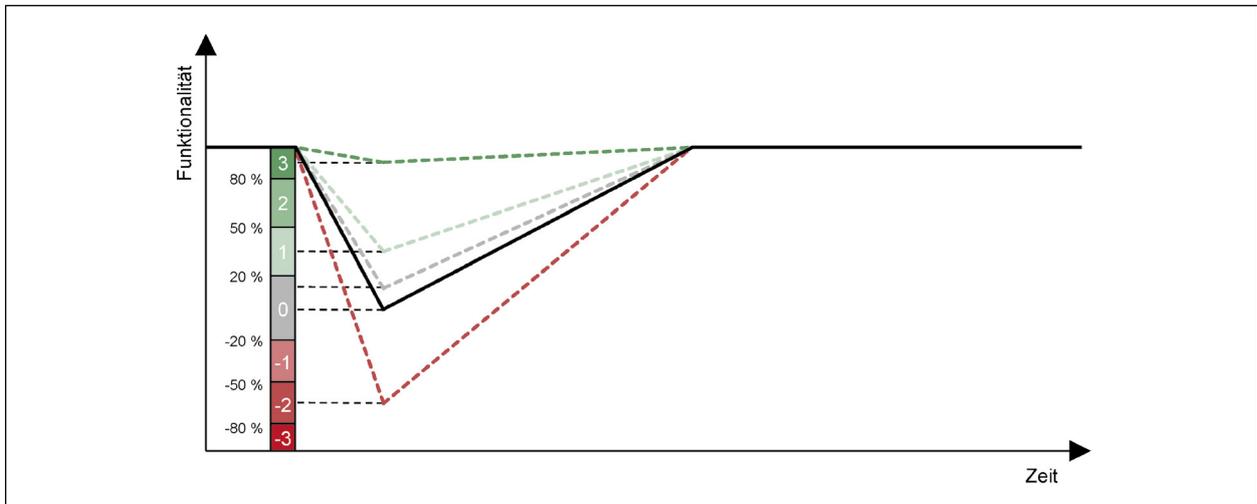


Bild 13: Bewertung des Einflusses von Maßnahmen (Rot: Maßnahme mit positivem Effekt; Grün: Maßnahme mit negativem Effekt) auf den maximalen Funktionalitätsverlust anhand einer Bewertungsskala, welche die Veränderung in Relation zum Funktionalitätsverlust ohne Maßnahme (schwarze Kurve) setzt<sup>6</sup>

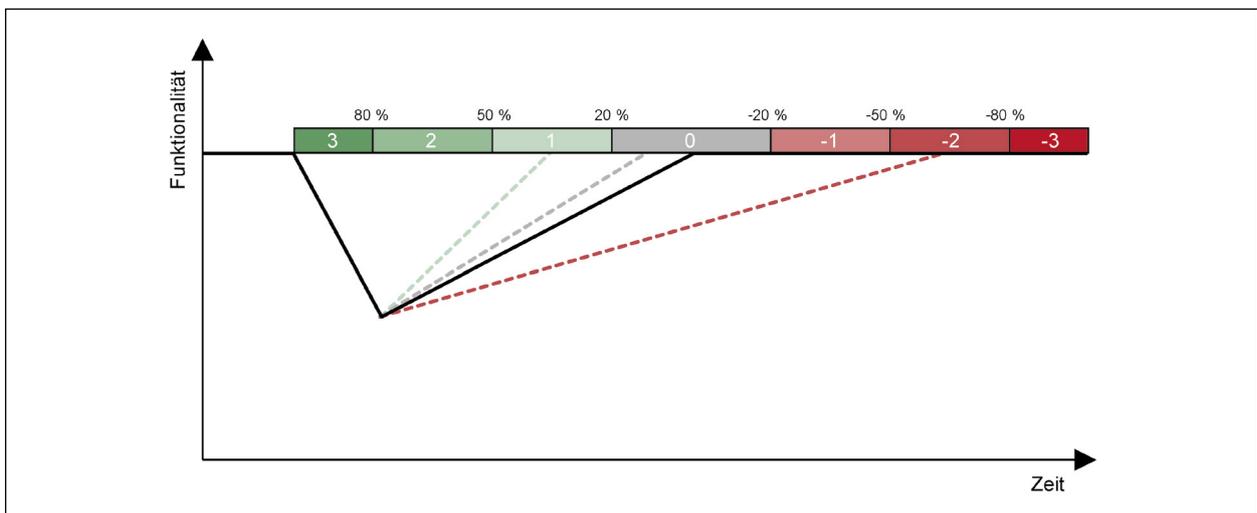


Bild 14: Bewertung des Einflusses von Maßnahmen (Rot: Maßnahme mit positivem Effekt, Grün: Maßnahme mit negativem Effekt) auf die Dauer bis zur Wiederherstellung, welche die Veränderung in Relation zur Dauer bis zur Wiederherstellung ohne Maßnahme (schwarze Kurve) setzt

dem die relative Reduktion verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme relevant für das Abschneiden einer Maßnahme.

Für die Punktezuordnung erfolgt durch Abschätzung der folgenden vier Kennwerte<sup>5</sup>. Die ersten beiden Kennwerte dienen Bild der Resilienzkurve im Referenzfall (ohne Maßnahme) des Systems. Diese sind:

- geschätzte Dauer der Einwirkung auf das System im Referenzfall,
- geschätzter maximal möglicher Funktionalitätsverlust im Referenzfall, der durch die gefährdungsspezifische Einwirkung ausgelöst wird.

<sup>5</sup> Es handelt sich um eine Abschätzung der mittleren Maßnahmenwirkungen über alle potenziellen Gefährdungen.

<sup>6</sup> Durch Adaptions- und Lerneffekte ist eine Verbesserung der Systemfunktionalität über den Ausgangszustand hinaus im Nachgang einer Einwirkung denkbar. Ein Adaptionseffekt zeigt sich aber auch bei gleicher, wiedererlangter Funktionalität von 100 %, indem bei einem wiederkehrenden Ereignis gleicher Intensität, die Einwirkung auf die Funktionalität geringer ausfällt, als beim vorhergehenden Ereignisfall (z. B. nach 5 Jahren führt ein erneutes Starkregenereignis gleicher Intensität zu weniger Überschwemmungsschäden). Eine solche Verbesserung über den Ausgangszustand hinaus wird in der hier vorgeschlagenen Bewertungsskala aus Gründen der (möglichst einfachen) Anwendbarkeit nicht berücksichtigt, könnte jedoch zukünftig noch in das Tool integriert werden.

Um die Wirkung der Maßnahme zu beurteilen, müssen zusätzlich die folgenden beiden Kennwerte abgeschätzt werden:

- erwartete Veränderung der Dauer der Einwirkung auf das System im Planfall (nach Umsetzung der Maßnahme) (in %),
- erwartete Reduktion des Funktionalitätsverlusts im Planfall (nach Umsetzung der Maßnahme) (in %).

Die Abschätzung der Kennwerte findet im einfachsten Fall durch eine Expertengruppe anhand eines Delphi-Verfahrens [11] [12] [28] statt. Die Genauigkeit der Abschätzungen kann durch die Anwendung von Modellen (z. B. Verkehrsmodelle zur Berechnung der Veränderungen in der Reisezeit) verbessert werden. Diese Verfahren sind jedoch mit einem deutlich höheren zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden.

Unter Kenntnis der prozentualen Veränderung des Funktionalitätsverlusts ( $\Delta F$ ) sowie der prozentualen Verkürzung der Einwirkungsdauer ( $\Delta t$ ) findet eine Punktezuordnung anhand einer vorgegebenen Bewertungsskala statt (Tabelle 6 und Anhang A2).

Die Bewertungsskala reicht von -3 bis +3, wobei negative Werte einen negativen Einfluss der Maßnahme auf den Indikator respektive seine Wiederherstellungszeit im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme darstellen. Hat eine Maßnahme keinen Einfluss erhält sie den Wert 0 auf der Bewertungsskala.

Diese Punktezuordnung lässt sich ebenfalls anhand der Bild 13 für die relative Veränderung des Funktionalitätsverlusts und Bild 14 für die relative Veränderung der Einwirkungsdauer für jede Maßnahme ermitteln und darstellen.

Obwohl sowohl die Bewertungsskala als auch die Definition der Funktionalitäten eine quantitative Beurteilung ermöglichen, ist in erster Linie eine qualitative Abschätzung der Auswirkungen z. B. mittels Delphi-Verfahren [11] [12] [28] vorgesehen. Dabei geht es nicht darum, das System zu quantifizieren, sondern für jede Maßnahme und jede Funktionalität den Einfluss der Maßnahme basierend auf Expertenmeinungen abzuschätzen.

In einer Bewertungsmatrix, exemplarisch in Bild 15 dargestellt, werden die Werte für  $\Delta F$  und  $\Delta t$  kombiniert.

	-3	-2	-1	0	1	2	3	Dauer
-3	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	→
-2	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	
-1	-4	-3	-2	-1	0	1	2	
0	-3	-2	-1	0	1	2	3	
1	-2	-1	0	1	2	3	4	
2	-1	0	1	2	3	4	5	
3	0	1	2	3	4	5	6	

Bild 15: Bewertungsmatrix, welche sich aus der Bewertung der Maßnahme hinsichtlich ihres Einflusses auf den Funktionalitätsverlust (Einwirkung) und die Wiederherstellungsdauer zusammensetzt. Pro Indikator ist eine solche Bewertungsmatrix auszufüllen

Um aus der Beurteilung der Resilienz Wirkung der einzelnen Maßnahmen auf die gesamte Systemfunktionalität schließen zu können, werden die einzelnen Funktionalitäten entsprechend ihrer individuellen Relevanz für die Resilienz des betrachteten Systems gewichtet und kombiniert. In Tabelle 5 ist bereits ein Vorschlag für eine Gewichtung der Funktionalitäten vorhanden. Die Methode sieht aber vor, dass der Anwender andere Gewichtungen vornehmen kann. Aus der gewichteten Summe ergibt sich die Resilienz Wirkung der Maßnahme auf das System.

Die Beurteilung erfolgt unabhängig von der ursächlichen Gefährdung. Relevant für die Beurteilung sind lediglich die Einwirkungsszenarien, d. h. die Einwirkung einer Maßnahme auf die Funktionalitäten (Wirtschaftliche Aspekte der Verkehrsteilnehmer, Verkehrssicherheit, Umwelt). Die Beurteilung der Maßnahmen erfolgt somit, wie auch schon die Kategorisierung der Maßnahmen in Kapitel 0, rein wirkungsorientiert (und nicht gefährdungsorientiert).<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Der bestehende Ansatz zur Beurteilung der Resilienz Wirkung basiert auf der Annahme eines Referenzszenarios. Die Wirkung einer Maßnahme hängt jedoch unter Umständen vom betrachteten Einwirkungsszenario ab. Um mehrere Einwirkungsszenarien zu berücksichtigen, kann die Resilienz Wirkung separat für mehrere Einwirkungsszenarien beurteilt und dann addiert werden.

## 4.4 Resilienzoptimierung

### 4.4.1 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 Hilfsmittel bei der Auswahl der effizientesten Resilienzmaßnahmen und bei der Umsetzung eines konsistenten Resilienzmanagements.

Die Teilziele dieses Prozessschritts sind

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

### 4.4.2 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.

Der Straßeninfrastrukturbetreiber muss 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 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).

### 4.4.3 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 zum Stand der Forschung für die Bewertung von Resilienzmaßnahmen (FE-Nr. 89.0320/2016 [13]) 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 Ver-

hältnis 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 Neubau einer Bundesstraße nicht im aktuellen BVWP 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:

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

b) 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 Experten. 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 den Straßeninfrastrukturbetreiber. Optional und als zukünftige Perspektive bei der verstärkten Verwendung von IT-gestützten Resilienzmanagement-Tools ließen sich durch die Implementierung von Optimierungsalgorithmen aber auch optimale Maßnahmenkombinationen rechnerisch und automatisiert ermitteln.

## Teil B – Handbuch und Anwendungsbeispiel

### 5 Handbuch zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses

#### 5.1 Ziel

Dieses Handbuch stellt dem Anwender ein Hilfsmittel zur Anwendung der Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses von Straßeninfrastrukturen nach disruptiven Ereignissen zur Verfügung. Ziel der Methodik ist die Identifikation und Priorisierung von Maßnahmen unter Berücksichtigung ihrer Resilienz Wirkung und ihrer Kostenwirksamkeit. Um die Anwendung der Methodik zu erleichtern wird ein Excel-Tool zur Verfügung gestellt und in den einzelnen Kapiteln des Handbuchs darauf verwiesen. Sämtliche methodische Grundlagen sind im Teil Methodik beschrieben (Kapitel 4).

Ziel ist es Entscheidungsträgern im Straßeninfrastrukturmanagement ein objektives Unterstützungsinstrument an die Hand zu geben, mit dessen Hilfe die Identifikation von geeigneten/effizienten/verhältnismässigen Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz eines Systems gefunden und vergleichend priorisiert werden können.

#### 5.2 Anwender

Potenzielle Anwender dieser Methodik sind Vertreter der landeseigenen Verkehrsbehörden (z. B. Verkehrsleitzentralen), die auf konzeptioneller, strategischer und operativer Managementebene über Entscheidungsfunktionen verfügen. Durch eine behördeninterne und behördenübergreifende Koordination stellen sie sicher, dass alle erforderlichen Experten beigezogen/gewonnen werden können und sämtliche für eine Durchführung der Methodik hilfreichen Informationen und Unterlagen zur Verfügung stehen.

#### 5.3 Definitionen

Im Folgenden werden die für die Benutzung des Handbuchs wichtigsten Begriffe definiert.

#### 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 [6]. 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.

#### Gefährdung

Bei einer Gefährdung handelt es sich um ein mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf das System einwirkendes, disruptives Ereignis, welches das Potenzial besitzt, die Funktionalität einer Infrastruktur zu beeinträchtigen.

#### Vulnerabilität

Vulnerabilität beschreibt 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).

#### Robustheit

Robustheit beschreibt die Fähigkeit eines Systems, Ausfälle von einzelnen Systemkomponenten ohne einen Verlust der Systemfunktionalität zu verkraften. 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.

#### Risiko

Unter Risiken sind auf das System einwirkenden Ereignisse zu verstehen, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eintreten und im Ereignisfall zu einer Störung des Systems und zu einem Versagen von Systemkomponenten oder des Gesamtsystems führen können (Konsequenzen, Schadensausmaß).

#### Resilienz

Resilienz ist die Fähigkeit eines Systems, sich auf tatsächlich oder potenziell disruptive Ereignisse vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie abzuweh-

ren, sie zu verkräften, sich möglichst schnell davon zu erholen und sich ihnen immer erfolgreicher anzupassen. Negative Einwirkungen entstehen durch menschlich, technisch sowie natürlich verursachte, schockartige Ereignisse (acute shocks) oder schleichende Veränderungsprozesse (chronic stresses) [13] [25] [26].

### Resilienzmaßnahmen

Unter Resilienzmaßnahmen werden jene baulichen, technischen, planerischen und organisatorischen Maßnahmen am Einzelobjekt (z. B. Brücke oder Tunnel) oder für das gesamte Infrastrukturnetz verstanden, die über die Vorgaben aus den geltenden Regelwerken (z. B. Normen, Design Codes) hinausgehen (z. B. Verwendung von Hochleistungsbeton bei Brücken, wenn gemäß Norm aufgrund der Planungssituation eigentlich nur konventionelle Betontypen vorgesehen sind) [13].

Der in dieser Forschungsarbeit verfolgte Ansatz ordnet die Resilienzmaßnahmen den fünf Phasen des Resilienzzyklus in Bild 3 zu. Welcher Phase eine Maßnahme zuzuordnen ist, hängt davon ab, zu welchem Zeitpunkt sie ihre Wirkung entfaltet und nicht, wann sie umgesetzt wird. Die meisten Resilienzmaßnahmen werden bereits präventiv vor einem potenziellen Ereignis umgesetzt, ihre Wirkung entfalten sie aber erst zu einem späteren Zeitpunkt während oder nach einem Ereignis.

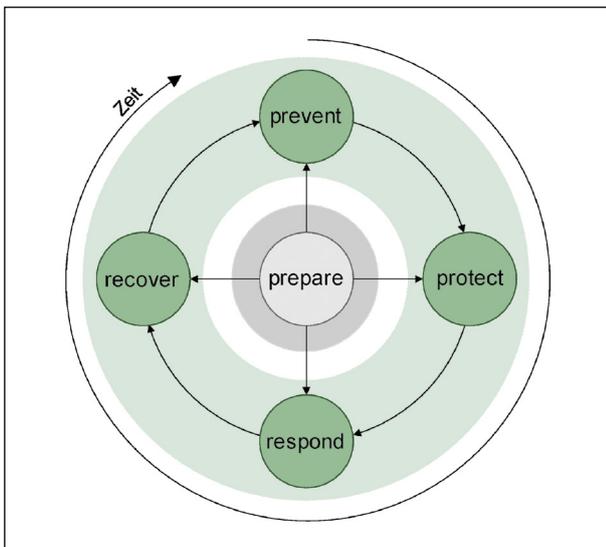


Bild 16: Resilienzzyklus als Weiterentwicklung von [35]

### 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.

### Disruptives Ereignis

Unter disruptiven Ereignissen werden schockartige Einwirkungen (acute shocks) oder schleichende Veränderungsprozesse (chronic stresses) verstanden, welche die Funktionalität eines Systems negativ beeinflussen.

## 5.4 Übersicht

Die Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses umfasst folgende Elemente des Resilienzmanagementprozesses: Resilienzscreening, Maßnahmenbeurteilung und Resilienzoptimierung. Für die vor- und nachgelagerten Prozesselemente werden im Rahmen dieses Handbuchs keine neuen methodischen Lösungsansätze beschrieben, weil diese unabhängig von einer Resilienzbeurteilung beispielsweise im Rahmen des klassischen Risikomanagements bereits vorliegen und verwendet werden können. Unter anderem haben sich europäische Forschungsprojekte intensiv mit Gefährdungs- und Vulnerabilitätsanalysen auseinandergesetzt, sodass an dieser Stelle auf die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeiten verwiesen wird. Da ein ganzheitliches Resilienzmanagement jedoch nur unter Abhandlung aller Prozesselemente möglich ist und die Methodik zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses nur auf Grundlage der Ergebnisse aus den vorgelagerten Prozesselementen (Ziele- und Systemabgrenzung, Netscreening und Gefährdungsanalyse) stattfinden kann, werden in Anhang A1 Hinweise zu diesen Prozesselementen gegeben.

Bild 17 zeigt eine Übersicht über den gesamten Resilienzmanagementprozess. Hervorgehoben sind die Prozesselemente, für welche in diesem Handbuch eine Methodik beschrieben ist.

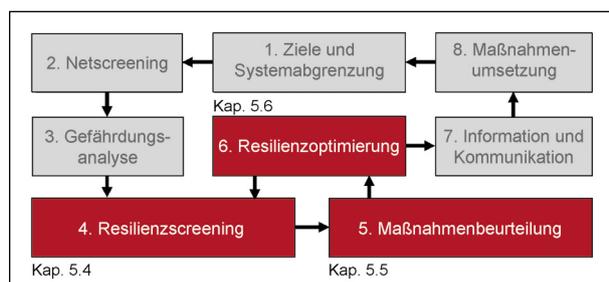


Bild 17: Übersicht der Struktur des Handbuchs

## 5.5 Resilienzscreening

### 5.5.1 Kurzbeschreibung und Ziele

Grundvoraussetzung für die Durchführung des Resilienzscreenings ist eine vorangegangene Bearbeitung der vorgelagerten Prozesselemente. Nur auf Grundlage eines sowohl inhaltlich als auch räumlich und zeitlich klar definierten Systems (Ziele und Systemabgrenzung), sowie der Kenntnis der kritischen Systemelemente (Netscreening) und relevanten Gefährdungen (Gefährdungsanalyse) kann die hier beschriebene Methodik umgesetzt werden.

Das Resilienzscreening setzt sich zusammen aus

- Festlegung des Kriterienkatalogs und Zuordnung der Kriterien zu drei Dimensionen,
- Erfassung der Systemresilienz anhand des Kriterienkatalogs,
- Identifikation des Handlungsbedarfs,
- Identifikation von Resilienzmaßnahmen.

Die Erfassung der Systemresilienz findet mittels einer Nutzwertanalyse statt. Sowohl für das gesamte, in der Systemabgrenzung definierte System als auch für einzelne Dimensionen des Systems (Teilsysteme) wird ein Resilienzscore berechnet. Die Zuordnung der Punktzahlen erfolgt anhand einer definierten, qualitativen Bewertungsskala. Je nach Zielerreichungsgrad wird dem Kriterium ein Wert zwischen 0 und 5 zugewiesen. Anhand des Resilienzscores des Systems können mehrere Systeme (z. B. städtisches Straßennetz der Stadt München und städtisches Straßennetz der Stadt Berlin) bezüglich ihrer Resilienz miteinander verglichen werden. Ein Vergleich der Resilienzscores der einzelnen Dimensionen oder Kriterien ermöglicht eine Be-

urteilung, 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 dem Entscheid des Straßeninfrastrukturbetreibers.

Nach dem Entscheid 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 Kostenwirkung priorisiert werden.

### 5.5.2 Festlegung des Kriterienkatalogs

#### Beschreibung und Ziel

- Unter Berücksichtigung der für dieses Forschungsprojekt geltenden Rahmenbedingungen wurde ein Kriterienkatalog definiert. Der Kriterienkatalog enthält für jedes Kriterium eine definierte Bewertungsskala, anhand derer die Zielerreichung qualitativ beurteilt werden kann. Die Kriterien sind drei Dimensionen zugeordnet: organisatorisch, wirtschaftlich und physisch/technisch. In Tabelle 7 sind die Kriterien sowie deren Zuordnung zu den drei Dimensionen dargestellt. Der vollständige Kriterienkatalog inklusive der dazugehörigen Bewertungsskalen kann Anhang A2 entnommen werden.

#### Vorgehen

- Der Kriterienkatalog muss auf seine Kompatibilität mit dem definierten Systemgrenzen überprüft werden. Gegebenenfalls müssen Kriterien ergänzt, gestrichen oder angepasst werden.

#### Resultat

- Auf das definierte System zugeschnittener Kriterienkatalog.

Dimension	Kriterien
ORGANISATORISCH	1 Sind die Verantwortlichkeiten definiert und den Verantwortlichen Rollen und Funktionen zugewiesen (auch außerhalb des Ereignisfalls)?
	2 Existieren Notfallpläne für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis (respond), welche die Bewältigung dieses Ereignisses hinreichend ermöglichen?
	3 Existieren Wiederherstellungspläne, welche die Bewältigung von disruptiven Ereignissen hinreichend ermöglichen/die Wiederherstellung (recover) beschleunigen?
	4 Ist eine Interoperabilität (d.h. z. B. Harmonisierung Kommunikation, Harmonisierung Notfallpläne, Harmonisierung IT-Systeme, Harmonisierung technische Ausrüstung, funktionierende Zusammenarbeit zwischen den Akteuren) zwischen den Stakeholdern gewährleistet?
	5 In welchem Umfang können Humanressourcen für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis (respond) aktiviert werden?
	6 In welchem Umfang können Humanressourcen für die Phase der Wiederherstellung (recover) aktiviert werden?
	7 Verfügen die Humanressourcen über eine ausreichende Ausbildung/ausreichende Fähigkeiten, um die ihnen zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen?
WIRTSCHAFTLICH	8 In welchem Umfang können innerhalb einer nützlichen Frist finanzielle Mittel für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis (respond) aktiviert werden?
	9 In welchem Umfang können innerhalb einer nützlichen Frist finanzielle Mittel für die Phase der Wiederherstellung (recover) aktiviert werden?
PHYSISCH/TECHNISCH	10 In welchem Umfang können materielle Ressourcen/technische Ausrüstung für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis (respond) aktiviert werden?
	11 In welchem Umfang können materielle Ressourcen/technische Ausrüstung für die Phase der Wiederherstellung (recover) aktiviert werden?
	12 Wie groß ist die Reichweite von Kommunikationssystemen zur Information/Warnung der Betroffenen bei einem disruptiven Ereignis?
	13 Existiert ein Krisen-/Notfallzentrum mit ausreichender Ausstattung?
	14 Existieren technische Einrichtungen am Objekt, welche die Funktionalität im Bedarfsfall erhöhen? (z. B. Sprinkleranlagen, Rauchgasabsaugungsanlagen, verkürzte Notausgangsabstände in Tunnel)
	15 Wie viele kritische Objekte verfügen über alternative Routen, mit einer maximalen Reisezeiterhöhung von 30 Minuten?
	16 Verfügen die alternativen Routen über freie Kapazitäten?
	17 Wie viele kritische Objekte verfügen über alternative Verkehrsträger, welche bei einem disruptiven Ereignis als Alternative darstellen können?

Tab. 7: Kriterienkatalog mit Zuordnung der Kriterien zu den Dimensionen organisatorisch, wirtschaftlich und physisch/technisch

### 5.5.3 Erfassung der Systemresilienz

#### Beschreibung und Ziel

- Für die Erfassung der Systemresilienz werden den Kriterien anhand der im Kriterienkatalog definierten Bewertungsskalen Punkte (Resilienzscores) zugeordnet. Die Punkteverteilung wird von Experten vorgenommen. Bei der Entscheidungsfindung kann auf etablierte Verfahren, wie beispielsweise das Delphi-Verfahren [11] [12] [28] zurückgegriffen werden. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, Resilienzscores für die einzelnen Kriterien, sowie für die jeweiligen Dimensionen zu bestimmen, aus denen im nächsten Schritt der Handlungsbedarf abgeleitet werden kann.

#### Vorgehen

- Für jedes Kriterium wird anhand der Bewertungsskala eine Punktzahl zwischen 0 und 5 festgelegt, wobei 5 dem höchsten Zielerreichungsgrad entspricht (Bild 18). Die Punktzahl entspricht dem Resilienzscore des jeweiligen Kriteriums.

#### Resultat

- Resilienzscores für die einzelnen Kriterien (Bild 19),
- Resilienzscores für die Dimensionen (Bild 20),
- Resilienzscore für das System (Bild 20).

Kriterienkatalog			Eingabe erforderlich
Dimension	Kriterium	Bewertungsskala	Resilienzscore
ORGANISATORISCH	2 Notfallpläne Existieren Notfallpläne für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis ( <i>respond</i> ), welche die Bewältigung dieses Ereignisses hinreichend ermöglichen?	5 - Für alle kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist 4 - Für die Mehrheit (mindestens 75%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist 3 - Für mehr als die Hälfte (mindestens 50%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist 2 - Für einen Teil (mindestens 25%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist 1 - Nur für einen sehr kleinen Teil (weniger 25%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist 0 - Keine Notfallpläne vorhanden, Notfallpläne sind nicht hinreichend, Wirksamkeit nicht nachgewiesen	2

Bild 18: Beispiel für die Festlegung einer Punktzahl (Resilienzscore des Kriteriums) für ein ausgewähltes Kriterium anhand der Bewertungsskala (Auszug aus dem Excel-Tool)

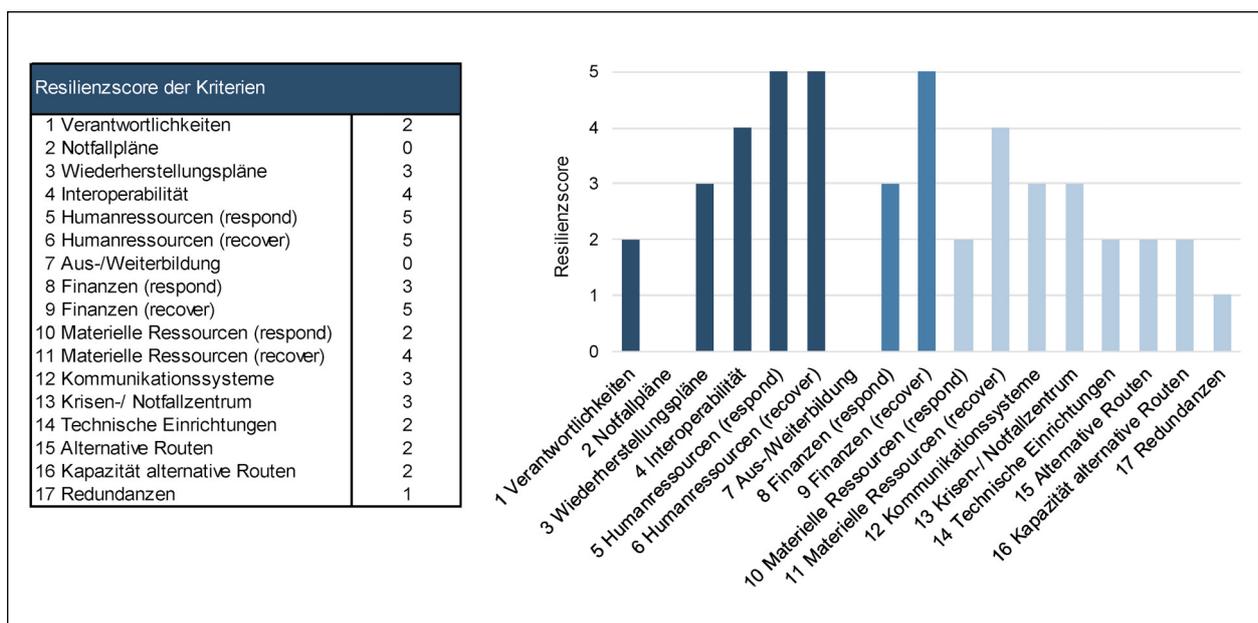


Bild 19: Beispiel einer Zusammenfassung der Resultate. Der Resilienzscore der einzelnen Kriterien entspricht dem Wert, welcher dem Kriterium anhand der Bewertungsskala zugeordnet wurde (Bild 18) (Auszug aus dem Excel-Tool)

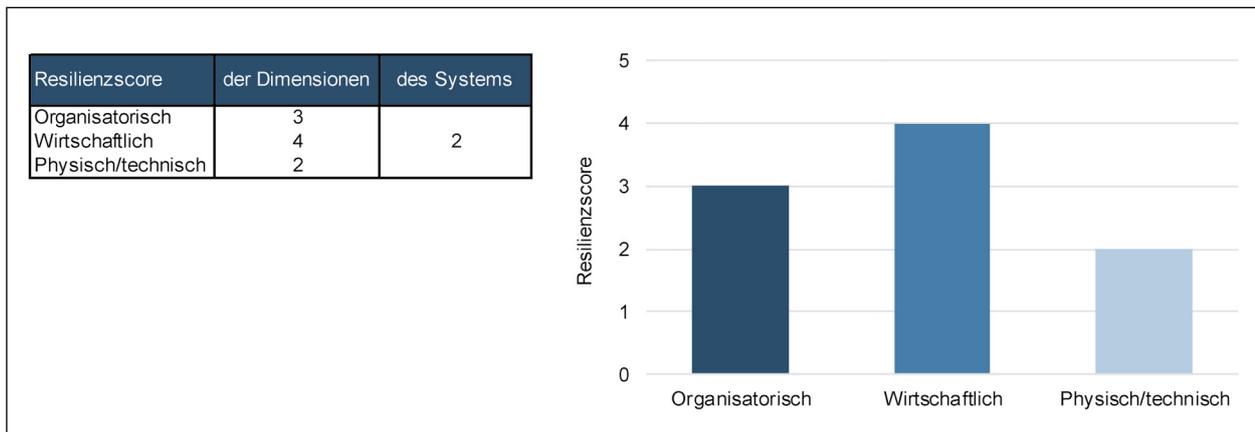


Bild 20: Beispiel einer Zusammenfassung der Resultate. Der Resilienzscore der einzelnen Dimensionen entspricht dem Mittelwert der zugehörigen Kriterien. Der Resilienzscore des Systems entspricht dem Mittelwert aller Kriterien (Bild 18) (Auszug aus dem Excel-Tool)

#### 5.5.4 Identifikation des Handlungsbedarfs

##### Beschreibung und Ziel

- Ziel dieses Schrittes ist die Identifikation des Handlungsbedarfs, das heißt von Kriterien oder Dimensionen, für welche Maßnahmen ergriffen werden sollten. Der Handlungsbedarf wird auf Grundlage der Resilienzscores ermittelt. Wie auch bei der Erfassung der Systemresilienz werden alle Entscheide dieses Arbeitsschrittes von Experten getroffen, wobei auch hier auf etablierte Entscheidungsfindungsverfahren wie das Delphi-Verfahren zurückgegriffen werden kann.

##### Vorgehen

- 1) Gewichtung der einzelnen Kriterien und Dimensionen (Bild 21). Pro Dimension muss die Summe der Gewichtung aller Kriterien 100 % betragen. Sollen alle Kriterien innerhalb einer Dimension gleichgewichtet werden, kann der Button Gleichgewichtung Kriterien gewählt werden.
- 2) Gewichtung einzelnen Dimensionen (Bild 22). Die Summe der Gewichtung aller Dimensionen muss 100 % betragen. Sollen alle Dimensionen gleichgewichtet werden, kann der Button Gleichgewichtung Dimensionen gewählt werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl Kriterien innerhalb der Dimensionen kann keine gleichzeitige Gleichgewichtung von Kriterien und Dimensionen erreicht werden:

- Gleichgewichtung der Kriterien: Alle Kriterien haben das gleiche Gewicht und werden als gleichwertig erachtet. Dimensionen, welche eine geringere Anzahl an Kriterien umfassen, erhalten dadurch ein geringeres Gewicht.
  - Gleichgewichtung der Dimensionen: Alle Dimensionen haben das gleiche Gewicht und werden als gleichwertig erachtet. Kriterien einer Dimension, welche eine geringere Anzahl an Kriterien umfasst, erhalten dadurch ein höheres Gewicht.
  - Individuelle Gewichtung: Die Kriterien innerhalb einer Dimension sowie die Dimensionen selbst können individuell gewichtet werden, um einzelnen Dimensionen oder Kriterien einen höheren/geringeren Stellenwert zuzuweisen.
- 3) Entscheid, auf welcher Grundlage potenzielle Maßnahmen identifiziert werden sollen (Bild 23). Der Handlungsbedarf kann auf Grundlage der einzelnen Kriterien (1) oder der Dimensionen (2) festgelegt werden.
  - 4) Festlegung eines maximalen Handlungsbedarfs-Indizes (Bild 23). Dieser maximale Handlungsbedarfs-Index stellt das obere Akzeptanz-Level dar. Bei Kriterien respektive Dimensionen, deren Handlungsbedarfs-Index oberhalb des maximal akzeptierten Wertes liegen, besteht Handlungsbedarf; Maßnahmen müssen ergriffen werden.

Kriterienkatalog			Eingabe erforderlich
Dimension	Kriterium	Bewertungsskala	Gewichtung Kriterium innerhalb der Dimension
ORGANISATORISCH	2 Notfallpläne Existieren Notfallpläne für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis ( <i>respond</i> ), welche die Bewältigung dieses Ereignisses hinreichend ermöglichen?	5 - Für alle kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist 4 - Für die Mehrheit (mindestens 75%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist 3 - Für mehr als die Hälfte (mindestens 50%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist 2 - Für einen Teil (mindestens 25%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist 1 - Nur für einen sehr kleinen Teil (weniger 25%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist 0 - Keine Notfallpläne vorhanden, Notfallpläne sind nicht hinreichend, Wirksamkeit nicht nachgewiesen	14%

Bild 21: Beispiel für die Festlegung der Gewichtungen der einzelnen Kriterien (Auszug aus dem Excel-Tool)

Eingabe erforderlich	
Gewichtung Dimensionen	
Organisatorisch	40 %
Wirtschaftlich	20 %
Physisch/technisch	40 %

Bild 22: Beispiel für die Festlegung der Gewichtungen der einzelnen Dimensionen (Auszug aus dem Excel-Tool)

**Resultat**

- Falls die Handlungsfelder gemäß (1) bestimmt wurden, resultiert eine Auswahl an Kriterien, für die Maßnahmen ergriffen werden sollten.
- Falls die Handlungsfelder gemäß (2) bestimmt wurden, resultieren die Dimensionen, für die Maßnahmen ergriffen werden sollten.

Festlegen des Handlungsbedarfs:	
	Eingabe erforderlich
Auf welcher Grundlage soll der Handlungsbedarf festgelegt werden?	Handlungsbedarfs-Index der Kriterien
Maximal zulässiger Handlungsbedarfs-Index:	50

Bild 23: Exemplarischer Entscheid für eine der beschriebenen Möglichkeiten zur Bestimmung des Handlungsbedarfs. Der minimal zulässige Resilienzscore muss von den Entscheidungsträgern definiert werden (Auszug aus dem Excel-Tool)

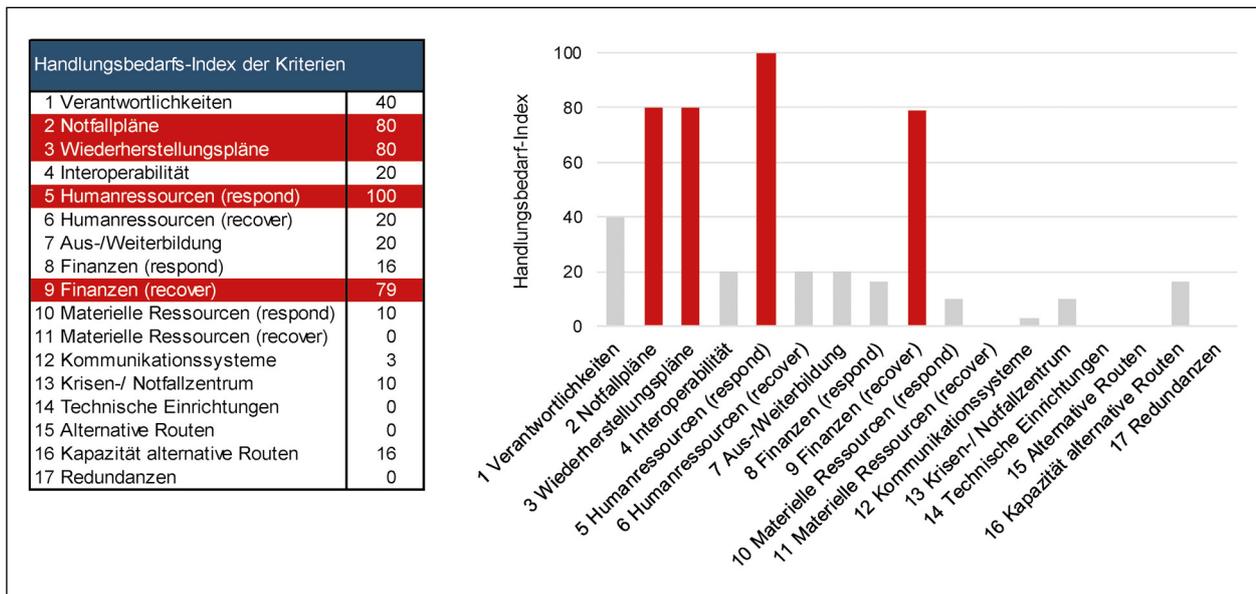


Bild 24: Bestimmung der Handlungsfelder, basierend auf dem Handlungsbedarfs-Index der Kriterien. Für die rot markierten Kriterien besteht Handlungsbedarf, da der Handlungsbedarfs-Index oberhalb des (exemplarisch definierten) maximalen Handlungsbedarfs-Index von 50 liegt (Auszug aus dem Excel-Tool)

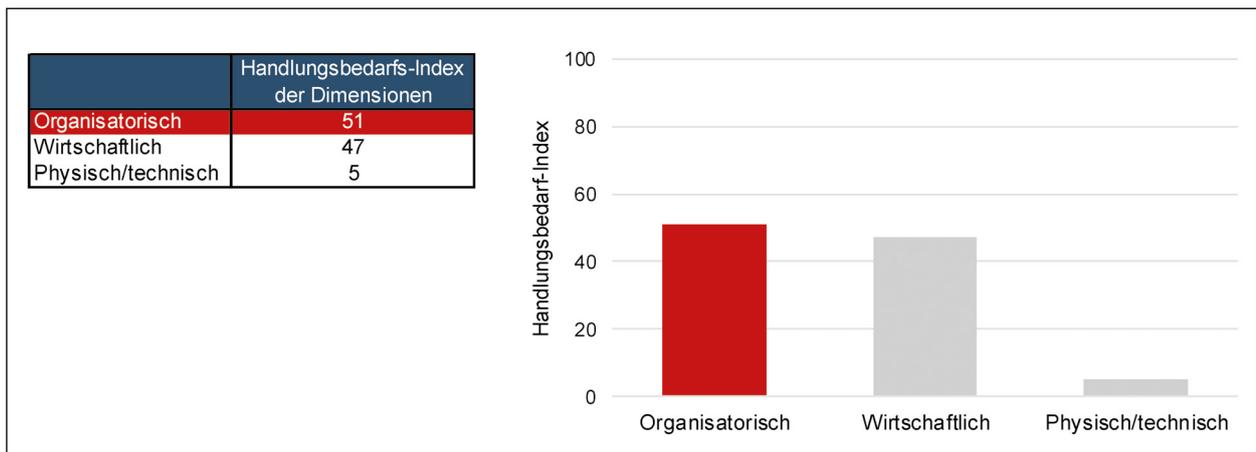


Bild 25: Bestimmung der Handlungsfelder, basierend auf dem Handlungsbedarfs-Index der Dimensionen. Für die Dimension organisatorisch besteht Handlungsbedarf (rot markiert), da der Handlungsbedarfs-Index oberhalb des (exemplarisch definierten) maximalen Handlungsbedarfs-Index von 50 liegt (Auszug aus dem Excel-Tool)

### 5.5.5 Identifikation von Resilienzmaßnahmen

#### Beschreibung und Ziel

- Im Rahmen der zugrundeliegenden Forschungsarbeit wurde eine Kreuztabelle entwickelt, welche den einzelnen Kriterien und damit den Dimensionen Maßnahmenfelder zuordnet. Das Ziel besteht darin, mittels der identifizierten Handlungsfelder unter Zuhilfenahme der Kreuztabelle die relevanten Maßnahmenfelder zu bestimmen und daraus konkrete Maßnahmen abzuleiten. Die Maßnahmenfelder werden zusätzlich hinsichtlich ihres Wirkungspotenzials klassi-

fiert. Das Wirkungspotenzial berechnet sich aus der Anzahl Kriterien, auf welche ein Maßnahmenfeld wirkt, sowie aus dem Handlungsbedarfs-Index dieser Kriterien. Je mehr Kriterien ein Maßnahmenfeld beeinflusst und je höher der Handlungsbedarfs-Index ist (größerer Handlungsspielraum), desto höher das Wirkungspotenzial. Die Maßnahmenfelder werden hierfür zehn Klassen zugeordnet, wobei die Klasse 10 dem höchsten Wirkungspotenzial entspricht.

Ein Ausschnitt der Kreuztabelle ist in Bild 26 dargestellt. Die vollständige Tabelle kann Anhang A3 entnommen werden. Es ist zu berücksichti-

				Maßnahmenfelder und zugehörige Phasen (Nicht abschliessend! Konkretisierung notwendig!)		
Dimension	1. Handlungsbedarfs-Index Dimensionen	Kriterien	2. Handlungsbedarfs-Index Kriterium	Nr. 18	Nr. 19	Nr. 20
				Kein Wirkungspotential	Kein Wirkungspotential	Kein Wirkungspotential
				Ausreichende Verfügbarkeit des Personals beim Betreiber der kritischen Infrastruktur sicherstellen/alle Einsatzpositionen gemäss Notfallplan vollständig besetzen	Definition/Abstimmung der benötigten Einsatzkräfte/Humanressourcen auf die einzelnen Einwirkungsszenarien	Abstimmung der Einsatzpositionen/Aktionen auf die einzelnen Einwirkungsszenarien
ORGANISATORISCH	51	1 Notfallpläne	40			
		2 Wiederherstellungspläne	80			
		3 Interoperabilität	80			
		4 Humanressourcen (respond)	20	x	x	
		5 Humanressourcen (recover)	100	x	x	
		6 Aus-/Weiterbildung	20			
		7 Verantwortlichkeiten	20		x	x
WIRTSCHAFTLICH	47	8 Finanzen (respond)	16			
		9 Finanzen (recover)	79			
PHYSISCH/TECHNISCH	5	10 Materielle Ressourcen (respond)	10			
		11 Materielle Ressourcen (recover)	0			
		12 Kommunikationssysteme	3			
		13 Krisen-/ Notfallzentrum	10			
		14 Technische Einrichtungen	0			
		15 Alternative Routen	0			
		16 Kapazität alternative Routen	16			
17 Redundanzen	0					

Bild 26: Ausschnitt aus der Kreuztabelle, welche jedem Kriterium, und somit auch jeder Dimension Maßnahmenfelder zuordnet

gen, dass die Liste der Maßnahmenfelder nicht abschließend ist und lediglich als Richtungsangabe für infrage kommende Maßnahmen zu verstehen ist.

### Vorgehen

- 1) Identifikation von Maßnahmenfeldern unter Zuhilfenahme der Kreuztabelle (Bild 27).
- 2) Ableitung von konkreten Maßnahmen basierend auf den identifizierten Maßnahmenfeldern. Es gilt zu beachten, dass die Liste der Maßnahmenfelder nicht abschließend ist und lediglich eine übergeordnete Richtung vorweist.

Um die Beurteilungs- und Bewertungsmethodik in den nachfolgenden Prozessschritten anzuwenden, ist das System, in welchem die Wirkungen ermittelt und die Bewertung durchgeführt werden, eindeutig festzulegen und zu dokumen-

tieren. Für die Abschätzung der Resilienzwirkung müssen die einzelnen Maßnahmen möglichst detailliert beschrieben und dokumentiert werden – im Sinne von «Es werden X Notrufsäulen auf dem Streckenabschnitt von Y nach Z in einem Abstand von X Metern installiert».

### Resultat

- Liste mit potenziellen, bezüglich ihrem Wirkungspotenzial bewerteten Maßnahmenfeldern. Diese geben Hinweise auf potenzielle Maßnahmen.
- Liste mit konkreten Maßnahmen, welche im nächsten Schritt auf ihre Resilienzwirkung hin untersucht werden.

				Maßnahmenfelder und zugehörige Phasen (Nicht abschliessend! Konkretisierung notwendig!)		
Dimension	1. Handlungsbedarfs-Index Dimensionen	Kriterien	2. Handlungsbedarfs-Index Kriterium	Nr. 18	Nr. 19	Nr. 20
				Wirkungspotential 6	Wirkungspotential 6	Kein Wirkungspotential
		Ausreichende Verfügbarkeit des Personals beim Betreiber der kritischen Infrastruktur sicherstellen/alle Einsatzpositionen gemäss Notfallplan vollständig besetzen			Definition/Abstimmung der benötigten Einsatzkräfte/Humanressourcen auf die einzelnen Einwirkungsszenarien	Abstimmung der Einsatzpositionen/Aktionen auf die einzelnen Einwirkungsszenarien
ORGANISATORISCH	51	1 Notfallpläne	40			
		2 Wiederherstellungspläne	80			
		3 Interoperabilität	80			
		4 Humanressourcen (respond)	20	x	x	
		5 Humanressourcen (recover)	100	x	x	
		6 Aus-/Weiterbildung	20			
		7 Verantwortlichkeiten	20		x	x
WIRTSCHAFTLICH	47	8 Finanzen (respond)	16			
		9 Finanzen (recover)	79			
PHYSISCH/TECHNISCH	5	10 Materielle Ressourcen (respond)	10			
		11 Materielle Ressourcen (recover)	0			
		12 Kommunikationssysteme	3			
		13 Krisen-/ Notfallzentrum	10			
		14 Technische Einrichtungen	0			
		15 Alternative Routen	0			
		16 Kapazität alternative Routen	16			
17 Redundanzen	0					

Bild 27: Hervorhebung infrage kommender Maßnahmenfelder (Rot) im Excel-Tool (Ausschnitt), basierend auf den Kriterien, für welche ein Handlungsbedarf identifiziert wurde

## 5.6 Maßnahmenbeurteilung

### 5.6.1 Kurzbeschreibung und Ziele

Das Ziel der Maßnahmenbeurteilung ist die Abschätzung der Resilienz Wirkung der vorher ausgewählten Maßnahmen auf das System. Sie setzt sich zusammen aus:

- der Festlegung der Systemfunktionalität(en) und
- der Abschätzung der Resilienz Wirkung jeder Maßnahme aufgrund ihres Einflusses auf die Funktionalität(en) des Systems.

Wie auch das Resilienzscreening findet die Maßnahmenbeurteilung mittels einer Nutzwertanalyse statt. Sowohl für das Gesamtsystem als auch für die einzelnen Zielgrößen wird die Resilienz Wirkung jeder potenziellen Maßnahme auf das System ermit-

telt. Die Resilienz Wirkung entspricht dem Gesamtnutzwert aus der Nutzwertanalyse und berechnet sich aus der gewichteten Summe der Matrixwerte der einzelnen Funktionalitäten. Die Matrixwerte ergeben sich aus Kombination der Punktzahlen, welche den Funktionalitäten anhand definierter Bewertungsskalen zugewiesen werden. Pro Funktionalität gibt es zwei separate Bewertungsskalen: eine für die Beurteilung des Einflusses der Maßnahme auf den Funktionalitätsverlust und eine für die Beurteilung des Einflusses auf die Dauer bis zur Wiederherstellung der gewünschten Systemfunktionalität. Je nach Zielerreichungsgrad wird der Funktionalität ein Wert zwischen -3 (negative Auswirkung der Maßnahme auf die Funktionalität) und +3 (positive Auswirkung der Maßnahme auf die Funktionalität) zugewiesen. Durch Kombination der beiden Werte ergibt sich der Matrixwert. Die Zuordnung erfolgt durch Experten.

### 5.6.2 Festlegung der Systemfunktionalität(en)

Die Resilienz Wirkung der einzelnen Maßnahmen wird anhand ausgewählter Funktionalitäten beurteilt. Die im vorliegenden Handbuch verwendeten Funktionalitäten stützen sich auf das Ziel- und Indikatorensystem des BVWP 2030 [7] und wurden mit der Funktionalität Wertschöpfungseffekte ergänzt. Es wurden drei Zielgrößen formuliert:

- Wirtschaftliche Aspekte,
- Verkehrssicherheit,
- Umwelt.

Den Zielgrößen wurden Teilziele (Funktionalitäten) zugeordnet. Der Zielerreichungsgrad der Funktionalitäten wird anhand von (messbaren) Indikatoren beurteilt. Zielgrößen, Funktionalitäten und die dazugehörigen Indikatoren können Tabelle 8 entnommen werden.

Die Bewertung findet anhand zweier Bewertungsskalen statt (Tabelle 9). Verglichen wird das System nach Umsetzung der potenziellen Maßnahme (Planfall) mit dem Zustand des Systems ohne Maßnahme (Referenzfall). Für jede Funktionalität müssen separat die folgenden Fragen beantwortet werden:

Zielgröße	Funktionalität (Teilzielgröße)	Indikator	Beschreibung	Gewichtung
WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE (70 %)	Reise- und Transportzeiten	Fahrzeugstunden	Abhängig von Länge und signalisierter Geschwindigkeit der Routen im Netz	35 %
	Kapazität im Netz	Kapazität	Abhängig vom baulichen Ausbaustandard und Anzahl der Routen im Netz	10 %
	Betriebskosten	Beförderungs- und Transportkosten im Personen- und Güterverkehr	Abhängig von Länge der Routen im Netz und den Reisezeiten	15 %
	Innerörtliche Trennwirkung	Wartezeit Fußgänger zur Querung von Straßen	Abhängig von Routenverlauf durch Ortschaften im Netz (Wird Ortschaft durchschnitten und wenn ja wo und wie?)	5 %
	Wertschöpfungseffekte	Wertschöpfung/Beschäftigung	Abhängig von potenziellen Produktionsausfällen und Arbeitplatzeffekten	35 %
VERKEHRSSICHERHEIT (20 %)	Unfallkosten	Veränderung der Unfallkosten (Personen- und Sachschäden)	Abhängig von Exposition (Anzahl Fahrzeuge auf Ausweichroute und Länge)	100 %
UMWELT (10 %)	Luftschadstoffemissionen und Treibhausgasemissionen	Fahrleistung	Abhängig von Weglänge und Geschwindigkeit	40 %
	Lärmbelastung	Fahrleistung innerorts	Abhängig von Anzahl Fahrzeuge und Geschwindigkeit	30 %
	Beeinträchtigung durch das Bauwerk	Einschätzung z. B. aufgrund von Einträgen ins Gewässer, umweltfreundlich Baustoffe (Brand), Lage des Objekts (Beeinträchtigung von Wasserschutz-zonen, Naturschutzgebieten)	Abhängig von Maßnahme – Einfluss netzweit, ereignisunabhängig	20 %
	Landschafts- und Ortsbild	Einschätzung zum Eingriff einer Maßnahme in das Landschafts- und Ortsbild (z. B. Tunnelportale)	Abhängig von Maßnahme – Einfluss netzweit, ereignisunabhängig	10 %

Tab. 8: Ziel- und Indikatorensystem zur Erfassung der Resilienz Wirkung

	Funktionalitätsverlust $\Delta F$	Wiederherstellung $\Delta t$
3	Die Maßnahme führt zu einer Reduktion des Funktionalitätsverlusts (z. B. Verkürzung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 80 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verkürzung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 80 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.
2	Die Maßnahme führt zu einer Reduktion des Funktionalitätsverlusts (z. B. Verkürzung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 50 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verkürzung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 50 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.
1	Die Maßnahme führt zu einer Reduktion des Funktionalitätsverlusts (z. B. Verkürzung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 20 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verkürzung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 20 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.
0	Die Maßnahme hat keinen Einfluss auf den Funktionalitätsverlust.	Die Maßnahme hat keinen Einfluss auf die Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes.
-1	Die Maßnahme führt zu einer Zunahme des Funktionalitätsverlusts (z. B. Erhöhung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 20 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verlängerung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 20 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.
-2	Die Maßnahme führt zu einer Zunahme des Funktionalitätsverlusts (z. B. Erhöhung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 50 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verlängerung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses) um mehr als 50 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.
-3	Die Maßnahme führt zu einer Zunahme des Funktionalitätsverlusts (z. B. Erhöhung der Reisezeitdifferenz) um mehr als 80 %, verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.	Die Maßnahme führt zu einer Verlängerung der Dauer bis zur Wiederherstellung des Ausgangszustandes (z. B. Herstellung der ursprünglichen Reisezeit vor Eintritt des Ereignisses um mehr als 80 % (inkl. dauerhafter Veränderungen)), verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme.

Tab. 9: Aufbau der Bewertungsskalen für die Punkteverteilung. Die detaillierten Bewertungsskalen können Anhang A4 entnommen werden.

- Wie stark beeinflusst die Maßnahme den Funktionalitätsverlust  $\Delta F$  des Systems verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme (Referenzfall)?
- Wie stark beeinflusst die Maßnahme die Wiederherstellungszeit des Systems  $\Delta t$ , das heißt die Zeit, bis das System seine Funktionalität im Ausgangszustand vor Eintritt des Ereignisses wieder erreicht hat, durch die Maßnahme verglichen mit dem Zustand ohne Maßnahme (Referenzfall)?

Die Bewertungsskala reicht von -3 bis +3, wobei negative Werte einen negativen Einfluss der Maßnahme

auf den Indikator respektive seine Wiederherstellungszeit im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme darstellen. Hat eine Maßnahme keinen Einfluss erhält diese den Wert 0 auf der Bewertungsskala. Es ist in erster Linie eine qualitative Abschätzung der Auswirkungen vorgesehen. Die Prozentangaben in der Bewertungsskala dienen zur Orientierung.

Die Grafiken in Bild 28 und 29 unterstützen den Anwender darin, die in Tabelle 9 dargestellten Bewertungsskalen anzuwenden.

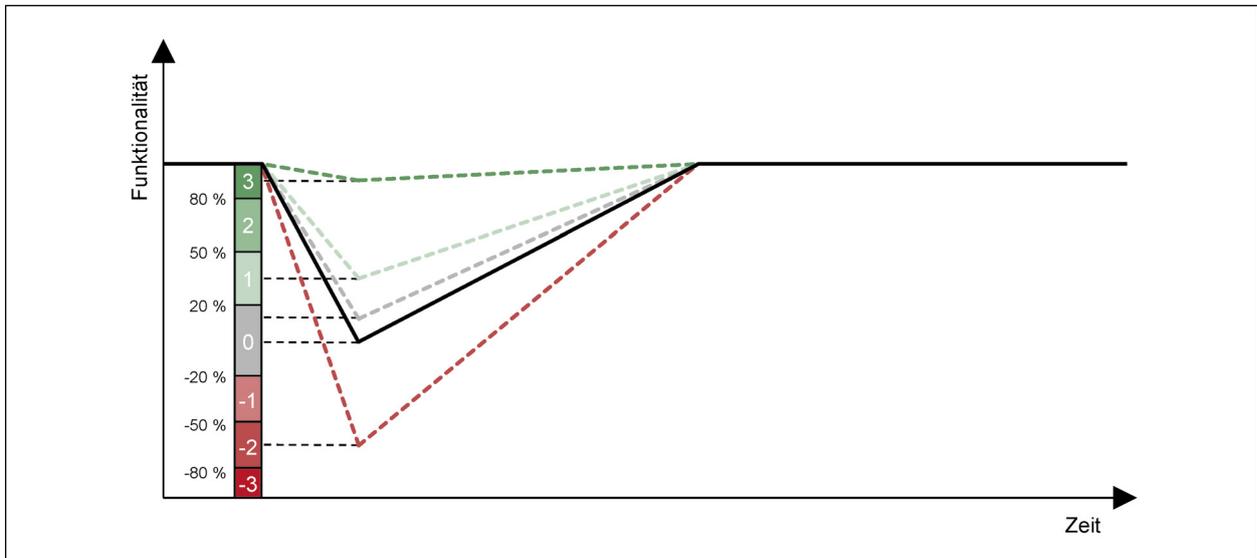


Bild 28: Bewertung des Einflusses von Maßnahmen (Rot: Maßnahme mit positivem Effekt; Grün: Maßnahme mit negativem Effekt) auf den maximalen Funktionalitätsverlust anhand einer Bewertungsskala, welche die Veränderung in Relation zum Funktionalitätsverlust ohne Maßnahme (schwarze Kurve) setzt

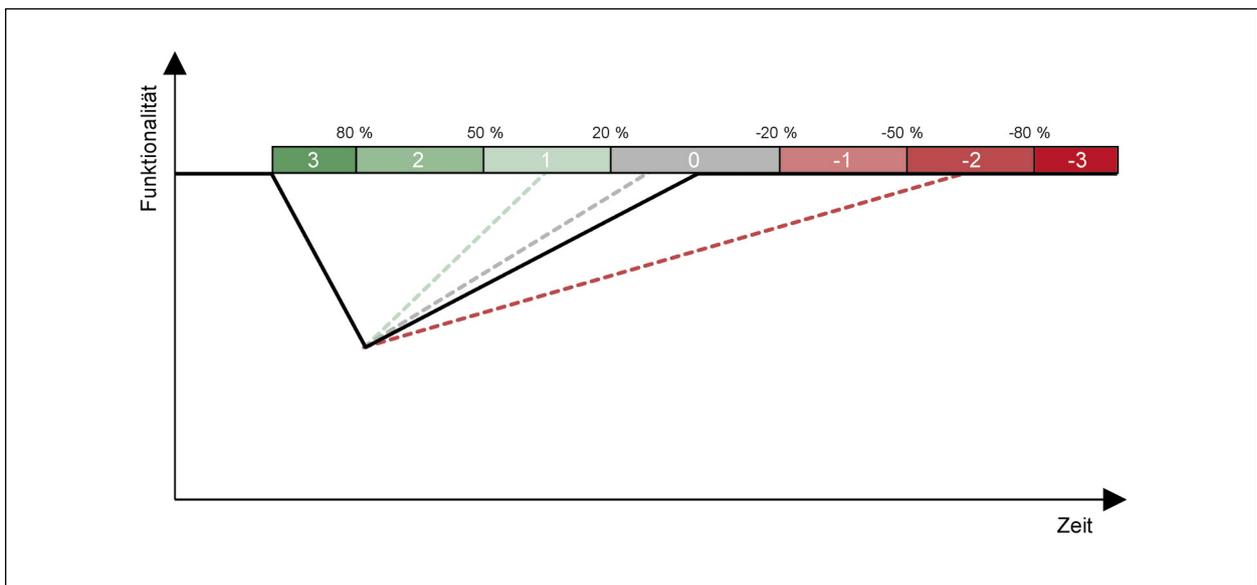


Bild 29: Bewertung des Einflusses von Maßnahmen (Rot: Maßnahme mit positivem Effekt; Grün: Maßnahme mit negativem Effekt) auf die Dauer bis zur Wiederherstellung, welche die Veränderung in Relation zur Dauer bis zur Wiederherstellung ohne Maßnahme (schwarze Kurve) setzt

### 5.6.3 Erfassung der Resilienz Wirkung

#### Beschreibung und Ziel

- Das Ziel besteht darin, die im Resilienzscreening identifizierten, potenziellen Maßnahmen hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung zu beurteilen. Dies geschieht anhand der in Kapitel 5.6.2 definierten Funktionalitäten und ihren dazugehörigen Bewertungsskalen.

Für jede Maßnahme muss

- pro Funktionalität und
- pro kritischem Objekt

basierend auf dem Konzept der Funktionalitätskurve bestimmt werden, wie stark sich die Dauer der Einwirkung  $\Delta t$  sowie der Funktionalitätsverlust  $\Delta F$  im Ereignisfall am jeweils betrachteten, kritischen Objekt durch die Maßnahme verändert.

Für die Funktionalitäten

- Reisezeit,
- Kapazität,
- Betriebskosten,
- Wertschöpfungseffekte,
- innerörtliche Trennwirkung,
- Unfallkosten,
- Luftschadstoffe,
- Lärmbelastung,

wird eine objektspezifische Beurteilung vorgenommen. Das heißt für jede Maßnahme muss für jedes kritische Objekt separat beurteilt werden, welchen relativen Einfluss die entsprechende Maßnahme bei einem Ausfall dieses kritischen Objekts auf die Funktionalität hat. Die für den Einfluss auf  $\Delta F$  und  $\Delta t$  vergebenen Punkte werden kombiniert woraus sich pro Maßnahme und pro Funktionalität ein Matrixwert ergibt, welcher die Resilienz Wirkung widerspiegelt.

Für die Funktionalitäten Umweltwirkung und Landschaftsbild ist eine separate Betrachtung pro Objekt nicht notwendig. Hierbei handelt es sich um Funktionalitäten, welche durch die Maßnahme selbst dauerhaft negativ beeinflusst werden (die Maßnahme selbst wird zum disruptiven Ereignis). Der Einfluss der Maßnahmen auf diese beiden Funktionalitäten ist unabhängig von der Anzahl kritischer Objekte und wird direkt systemweit abgeschätzt.

Aus dem gewichteten Mittelwert der Matrixwerte kann dann die Resilienz Wirkung einer Maßnahme sowohl auf die einzelnen Zielgrößen als auch auf das Gesamtsystem ermittelt werden. Als Referenzzustand dient das System ohne Maßnahme.

Die Beurteilung kann auf Basis quantifizierender Modelle (z. B. Einsatz von Verkehrsmodellen) erfolgen: Es können die Veränderungen berechnet und entsprechend der Tabelle 9 Punkte vergeben werden. Dies wird aber nicht immer praktikabel sein. In diesem Fall kann die Beurteilung wie auch das Resilienzscreening durch Einschätzungen von Experten erfolgen.

## Vorgehen

1) Für jede Maßnahme bedarf es

- pro Funktionalität und
- pro kritischem Objekt<sup>8</sup>

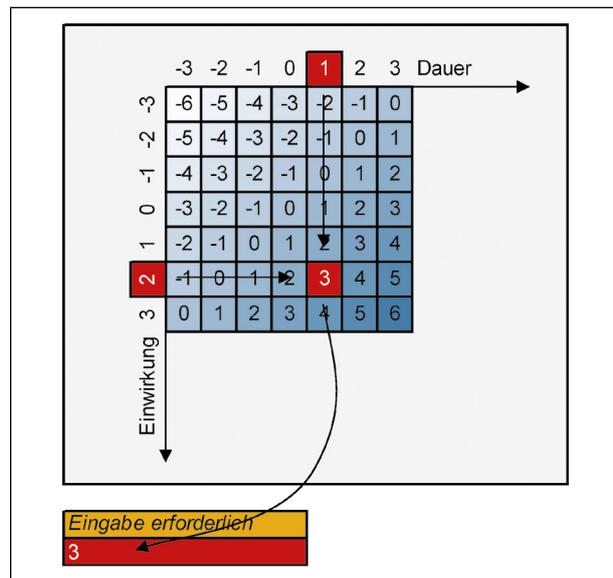


Bild 30: Prinzip der Punkteverteilung. Gemäß der Bewertungsskala führt die in diesem Fall beurteilte Maßnahme zu einer Reduktion des Funktionalitätsverlusts (z. B. Senkung der Reise- und Transportzeiten) bei einem Ausfall des kritischen Objekts um mehr als 40 % (2 Punkte) und zu einer Senkung der Dauer bis zur Wiederherstellung der Funktionalität (z. B. Reise- und Transportzeiten) im Ausgangszustand um mehr als 20 % (1 Punkt). Daraus ergibt sich ein Matrixwert von 3.

einer Abschätzung der

- erwarteten Veränderung der Dauer der Einwirkung  $\Delta t$  nach Umsetzung der Maßnahme (in %) bei Ausfall des betrachteten kritischen Objekts und
- erwarteten Reduktion des Funktionalitätsverlusts  $\Delta F$  nach Umsetzung der Maßnahme (in %) bei Ausfall des entsprechenden kritischen Objekts.

Auf dieser Grundlage können jeweils für die relative Veränderung der Einwirkung auf die Funktionalität sowie der Einwirkungsdauer anhand der Bewertungsskalen Punkte zwischen -3 (negativer Einfluss) und +3 (positiver Einfluss)  $\Delta t$  vergeben werden. Durch Kombination der Punkte ergibt sich jeweils ein Matrixwert zwischen -6 und +6 (Bild 30 und Bild 31).

<sup>8</sup> Für die Funktionalitäten Umweltwirkung und Landschaftsbild ist keine objektspezifische Beurteilung notwendig. Hier Bedarf es pro Maßnahme und pro Funktionalität einer Abschätzung der

- erwarteten Veränderung der Dauer der Einwirkung  $\Delta t$ , nach Umsetzung der Maßnahme (in %) und
- erwarteten Reduktion des Funktionalitätsverlusts  $\Delta F$ , nach Umsetzung der Maßnahme (in %).

- 2) Addition der Matrixwerte aller kritischen Objekte pro Funktionalität und Maßnahme<sup>9</sup> ergibt den Matrixwert des Gesamtsystems (Bild 30 und Bild 31).
  - 3) Festlegung der Gewichtung der Funktionalitäten. Dabei muss die Summe der Gewichtungen aller Funktionalitäten innerhalb einer Zielgröße 100 % betragen (Bild 32).
  - 4) Festlegung der Gewichtung der Zielgrößen. Dabei muss die Summe der Gewichtungen aller Zielgrößen 100 % betragen (Bild 32).
- Resilienzwirkung der Maßnahme auf die einzelnen Zielgrößen. Dieser Wert ergibt sich aus dem gewichteten Mittelwert der Matrixwerte unter Berücksichtigung der Gewichtung der Funktionalitäten (Bild 33).
  - Resilienzwirkung der Maßnahme auf das Gesamtsystem. Dieser Wert ergibt sich aus dem gewichteten Mittelwert der Werte für die Resilienz Wirkung auf die einzelnen Zielgrößen unter Berücksichtigung der Gewichtung der Zielgrößen (Bild 33).

**Resultat**

- Resilienzwirkung der Maßnahme auf die einzelnen Funktionalitäten (entspricht dem Matrixwert des Gesamtsystems in Bild 31).

<sup>9</sup> Dieser Schritt entfällt für die Funktionalitäten Umweltwirkung und Landschaftsbild.

**5.7 Resilienzoptimierung**

**5.7.1 Kurzbeschreibung und Ziele**

Das Ziel der Resilienzoptimierung besteht darin, auf Grundlage der ermittelten Resilienz Wirkung und unter Berücksichtigung einer Kosten-Wirksamkeits-Betrachtung der einzelnen Maßnahmen eine für die Resilienz des Systems optimale Rangliste der prio-

Maßnahmenbezeichnung eingeben	WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE														
	Reisezeit			Kapazitätsreserven			Betriebskosten Fahrzeuge			Wertschöpfungseffekte			Innerörtliche Trennwirkung		
	ΔF	Δt	Σ	ΔF	Δt	Σ	ΔF	Δt	Σ	ΔF	Δt	Σ	ΔF	Δt	Σ
<b>Gesamtsystem</b>	7	0	7	5	0	5	4	3	7	0	0	0	-5	0	-5
Kritisches Objekt X	3	0	3	2	0	2	1	1	2	0	0	0	-1	0	-1
Kritisches Objekt X	3	0	3	2	0	2	1	1	2	0	0	0	-1	0	-1
Kritisches Objekt X	1	0	1	1	0	1	2	1	3	0	0	0	-3	0	-3

Bild 31: Beispiel für eine Punkteverteilung und -kombination für die Funktionalitäten der Zielgröße Wirtschaftliche Aspekte. Für die Funktionalitäten der Zielgröße Wirtschaftliche Aspekte wird eine Bewertung pro kritischem Objekt vorgenommen. Pro Objekt kann ein Matrixwert (Σ) zwischen -6 und +6 erreicht werden, welcher sich aus den für ΔF und Δt vergebenen Punkten (-3 bis +3) zusammensetzt. Durch Addition der Matrixwerte der einzelnen kritischen Objekte ergibt sich der Matrixwert für das Gesamtsystem für die jeweilige Funktionalität (Ausschnitt aus dem Excel-Tool).

Gewichtung Zielgröße:	WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE				
		70 %			
Gewichtung Funktionalität:	Reisezeit	Kapazitätsreserven	Betriebskosten Fahrzeuge	Wertschöpfungseffekte	Innerörtliche Trennwirkung
	35 %	10 %	15 %	35 %	5 %

Bild 32: Festlegung der Gewichtungen am Beispiel Wirtschaftliche Aspekte

Resilienz Wirkung System:	2.04		
	WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE	VERKEHRS-SICHERHEIT	UMWELT
Resilienz Wirkung Zielgröße:	3.30	-2.00	1.25

Bild 33: Beispiel einer Zusammenfassung der Resultate für eine spezifische Maßnahme. Für jede potenzielle Maßnahme wird deren Resilienz Wirkung auf das Gesamtsystem ermittelt. Diese Werte werden dann in der Resilienzoptimierung den Maßnahmenkosten gegenübergestellt.

risierten Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen zu erstellen. Diese priorisierte Rangliste dient dem Entscheidungsträger als Hilfsmittel bei der Auswahl der effizientesten Resilienzmaßnahmen und bei der Umsetzung eines konsistenten Resilienzmanagements.

Die Teilziele dieses Prozessschritts sind

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

Die Wirkung von Maßnahmen kann über die alleinige Resilienz Wirkung hinausgehen. Beispielsweise kann durch den Bau einer zusätzlichen Straße die Redundanz und somit die Resilienz des Systems erhöht werden, gleichzeitig führt der Bau aber auch dazu, dass dadurch manche Ortschaften durch die neue/zusätzliche Erschließung eine höhere wirtschaftliche und gesellschaftliche Attraktivität erlangen. Entsprechende Bewertungen erfolgen dann im Rahmen des Bundesverkehrswegeplans oder im Rahmen der jeweiligen Landesplanungen zum Beispiel auf Basis der EWS. Bei einer genauen Bewertung allein aus Sicht Resilienz dürfte demzufolge nur ein Teil der Maßnahmenkosten der Resilienz Wirkung gegenübergestellt werden (Entwicklung eines Kostenschlüssels). Eine solche Kostenzuteilung ist aber nur bedingt praktikabel, da die Straße insgesamt finanziert werden muss und es keine unterschiedlichen Finanzierungsquellen für Resilienz und für Neu- und Ausbau von Verkehrswegen gibt. Deshalb werden im Weiteren alle Kosten berücksichtigt.

## 5.7.2 Erfassung der Maßnahmenkosten

### Beschreibung und Ziel

- Für die Berechnung der jährlichen Gesamtkosten der Maßnahme wird die Annuitätenmethode verwendet. Mit der Annuitätenmethode werden einmalige Investitionskosten (Ausgaben) in durchschnittlich jährliche Kosten umgerechnet. Die Annuität setzt sich zusammen aus Zins- und Abschreibungsanteil.

### Vorgehen

- Folgende Inputparameter sind durch den Anwender festzulegen (Bild 34):
  - Investitionskosten,
  - Jährliche Unterhalts- und Betriebskosten oder alternativ der prozentuale Anteil der Betriebs- und Unterhaltskosten an den Investitionskosten,
  - Lebensdauer.

Im Excel-Tool werden wird auf Basis der Lebensdauer automatisch der Annuitätenfaktor berechnet. Im Tool ist dabei der Zinssatz der Bundesverkehrswegeplans 2030 von 1.7 %/a berücksichtigt.

### Resultat

- Als Resultat erhält der Anwender die jährlichen Gesamtkosten der Maßnahme.

		Maßnahme 1	Maßnahme 2	Maßnahme 3
Ermittlung Maßnahmenkosten	Zinssatz: [%]	1.7 %	1.7 %	1.7 %
	Anteil Unterhaltskosten an Investitionskosten: [%]	1.0 %	1.5 %	2.0 %
	Anteil Betriebskosten an Investitionskosten: [%]	1.0 %	1.0 %	0.0 %
	Investitionskosten: [EUR]	1'000'000	1'000'000	1'000'000
	Jährliche Unterhaltskosten: [EUR/a]	10'000	15'000	20'000
	Jährliche Betriebskosten: [EUR/a]	10'000	10'000	0
	Lebensdauer: [a]	5	10	10
	Annuitätenfaktor: [-]	0.210	0.110	0.110
	Annuität: [EUR/a]	210'315	109'586	109'586
Jährliche Gesamtkosten der Maßnahme [EUR/a]	230'315	134'586	129'586	

Bild 34: Ermittlung der Maßnahmenkosten am Beispiel von drei fiktiven Maßnahmen. Als Ergebnis erhält der Anwender die jährlichen Gesamtkosten der Maßnahme (Ausschnitt aus dem Excel-Tool)

### 5.7.3 Priorisierung der Resilienzmaßnahmen

#### Beschreibung und Ziel

- 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. Absolute Resilienzwirkung der Maßnahme
2. Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis
3. Zeitlicher Realisierungshorizont (Bis wann ist mit einer Umsetzung der Maßnahme realistischer Weise zu rechnen?)
4. Realisierungswahrscheinlichkeit (Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Maßnahmenvorschlag tatsächlich zu einer Realisierung gelangt?)
5. Abhängigkeit der Maßnahmen voneinander: Verschiedene Maßnahmen können sich gegenseitig ausschließen oder sie können sich ergänzen.

#### Vorgehen

- 1) In einem ersten Schritt werden die in der Maßnahmenbeurteilung ermittelten Resilienzwirkungen der betrachteten Maßnahmen verglichen.
- 2) Dann wird mittels einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse die jährlichen Gesamtkosten der Maßnahme ihrer Resilienzwirkung gegenübergestellt (Wieviel Nutzenpunkte erhält man je eingesetztem Euro?). Dieser Ansatz ermöglicht eine Maßnahmenpriorisierung unter Einbezug der Maßnahmenkosten. Je höher der resultierende Wert,

desto höher ist die Kostenwirksamkeit der Maßnahme, da mittels eines geringeren finanziellen Inputs eine größere Resilienzwirkung erzielt werden kann (Bild 35).

- 3) Zusätzlich zum Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis ist eine Abschätzung des zeitlichen Realisierungshorizonts für die Maßnahmenpriorisierung entscheidend, weil dadurch eine den Rahmenbedingungen und Realisierungsmöglichkeiten angepasste Auswahl an kurz-, mittel- und langfristig realisierbaren Maßnahmen getroffen werden kann.
- 4) 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 Einsparungen beeinflusst. Eine Abschätzung der Realisierungswahrscheinlichkeit durch Experten hilft dabei, den Stellenwert von potenziell resilienten Maßnahmen bei der Priorisierung von Maßnahmen zu berücksichtigen.
- 5) Die abschließende Priorisierung der Resilienzmaßnahmen beinhaltet die Erstellung einer Rangliste durch die Experten. Am besten bewertet sind diejenigen Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen, die nach einer sorgfältigen Abwägung der absoluten Resilienzwirkung, des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses, des Realisierungshorizonts, der Realisierungswahrscheinlichkeit sowie allfälligen weiteren strategisch und planerischen Aspekten im Hinblick auf eine Erhöhung der Systemresilienz die größte Wirkung erzielen. Für die abschließende Auswahl der zu realisierenden Maßnahmen ist zu beachten, dass einzelne Maßnahmen sich gegenseitig ausschließen können (z. B. weil sie unterschied-

		Maßnahme 1	Maßnahme 2	Maßnahme 3
Jährliche Gesamtkosten der Maßnahme	[EUR/a]	230'315	134'586	129'586
1. Resilienzwirkung	[-]	2.02	0.30	2.82
2. Kostenwirksamkeit	[Wirkung/Mio.EUR]	8.77	2.23	21.76
3. Zeitlicher Realisierungshorizont	[a]	10	15	5
4. Realisierungswahrscheinlichkeit	[-]	0.8	0.2	0.8
Rangliste	[-]	2	3	1

Bild 35: Ermittlung des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses am Beispiel von drei fiktiven Maßnahmen (Ausschnitt aus dem Excel-Tool)

liche Varianten einer neuen Straße oder von Notfallplänen darstellen). Für Maßnahmen, die nicht unmittelbar realisiert werden können, sind Überlegungen zum weiteren Planungsprozess vorzunehmen, beispielsweise, inwieweit aufgrund einer hohen Resilienz Wirkung und/oder eines hohen Kostenwirksamkeit der Planungs- und Umsetzungsprozess der Maßnahme beeinflusst werden sollte.

## Resultat

- Rangliste der untersuchten Maßnahmen.

## 6 Anwendungsbeispiel

### 6.1 Beschreibung Fallbeispiel

Als Anwendungsbeispiel dient ein fiktives Straßennetz (Bild 36), bestehend aus einem Netz mit 4-streifigen Autobahnen und 2-streifigen Landstraßen. Innerhalb der Systemgrenzen befinden sich drei größere Ortschaften, sowie zwei Feuchtgebiete von hoher ökologischer Bedeutung. Das Fallbeispiel wurde bewusst abstrakt gehalten, um an einem einfachen Beispiel die Grundprinzipien der Methodik erläutern zu können.

### 6.2 Zieldefinition und Systemabgrenzung

Ziel der Anwendung der Methodik ist die Erhöhung der Resilienz des in Bild 36 dargestellten Straßennetzes

(räumliche Systemabgrenzung), sodass dieses möglichst gut auf disruptive Ereignisse vorbereitet ist. Inhaltlich beschränkt sich das Anwendungsbeispiel auf die Brücken des Straßennetzes als kritische Elemente des Systems. Es wird von zehn solchen kritischen Brücken im System ausgegangen. Hinsichtlich potenzieller Gefährdungen werden keine Einschränkungen vorgenommen (all hazards). Es wird jedoch bei der Beurteilung der Maßnahmen von einem Totalausfall-Szenario der Brücke ausgegangen mit einer maximalen Wiederherstellungszeit von zwei Monaten.

## 6.3 Resilienzscreening

### 6.3.1 Festlegung des Kriterienkatalogs

Es wird der in Kapitel 4.2.2 erarbeitete Kriterienkatalog verwendet.

### 6.3.2 Erfassung der Systemresilienz

Das Resilienzscreening wurde für das Anwendungsbeispiel exemplarisch durchgeführt. Da es sich um ein fiktives System handelt, sind die Rahmenbedingungen nicht ausreichend definiert, um eine Beurteilung der Kriterien durchzuführen. Die Ergebnisse der exemplarischen Beurteilung sind in Bild 37 dargestellt. Das beschriebene System ist aus organisatorischen und wirtschaftlichen Resilienz Aspekten gut aufgestellt. Im technischen Bereich dagegen besteht noch Potenzial für die Umsetzung weiterer Maßnahmen.

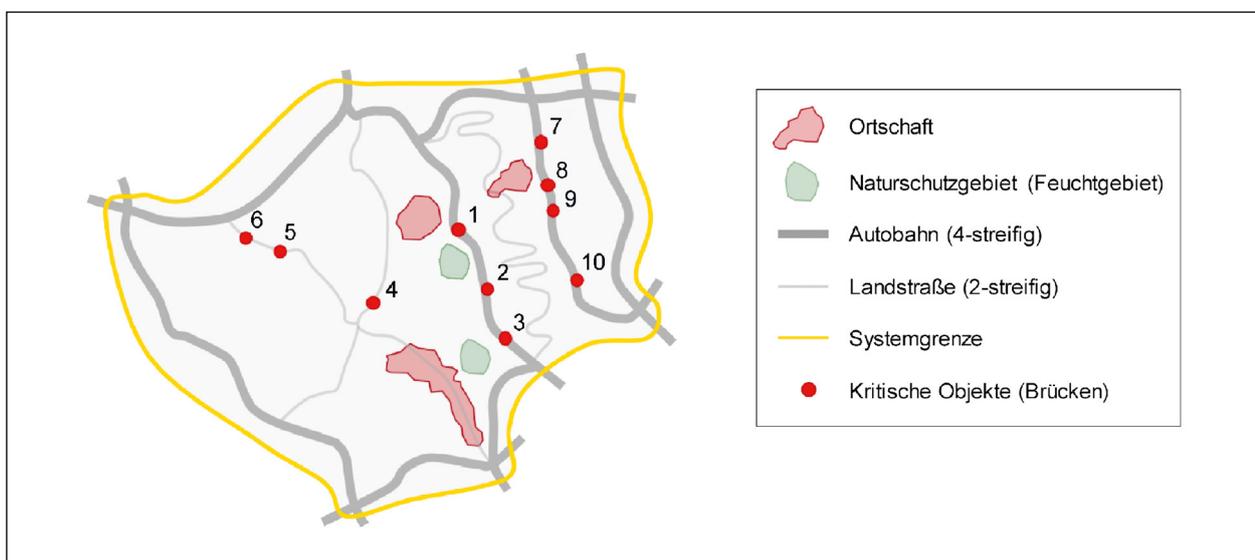


Bild 36: Räumliche Systemabgrenzung des Fallbeispiels

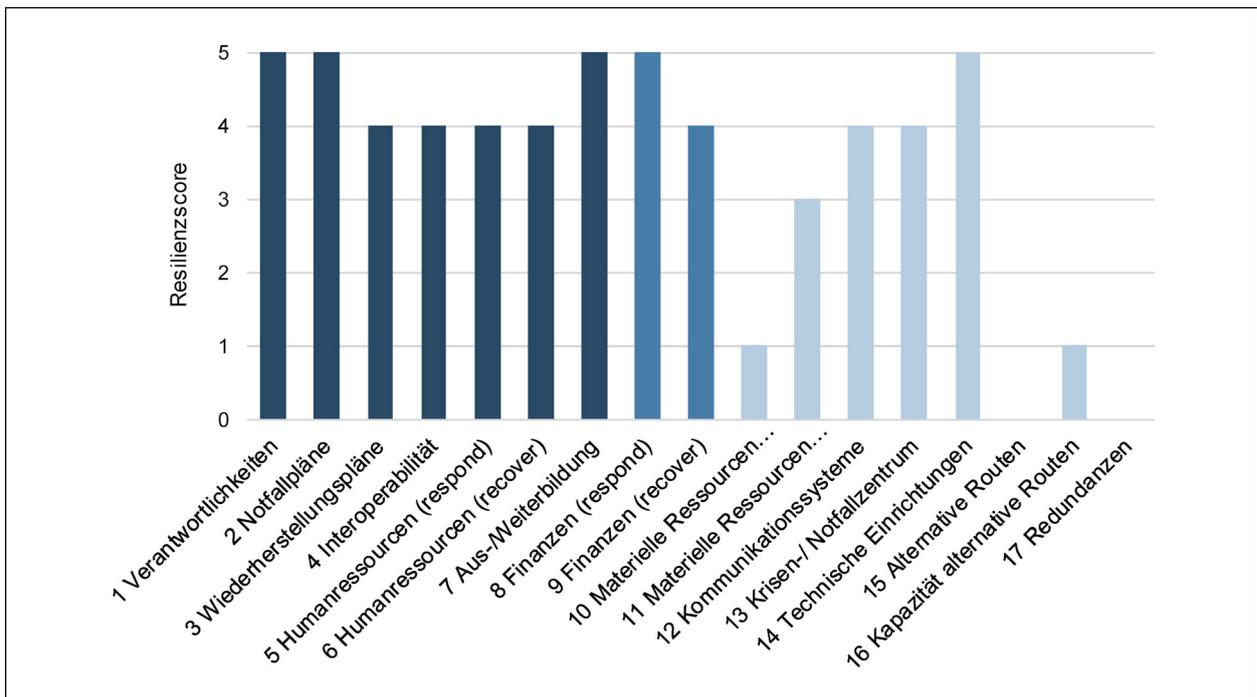


Bild 37: Resilienzscore für die einzelnen Kriterien für das Anwendungsbeispiel. Je höher der Score, desto besser schneidet das System hinsichtlich des Kriteriums ab

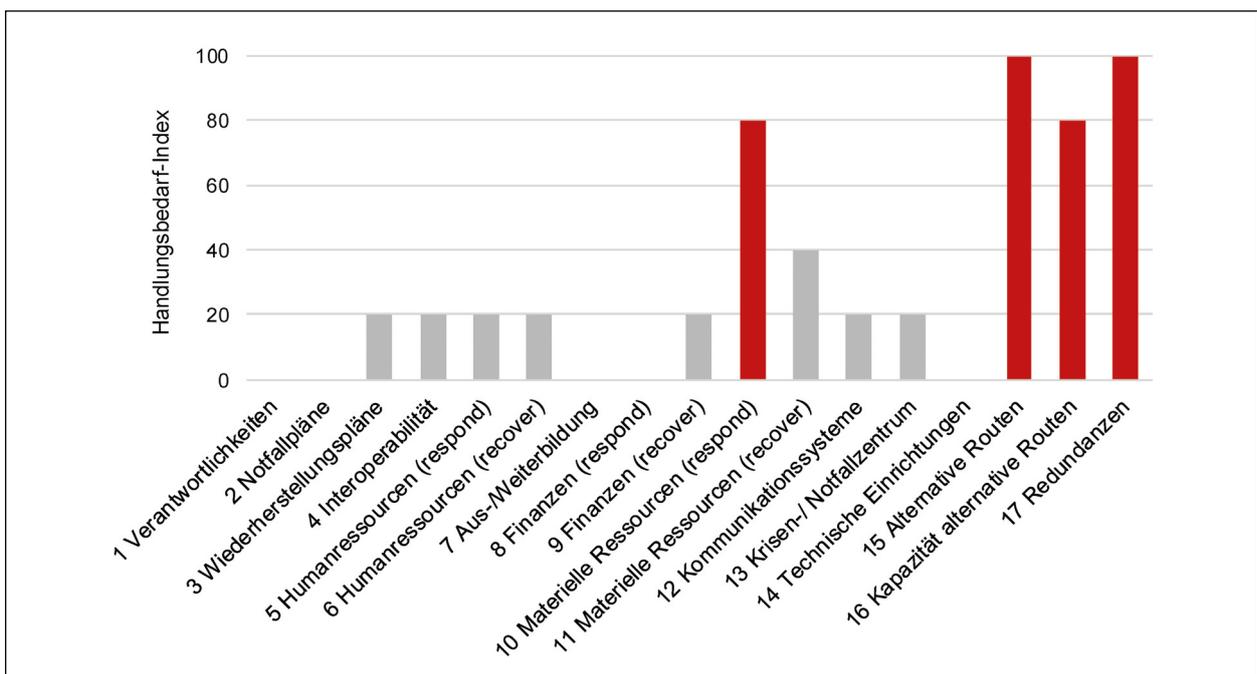


Bild 38: Handlungsbedarfs-Indizes der einzelnen Kriterien. Je höher der Handlungsbedarfs-Index, desto höher der Handlungsbedarf

### 6.3.3 Identifikation des Handlungsbedarfs

Der eigentliche Handlungsbedarf ergibt sich aus den gewichteten Resilienzscore. Es wird eine Gleichgewichtung der Kriterien verwendet. Als maximal zulässiger Handlungsbedarfs-Index wird ein

Wert von 50 festgelegt. Der Handlungsbedarf wird auf Grundlage der Kriterien bestimmt und ist in Bild 38 dargestellt.

Hinsichtlich folgender Kriterien ergibt sich ein Handlungsbedarf:

- Materielle Ressourcen in der Phase respond,
- Alternative Routen,
- Kapazitäten alternativer Routen,
- Redundanzen im Bereich alternativer Verkehrsträger.

### 6.3.4 Identifikation von Resilienzmaßnahmen

Aus der Kreuztabelle, welche den Kriterien potenzielle Maßnahmenfelder gegenüberstellt, ergeben sich basierend auf den Ergebnissen des Resilienzscreenings folgende potenzielle Maßnahmenfelder und Wirkungspotenziale:

- Treffen von Vereinbarungen mit externen Ressourcenlieferanten (Wirkungspotenzial 5),
- Regelmäßige Überprüfung und Anpassung der bestehenden Notfallpläne (Wirkungspotenzial 5),
- Regelmäßige Überprüfung und Anpassung der Vereinbarungen bezüglich materieller Ressourcen (Wirkungspotenzial 5),
- Back-up Inventare und Ausrüstungen bereitstellen (Wirkungspotenzial 5),
- Ausbau bestehender Routen (Wirkungspotenzial 5),
- Neubau von Routen (Wirkungspotenzial 10),
- Neubau alternativer Verkehrsträger (Wirkungspotenzial 6),
- Ausbau alternativer Verkehrsträger (Wirkungspotenzial 6).

Basierend auf den vorgeschlagenen Maßnahmenfeldern werden hier zur Erläuterung der Methodik drei umzusetzende Maßnahmen identifiziert, welche auf ihre Resilienz Wirkung hin untersucht werden sollen. Die Maßnahmen werden im Folgenden im Detail beschrieben und sind in Bild 39 dargestellt.

#### Maßnahme 1a: Kurze Umfahrung, 4-streifig

Bei Maßnahme 1a handelt es sich um den Neubau eines Straßenabschnitts, welcher eine Alternativroute darstellt, falls es zu einem Ausfall des kritischen Objekts 2 kommen sollte. Die Neubaustrecke ist 4-streifig ausgebaut (Autobahn) mit einer maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h. Die Neubaustrecke führt durch ein bestehendes Feuchtgebiet, welches im Rahmen des Neubaus trockengelegt werden muss.

#### Maßnahme 1b: Lange Umfahrung, 1-spurig

Bei Maßnahme 1b handelt es sich um den Neubau eines Straßenabschnitts, welcher eine Alternativroute darstellt, falls es zu einem Ausfall des kritischen Objekts 1, 2, 3 oder 4 kommen sollte. Die Neubaustrecke ist 2-streifig ausgebaut (Landstraße) mit einer maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Die Neubaustrecke führt durch ein bestehendes Feuchtgebiet, welches im Rah-

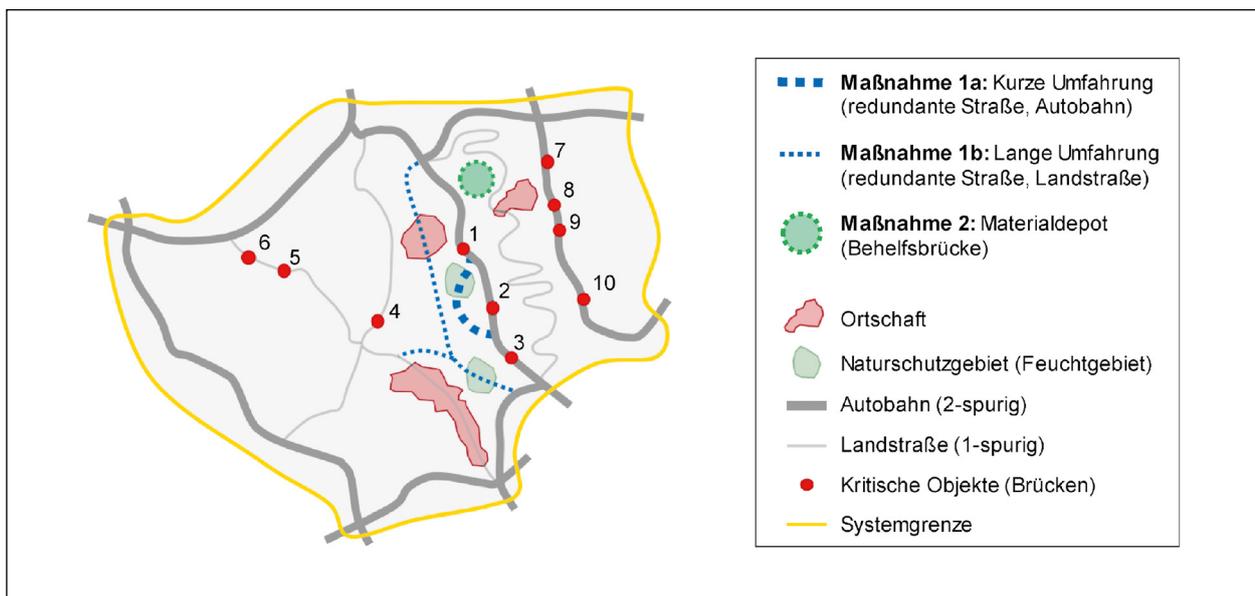


Bild 39: Grafische Darstellung der drei Maßnahmen, welche im Folgenden hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung beurteilt werden sollen

men des Neubaus trocken gelegt werden muss, sowie durch eine bestehende Ortschaft.

### **Maßnahme 2: Bereitstellen eines Materialdepots (Behelfsbrücke)**

Es wird ein Materialdepot eingerichtet, welches Material für eine Behelfsbrücke vorhält. Sollte es zu einem Ausfall eines der kritischen Elemente im definierten System kommen, kann die Behelfsbrücke zum Ereignisort transportiert und dort installiert werden.

## **6.4 Maßnahmenbeurteilung**

### **6.4.1 Festlegung der Systemfunktionalität(en)**

Es werden die in Kapitel 5.6.2 erarbeiteten Systemfunktionalitäten und die darin vorgeschlagenen Gewichtungen verwendet.

### **6.4.2 Erfassung der Resilienz Wirkung**

Bei der Erfassung der Resilienz Wirkung wird der Ereignisfall mit Maßnahme mit dem Ereignisfall ohne Maßnahme verglichen und die relative Auswirkung der Maßnahme auf die Funktionalität und die Zeit bis zur Wiederherstellung der Funktionalität abgeschätzt. Die Beurteilung findet auf Objektebene statt<sup>10</sup>. Durch Aufsummierung der Resultate kann die Wirkung auf das Gesamtsystem, das heißt auf Netzebene abgebildet werden.

Für die Erfassung der Resilienz Wirkung wird die Auswirkung der Maßnahme auf die Funktionalitäten der einzelnen kritischen Objekte untersucht. Dabei gelten folgende Rahmenbedingungen und Annahmen:

- Es kommt zu einem Totalausfall der Brücke. Ohne Maßnahmen kann die Brücke innerhalb von zwei Monaten wiederhergestellt werden.
- Es wird angenommen, dass über den definierten Zeitraum (maximaler Ausfall von zwei Monaten), und der Verfügbarkeit von Alternativrouten keine Wertschöpfungseffekte aufgrund von Schließungen oder Verlagerungen von Produktionsstand-

orten auftreten bzw. diese vernachlässigbar klein sind. Weitere Auswirkungen wie erhöhte Reise- und Transportzeiten und Transportkosten sind bei den entsprechenden Funktionalitäten berücksichtigt.

- Maßnahme 1a hat nur auf das kritische Objekt 2 Auswirkungen, welche größer 20 % sind. Für alle weiteren kritischen Objekte innerhalb der Systemgrenzen ist der Einfluss der Maßnahme auf  $\Delta F$  und  $\Delta t$  kleiner als 20 % und wird somit mit 0 bewertet.
- Maßnahme 1b hat nur auf die kritischen Objekte 1, 2, 3 und 4 Auswirkungen, welche größer 20 % sind. Für alle weiteren kritischen Objekte innerhalb der Systemgrenzen ist der Einfluss der Maßnahme auf  $\Delta F$  und  $\Delta t$  kleiner als 20 % und wird somit mit 0 bewertet. Des Weiteren ist der Einfluss der Maßnahme auf die kritischen Objekte 1-3 hinsichtlich aller definierten Funktionalitäten als gleich zu bewerten.
- Maßnahme 2a hat auf alle kritischen Elemente im System Auswirkungen, welche größer als 20 % sind. Des Weiteren ist der Einfluss der Maßnahme auf die kritischen Objekte 2, 4, 6, 8 und 10 hinsichtlich aller definierten Funktionalitäten als gleich zu bewerten. Es wird angenommen, dass die Behelfsbrücke dieselbe Kapazität wie das ausgefallene kritische Objekt besitzt.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen auf die Funktionalitäten der einzelnen kritischen Objekte beschrieben. Die Umsetzung im Excel-Tool kann Anhang A5 entnommen werden.

Auf Grundlage der Bewertungen in den Tabellen 10-13 kann unter Verwendung der vordefinierten Gewichtungen die Resilienz Wirkung der Maßnahmen berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt. Hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung schneidet Maßnahme 2 am besten ab, gefolgt von Maßnahme 1b. Für eine Priorisierung werden weitere Faktoren wie die Maßnahmenkosten sowie Realisierungswahrscheinlichkeit und -horizont berücksichtigt.

<sup>10</sup> Mit Ausnahme der Funktionalitäten Beeinträchtigung durch das Bauwerk und Landschafts- und Ortsbild.

Maßnahme 1a: Kurze Umfahrung, 4-streifig: Kritisches Objekt 2				
	$\Delta F$	Begründung	$\Delta t$	Begründung
Reisezeit	3	<p>Ohne Maßnahme 1a: Im Ereignisfall, dass Objekt 2 vollständig ausfällt, müssen die Verkehrsteilnehmer Ausweichrouten nehmen (rote Pfeile in der Abbildung). Die Ausweichrouten besitzen eine geringere zulässige Höchstgeschwindigkeit und sind länger. Dadurch steigt die Reisezeit im Ereignisfall.</p> <p>Mit Maßnahme 1a: Die neue Ausweichroute hat die gleiche zulässiger Höchstgeschwindigkeit wie die Route ohne Ereignisfall, in etwa dieselbe Länge und somit gleiche Reisezeit.</p> <p>Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Verlängerung der Reisezeit im Ereignisfall. Im Vergleich zum Fall ohne Maßnahme reduziert sich der Funktionalitätsverlust um 100 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts
Kapazität	3	<p>Ohne Maßnahme 1a: Die Kapazität im Netz sinkt durch den Ausfall des kritischen Objekts, da die entsprechende Straße nicht mehr befahren werden kann.</p> <p>Mit Maßnahme 1a: Die neue Straße erhöht zunächst einmal die Kapazität im System. Im Ereignisfall verhindert sie einen Abfall der Kapazität durch Ausfall des kritischen Objekts (gleiche Anzahl Fahrspuren) unter das Niveau im Referenzfall (heutiger Zustand ohne Maßnahme).</p> <p>Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Reduktion der Kapazität im Ereignisfall. Im Vergleich zum Fall ohne Maßnahme reduziert sich der Funktionalitätsverlust um 100 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts
Betriebskosten	3	<p>Ohne Maßnahme 1a: Im Ereignisfall, dass Objekt 2 vollständig ausfällt, müssen die Verkehrsteilnehmer Ausweichrouten nehmen (rote Pfeile in der Abbildung). Die Ausweichrouten sind länger, was beispielsweise zu einem höheren Treibstoffverbrauch und damit zu höheren Betriebskosten führt.</p> <p>Mit Maßnahme 1a: Die neue Ausweichroute hat in etwa dieselbe Distanz, wie die Route ohne Ereignisfall.</p> <p>Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Erhöhung der Betriebskosten im Ereignisfall. Im Vergleich zum Fall ohne Maßnahme reduziert sich der Funktionalitätsverlust um 100 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts
Wertschöpfungseffekte	0	Aufgrund des Zeitraums (maximaler Ausfall zwei Monaten) und der Verfügbarkeit von Alternativrouten dürften keine Wertschöpfungseffekte aufgrund der Schließung oder Verlagerung von Produktionsstandorten auftreten. Transportzeit- und Betriebskostenveränderungen sind oben bereits erfasst.	0	Aufgrund des Zeitraums (maximaler Ausfall von zwei Monaten) und der Verfügbarkeit von Alternativrouten dürften keine Wertschöpfungseffekte aufgrund der Schließung oder Verlagerung von Produktionsstandorten auftreten. Transportzeit- und Betriebskostenveränderungen sind oben bereits erfasst.

Tab. 10: Bewertung der Resilienz Wirkung der Maßnahme 1a auf das kritische Objekt 2

	$\Delta F$	Begründung	$\Delta t$	Begründung
Innerörtliche Trennwirkung	3	<p>Ohne Maßnahme 1a: Die meistbefahrene Ausweichroute (dicke rote Pfeile in der Abbildung) tangiert eine Ortschaft. Die Route ohne Ereignisfall führt durch keine Ortschaft. Dadurch steigt die innerörtliche Trennwirkung im Ereignisfall.</p> <p>Mit Maßnahme 1a: Die neue Ausweichroute führt durch keine Ortschaft.</p> <p>Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Erhöhung der innerörtlichen Trennwirkung im Ereignisfall. Im Vergleich zum Fall ohne Maßnahme reduziert sich der Funktionalitätsverlust um 100 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts
Unfallkosten	3	<p>Ohne Maßnahme 1a: Die meistbefahrene Ausweichroute ist kurvenreicher als die Route ohne Ereignisfall und führt durch eine Ortschaft. Ferner weisen Landstraßen höhere Unfallhäufigkeiten auf als Autobahnen und es werden längere Wege gefahren. Dadurch erhöht sich das Unfallrisiko und damit die Unfallkosten im Ereignisfall.</p> <p>Mit Maßnahme 1a: Die neue Ausweichroute ist in ihrer Charakteristik der Route ohne Ereignisfall ähnliche (gut ausgebaut, gerade).</p> <p>Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Erhöhung der Unfallkosten im Ereignisfall. Im Vergleich zum Fall ohne Maßnahme reduziert sich der Funktionalitätsverlust um 100 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts
Luftschadstoffe	3	<p>Ohne Maßnahme 1a: Im Ereignisfall, dass Objekt 2 vollständig ausfällt, müssen die Verkehrsteilnehmer Ausweichrouten nehmen (rote Pfeile in der Abbildung). Die Ausweichrouten sind länger, was beispielsweise zu einem höheren Treibstoffverbrauch und damit zu höheren Luftschadstoffemissionen führt.</p> <p>Mit Maßnahme 1a: Die neue Ausweichroute hat in etwa dieselbe Distanz, wie die Route ohne Ereignisfall.</p> <p>Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Erhöhung der Luftschadstoffemissionen im Ereignisfall. Im Vergleich zum Fall ohne Maßnahme reduziert sich der Funktionalitätsverlust um 100 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts
Lärmbelastung	3	<p>Ohne Maßnahme 1a: Die meistbefahrene Ausweichroute (dicke rote Pfeile in der Abbildung) tangiert eine Ortschaft. Die Route ohne Ereignisfall führt durch keine Ortschaft. Dadurch steigt die innerörtliche Trennwirkung im Ereignisfall.</p> <p>Mit Maßnahme 1a: Die neue Ausweichroute führt durch keine Ortschaft.</p> <p>Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Erhöhung der innerörtlichen Lärmbelastung im Ereignisfall. Im Vergleich zum Fall ohne Maßnahme reduziert sich der Funktionalitätsverlust um 100 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts
Beeinträchtigung durch Bauwerk	-3	<p>Ohne Maßnahme 1a: - (Maßnahme existiert nicht im Ausgangszustand)</p> <p>Mit Maßnahme 1a: Um die neue Straße zu bauen muss ein Feuchtgebiet dauerhaft trockengelegt werden. Dies entspricht einem sehr starken Eingriff in die Umwelt.</p>	-3	Die Maßnahme beeinträchtigt die Umwelt dauerhaft. Es kommt zu einem dauerhaften Funktionalitätsverlust.
Landschaftsbild	-1	<p>Ohne Maßnahme 1a: - (Maßnahme existiert nicht im Ausgangszustand)</p> <p>Mit Maßnahme 1a: Die neue Straße beeinflusst das Landschaftsbild. Da es sich um eine relative kurze Umfahrung handelt wird das Landschaftsbild nur schwach beeinträchtigt.</p>	-3	Die Maßnahme beeinträchtigt das Landschaftsbild dauerhaft. Es kommt zu einem dauerhaften Funktionalitätsverlust.

Tab. 10: Fortsetzung

Maßnahme 1b: Lange Umfahrung, 2-streifig: Kritische Objekte 1-3				
<p><b>Maßnahme 1b:</b> Lange Umfahrung (redundante Straße, Landstraße)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ortschaft</li> <li>Naturschutzgebiet (Feuchtgebiet)</li> <li>Autobahn (2-spurig)</li> <li>Landstraße (1-spurig)</li> <li>Kritische Objekte (Brücken)</li> <li>Ausfall kritisches Objekt</li> <li>Systemgrenze</li> <li>Ausweichrouten (Dicke = Stärke der Nutzung)</li> </ul>				
	$\Delta F$	Begründung	$\Delta t$	Begründung
Reisezeit	2	<p>Ohne Maßnahme 1b: Im Ereignisfall, dass Objekt 2 vollständig ausfällt, müssen die Verkehrsteilnehmer Ausweichrouten nehmen (rote Pfeile in der Abbildung). Die Ausweichrouten besitzen eine geringere zulässige Höchstgeschwindigkeit und sind länger. Dadurch steigt die Reisezeit im Ereignisfall.</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die neue Ausweichroute besitzt eine geringere zulässige Höchstgeschwindigkeit, ist aber nur unwesentlich länger als die Route ohne Ereignisfall.</p> <p>Durch die Maßnahme verkürzt sich die Reisezeit im Ereignisfall um 50 – 80 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Kapazität	1	<p>Ohne Maßnahme 1b: Die Kapazität im Netz sinkt durch den Ausfall des kritischen Objekts, da die entsprechende Straße nicht mehr befahren werden kann.</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die neue Straße erhöht zunächst einmal die Kapazität im System. Im Ereignisfall minimiert sie einen Abfall der Kapazität durch Ausfall des kritischen Objekts. Allerdings ist die Kapazität wesentlich geringer als die Kapazität auf der Route ohne Ereignisfall.</p> <p>Durch die Maßnahme kann der Abfall der Kapazität um 20 – 50 % reduziert werden.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Betriebskosten	3	<p>Ohne Maßnahme 1b: Im Ereignisfall, dass Objekt 2 vollständig ausfällt, müssen die Verkehrsteilnehmer Ausweichrouten nehmen (rote Pfeile in der Abbildung). Die Ausweichrouten sind länger, was beispielsweise zu einem höheren Treibstoffverbrauch und damit zu höheren Betriebskosten führt.</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die neue Ausweichroute ist nur unwesentlich länger als die Route ohne Ereignisfall.</p> <p>Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Erhöhung der Betriebskosten im Ereignisfall. Im Vergleich zum Fall ohne Maßnahme reduziert sich der Funktionalitätsverlust um 100 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Wertschöpfungseffekte	0	Aufgrund des Zeitraums (maximaler Ausfall zwei Monaten) und der Verfügbarkeit von Alternativrouten dürften keine Wertschöpfungseffekte aufgrund der Schließung oder Verlagerung von Produktionsstandorten auftreten. Transportzeit- und Betriebskostenveränderungen sind oben bereits erfasst.	0	Aufgrund des Zeitraums (maximaler Ausfall von zwei Monaten) und der Verfügbarkeit von Alternativrouten dürften keine Wertschöpfungseffekte aufgrund der Schließung oder Verlagerung von Produktionsstandorten auftreten. Transportzeit- und Betriebskostenveränderungen sind oben bereits erfasst.

Tab. 11: Bewertung der Resilienzwirkung der Maßnahme 1b auf die kritischen Objekte 1-3

	$\Delta F$	Begründung	$\Delta t$	Begründung
Innerörtliche Trennwirkung	-1	<p>Ohne Maßnahme 1b: Die meistbefahrene Ausweichroute (dicke rote Pfeile in der Abbildung) tangiert eine Ortschaft. Die Route ohne Ereignisfall führt durch keine Ortschaft. Dadurch steigt die innerörtliche Trennwirkung im Ereignisfall.</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die neue Ausweichroute durchschneidet eine grössere Ortschaft. Die innerörtliche Trennwirkung ist deutlich höher als auf der Ausweichroute, welche vor Umsetzung der Maßnahme verwendet wurde.</p> <p>Durch die Maßnahme steigt die innerörtliche Trennwirkung um 20 – 50 % an.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Unfallkosten	2	<p>Ohne Maßnahme 1b: Die meistbefahrene Ausweichroute ist kurvenreicher als die Route ohne Ereignisfall und führt durch eine Ortschaft. Ferner weisen Landstraßen höhere Unfallhäufigkeiten auf als Autobahnen und es werden längere Wege gefahren. Dadurch erhöht sich das Unfallrisiko und damit die Unfallkosten im Ereignisfall.</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die Ausweichroute ist gut ausgebaut, aber weniger gut ausgebaut als die Route ohne Ereignisfall. Sie besitzt zudem mehr Kreuzungen als die Route ohne Ereignisfall.</p> <p>Durch die Maßnahme können die Unfallkosten um 50 – 80 % reduziert werden.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Luftschadstoffe	3	<p>Ohne Maßnahme 1b: Im Ereignisfall, dass Objekt 2 vollständig ausfällt, müssen die Verkehrsteilnehmer Ausweichrouten nehmen (rote Pfeile in der Abbildung). Die Ausweichrouten sind länger, was beispielsweise zu einem höheren Treibstoffverbrauch und damit zu höheren Luftschadstoffemissionen führt.</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die neue Ausweichroute ist nur unwesentlich länger als die Route ohne Ereignisfall.</p> <p>Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Erhöhung der Luftschadstoffe im Ereignisfall. Im Vergleich zum Fall ohne Maßnahme reduziert sich der Funktionalitätsverlust um 100 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Lärmbelastung	-1	<p>Ohne Maßnahme 1b: Die meistbefahrene Ausweichroute (dicke rote Pfeile in der Abbildung) tangiert eine Ortschaft. Die Route ohne Ereignisfall führt durch keine Ortschaft. Dadurch steigt die innerörtliche Trennwirkung im Ereignisfall.</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die neue Ausweichroute durchschneidet eine grössere Ortschaft. Die Lärmbelastung ist deutlich höher als auf der Ausweichroute, welche vor Umsetzung der Maßnahme verwendet wurde.</p> <p>Durch die Maßnahme steigt die Lärmbelastung um 20 – 50 % an.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Beeinträchtigung durch Bauwerk	-3	<p>Ohne Maßnahme 1b: - (Maßnahme existiert nicht im Ausgangszustand)</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Um die neue Straße zu bauen muss ein Feuchtgebiet dauerhaft trockengelegt werden. Die entspricht einem sehr starken Eingriff in die Umwelt.</p>	-3	Die Maßnahme beeinträchtigt die Umwelt dauerhaft. Es kommt zu einem dauerhaften Funktionalitätsverlust.
Landschaftsbild	-3	<p>Ohne Maßnahme 1b: - (Maßnahme existiert nicht im Ausgangszustand)</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die neue Straße beeinträchtigt das Landschaftsbild stark aufgrund ihrer Länge und weil sie eine Ortschaft durchschneidet.</p>	-3	Die Maßnahme beeinträchtigt das Landschaftsbild dauerhaft. Es kommt zu einem dauerhaften Funktionalitätsverlust.

Tab. 11: Fortsetzung

Maßnahme 1b: Lange Umfahrung, 2-streifig: Kritisches Objekt 4				
		<p> <span style="color: blue;">.....</span> <b>Maßnahme 1b: Lange Umfahrung</b>              (redundante Straße, Landstraße)  <span style="color: red;">■</span> Ortschaft  <span style="color: green;">■</span> Naturschutzgebiet (Feuchtgebiet)  <span style="color: grey;">—</span> Autobahn (2-spurig)  <span style="color: grey;">—</span> Landstraße (1-spurig)  <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">○</span> Kritische Objekte (Brücken)  <span style="color: red;">●</span> Ausfall kritisches Objekt  <span style="color: yellow;">—</span> Systemgrenze  <span style="color: red;">→</span> Ausweichrouten              (Dicke = Stärke der Nutzung)         </p>		
	$\Delta F$	Begründung	$\Delta t$	Begründung
Reisezeit	0	<p>Ohne Maßnahme 1b: Im Ereignisfall, dass Objekt 2 vollständig ausfällt, müssen die Verkehrsteilnehmer Ausweichrouten nehmen (rote Pfeile in der Abbildung). Die Ausweichrouten sind länger als die Route ohne Ereignisfall. Allerdings sind diese besser ausgebaut und die erlaubten Geschwindigkeiten sind höher.</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die neue Ausweichroute ist kürzer als die anderen Ausweichrouten, allerdings sind auch die erlaubten Geschwindigkeiten geringer.</p> <p>Die Maßnahme hat keinen Einfluss auf die Reisezeit.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Kapazität	3	<p>Ohne Maßnahme 1b: Die Kapazität im Netz sinkt durch den Ausfall des kritischen Objekts, da die entsprechende Straße nicht mehr befahren werden kann.</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die neue Straße erhöht zunächst einmal die Kapazität im System. Im Ereignisfall verhindert sie einen Abfall der Kapazität durch Ausfall des kritischen Objekts (gleiche Anzahl Fahrspuren) unter das Niveau im Referenzfall (heutiger Zustand ohne Maßnahme).</p> <p>Durch die Maßnahme kommt es zu keiner Reduktion der Kapazität im Ereignisfall. Im Vergleich zum Fall ohne Maßnahme reduziert sich der Funktionalitätsverlust um 100 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Betriebskosten	1	<p>Ohne Maßnahme 1b: Im Ereignisfall, dass Objekt 2 vollständig ausfällt, müssen die Verkehrsteilnehmer Ausweichrouten nehmen (rote Pfeile in der Abbildung). Die Ausweichrouten sind länger, was beispielsweise zu einem höheren Treibstoffverbrauch und damit zu höheren Betriebskosten führt.</p> <p>Mit Maßnahme 1b: Die neue Ausweichroute ist länger als die Route ohne Ereignisfall aber kürzer als die anderen Ausweichrouten.</p> <p>Die Maßnahme reduziert die Betriebskosten um 20 – 50 %.</p>	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Wertschöpfungseffekte	0	Aufgrund des Zeitraums (maximaler Ausfall zwei Monaten) und der Verfügbarkeit von Alternativrouten dürften keine Wertschöpfungseffekte aufgrund der Schließung oder Verlagerung von Produktionsstandorten auftreten. Transportzeit- und Betriebskostenveränderungen sind oben bereits erfasst.	0	Aufgrund des Zeitraums (maximaler Ausfall von zwei Monaten) und der Verfügbarkeit von Alternativrouten dürften keine Wertschöpfungseffekte aufgrund der Schließung oder Verlagerung von Produktionsstandorten auftreten. Transportzeit- und Betriebskostenveränderungen sind oben bereits erfasst.

Tab. 12: Bewertung der Resilienz Wirkung der Maßnahme 1b auf das kritische Objekt 4

	$\Delta F$	Begründung	$\Delta t$	Begründung
Innerörtliche Trennwirkung	-2	Ohne Maßnahme 1b Die meistbefahrenen Ausweichrouten (rote Pfeile in der Abbildung) tangieren keine Ortschaft. Mit Maßnahme 1b: Die neue Ausweichroute durchschneidet eine Ortschaft. Die Maßnahme erhöht die innerörtliche Trennwirkung um 50 – 80 %.	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Unfallkosten	0	Ohne Maßnahme 1b: Auf den meistbefahrenen Ausweichrouten (rote Pfeile in der Abbildung) befinden sich mehr Kreuzungen als auf der Route ohne Ereignisfall. Abgesehen davon sind die Unfallkosten auf Ausweichroute und Route ohne Ereignisfall vergleichbar. Mit Maßnahme 1b: Auf der neuen Ausweichroute befinden sich mehr Kreuzungen als auf der Route ohne Ereignisfall. Abgesehen davon sind die Unfallkosten auf Ausweichroute und Route ohne Ereignisfall vergleichbar. Die Maßnahme hat keinen Effekt auf die Unfallkosten.	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Luftschadstoffe	1	Ohne Maßnahme 1b: Im Ereignisfall, dass Objekt 2 vollständig ausfällt, müssen die Verkehrsteilnehmer Ausweichrouten nehmen (rote Pfeile in der Abbildung). Die Ausweichrouten sind länger, was beispielsweise zu einem höheren Treibstoffverbrauch und damit zu höheren Luftschadstoffemissionen führt. Mit Maßnahme 1b: Die neue Ausweichroute ist länger als die Route ohne Ereignisfall aber kürzer als die anderen Ausweichrouten. Die Maßnahme reduziert die Luftschadstoffemissionen um 20 – 50 %.	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Lärmbelastung	-2	Ohne Maßnahme 1b: Die meistbefahrenen Ausweichrouten (rote Pfeile in der Abbildung) tangieren keine Ortschaft. Mit Maßnahme 1b: Die neue Ausweichroute durchschneidet eine Ortschaft. Die Maßnahme erhöht die innerörtliche Lärmbelastung um 50 – 80 %.	0	Kein Einfluss der Maßnahme auf die Wiederherstellungszeit des kritischen Objekts.
Beeinträchtigung durch Bauwerk		Vgl. Tabelle 11 (keine objektspezifische Beurteilung)		Vgl. Tabelle 11 (keine objektspezifische Beurteilung)
Landschaftsbild		Vgl. Tabelle 11 (keine objektspezifische Beurteilung)		Vgl. Tabelle 11 (keine objektspezifische Beurteilung)

Tab. 12: Fortsetzung

Maßnahme 2: Materialdepot im System (Behelfsbrücke): Kritische Objekte 1-10				
	$\Delta F$	<b>Begründung</b>	$\Delta t$	<b>Begründung</b>
Reisezeit	0	Die Maßnahme entfaltet ihre Wirkung in der Resilienzphase recover respektive erst nach Erreichen des Funktionalitätsminimums und hat somit keinen Einfluss auf den maximalen Funktionalitätsverlust $\Delta F$ .	2	Ohne Maßnahme 2: Die Wiederherstellungszeit der Reisezeit im Ausgangszustand entspricht der Zeit bis zur Wiederherstellung der Brücke. Diese beträgt im Anwendungsbeispiel 2 Monate. Mit Maßnahme 2: Nach Installation der Behelfsbrücke ist die Funktionalität wieder vollständig hergestellt. Der Aufbau der Behelfsbrücke dauert 2 Wochen. Die Maßnahme beschleunigt die Wiederherstellung der Reisezeit im Ausgangszustand damit um 50 – 80 %.
Kapazität	0	Die Maßnahme entfaltet ihre Wirkung in der Resilienzphase recover respektive erst nach Erreichen des Funktionalitätsminimums und hat somit keinen Einfluss auf den maximalen Funktionalitätsverlust $\Delta F$ .	2	Ohne Maßnahme 2: Die Wiederherstellungszeit der Kapazität im Netz im Ausgangszustand entspricht der Zeit bis zur Wiederherstellung der Brücke. Diese beträgt im Anwendungsbeispiel 2 Monate. Mit Maßnahme 2: Nach Installation der Behelfsbrücke ist die Funktionalität wieder vollständig hergestellt. Der Aufbau der Behelfsbrücke dauert 2 Wochen. Die Maßnahme beschleunigt die Wiederherstellung der Reisezeit im Ausgangszustand damit um 50 – 80 %.
Betriebskosten	0	Die Maßnahme entfaltet ihre Wirkung in der Resilienzphase recover respektive erst nach Erreichen des Funktionalitätsminimums und hat somit keinen Einfluss auf den maximalen Funktionalitätsverlust $\Delta F$ .	2	Ohne Maßnahme 2: Die Wiederherstellungszeit der Betriebskosten im Ausgangszustand entspricht der Zeit bis zur Wiederherstellung der Brücke. Diese beträgt im Anwendungsbeispiel 2 Monate. Mit Maßnahme 2: Nach Installation der Behelfsbrücke ist die Funktionalität wieder vollständig hergestellt. Der Aufbau der Behelfsbrücke dauert 2 Wochen. Die Maßnahme beschleunigt die Wiederherstellung der Reisezeit im Ausgangszustand damit um 50 – 80 %.
Wertschöpfungseffekte	0	Aufgrund des Zeitraums (maximaler Ausfall zwei Monaten) und der Verfügbarkeit von Alternativrouten dürften keine Wertschöpfungseffekte aufgrund der Schliessung oder Verlagerung von Produktionsstandorten auftreten. Transportzeit- und Betriebskostenveränderungen sind oben bereits erfasst.	0	Aufgrund des Zeitraums (maximaler Ausfall von zwei Monaten) und der Verfügbarkeit von Alternativrouten dürften keine Wertschöpfungseffekte aufgrund der Schliessung oder Verlagerung von Produktionsstandorten auftreten. Transportzeit- und Betriebskostenveränderungen sind oben bereits erfasst.

Tab. 13: Bewertung der Resilienzwirkung der Maßnahme 2a auf das kritische Objekt 2

	$\Delta F$	Begründung	$\Delta t$	Begründung
Innerörtliche Trennwirkung	0	Die Maßnahme entfaltet ihre Wirkung in der Resilienzphase recover respektive erst nach Erreichen des Funktionalitätsminimums und hat somit keinen Einfluss auf den maximalen Funktionalitätsverlust $\Delta F$ .	2	Ohne Maßnahme 2: Die Wiederherstellungszeit der innerörtlichen Trennwirkung im Ausgangszustand entspricht der Zeit bis zur Wiederherstellung der Brücke. Diese beträgt im Anwendungsbeispiel 2 Monate. Mit Maßnahme 2: Nach Installation der Behelfsbrücke ist die Funktionalität wieder vollständig hergestellt. Der Aufbau der Behelfsbrücke dauert 2 Wochen. Die Maßnahme beschleunigt die Wiederherstellung der Reisezeit im Ausgangszustand damit um 50 – 80 %.
Unfallkosten	0	Die Maßnahme entfaltet ihre Wirkung in der Resilienzphase recover respektive erst nach Erreichen des Funktionalitätsminimums und hat somit keinen Einfluss auf den maximalen Funktionalitätsverlust $\Delta F$ .	2	Ohne Maßnahme 2: Die Wiederherstellungszeit der Unfallkosten im Ausgangszustand entspricht der Zeit bis zur Wiederherstellung der Brücke. Diese beträgt im Anwendungsbeispiel 2 Monate. Mit Maßnahme 2: Nach Installation der Behelfsbrücke ist die Funktionalität wieder vollständig hergestellt. Der Aufbau der Behelfsbrücke dauert 2 Wochen. Die Maßnahme beschleunigt die Wiederherstellung der Reisezeit im Ausgangszustand damit um 50 – 80 %.
Luftschadstoffe	0	Die Maßnahme entfaltet ihre Wirkung in der Resilienzphase recover respektive erst nach Erreichen des Funktionalitätsminimums und hat somit keinen Einfluss auf den maximalen Funktionalitätsverlust $\Delta F$ .	2	Ohne Maßnahme 2: Die Wiederherstellungszeit der Luftschadstoffemissionen im Ausgangszustand entspricht der Zeit bis zur Wiederherstellung der Brücke. Diese beträgt im Anwendungsbeispiel 2 Monate. Mit Maßnahme 2: Nach Installation der Behelfsbrücke ist die Funktionalität wieder vollständig hergestellt. Der Aufbau der Behelfsbrücke dauert 2 Wochen. Die Maßnahme beschleunigt die Wiederherstellung der Reisezeit im Ausgangszustand damit um 50 – 80 %.
Lärmbelastung	0	Die Maßnahme entfaltet ihre Wirkung in der Resilienzphase recover respektive erst nach Erreichen des Funktionalitätsminimums und hat somit keinen Einfluss auf den maximalen Funktionalitätsverlust $\Delta F$ .	2	Ohne Maßnahme 2: Die Wiederherstellungszeit der Lärmbelastung im Ausgangszustand entspricht der Zeit bis zur Wiederherstellung der Brücke. Diese beträgt im Anwendungsbeispiel 2 Monate. Mit Maßnahme 2: Nach Installation der Behelfsbrücke ist die Funktionalität wieder vollständig hergestellt. Der Aufbau der Behelfsbrücke dauert 2 Wochen. Die Maßnahme beschleunigt die Wiederherstellung der Reisezeit im Ausgangszustand damit um 50 – 80 %.
Beeinträchtigung durch Bauwerk	0	Die Maßnahme beeinträchtigt die Umwelt nur geringfügig (< 20 %).	-3	Die Maßnahme beeinträchtigt die Umwelt dauerhaft. Es kommt zu einem dauerhaften Funktionalitätsverlust.
Landschaftsbild	0	Die Maßnahme beeinflusst das Landschaftsbild nur geringfügig (< 20 %).	-3	Die Maßnahme beeinträchtigt die Umwelt dauerhaft. Es kommt zu einem dauerhaften Funktionalitätsverlust.

Tab. 13: Fortsetzung

Maßnahme		Resilienzwirkung
Maßnahme 1a	Kurze Umfahrung (redundante Straße, Autobahn)	2.02
Maßnahme 1b	Lange Umfahrung (redundante Straße, Landstraße)	4.04
Maßnahme 2	Materialdepot im System (Behelfsbrücke)	9.61

Tab. 14: Resilienzwirkung der Maßnahmen auf das definierte System

## 6.5 Resilienzoptimierung

### 6.5.1 Erfassung der Maßnahmenkosten

Für die untersuchten Maßnahmen werden die in Tabelle 15 dargestellten Investitions-, Unterhalts- und Betriebskosten angenommen. Diese werden unter Berücksichtigung der Lebensdauer und eines Zinssatzes von 1,7 % in die jährlichen Gesamtkosten umgerechnet.

### 6.5.2 Priorisierung der Resilienzmaßnahmen

Aus der Resilienzwirkung und den jährlichen Gesamtkosten wird das Kostenwirksamkeits-Verhältnis der Maßnahme berechnet. Unter Berücksichtigung von Realisierungswahrscheinlichkeit und -horizont wird dann eine Rangfolge abgeleitet. Soll anstelle einer einzelnen Maßnahme eine Maßnahmenkombination umgesetzt werden, so müssen Redundanzen zwischen den Maßnahmen berücksichtigt werden. So schließen sich beispielsweise die Maßnamenvariante 1a und 1b gegenseitig aus.

Als Resultat aus der Anwendung der Methodik werden dem Entscheidungsträger somit vier unabhängige Kenngrößen zur Verfügung gestellt. Diese kann er nach eigenem Ermessen gewichten und eine nach seinen Bedürfnissen priorisierte Rangliste der verglichenen Maßnahmen erstellen.

## 7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

### 7.1 Schlussfolgerungen

Resilienz ist ein in der heutigen Zeit vielzitatierter Begriff. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich allerdings, dass sich die Aktualität dieses Begriffs in erster Linie auf wissenschaftliche Studien bezieht, während man in den Kreisen der potenziellen Anwender (z. B. Verkehrsbehörden der Bundesländer, Verkehrsleitzentralen) dem Begriff der Resilienz bisher nur sehr selten begegnet. Dies bedeutet nicht, dass diese Anwendergruppen in ihrer täglichen Arbeit keine Aspekte der Resilienz berücksichtigen. Vielmehr werden bereits heute viele Maßnahmen, Verfahren und Managementansätze im Sinne der Resilienz diskutiert und umgesetzt. Neu ist in diesem Zusammenhang das Streben nach einem übergeordneten, systemischen Mehrwert durch eine effiziente, resilienzbewusste Entscheidungsfindung. Dies, indem bestehende Maßnahmen und Ansätze unter Berücksichtigung sämtlicher Interessensgruppen unter einen gemeinsamen konzeptionellen Mantel eines konsistenten Resilienzmanagements gebracht werden. Durch die konzeptionellen und methodischen Lösungen dieses Forschungsprojekts soll eine Brücke zwischen dem wissenschaftlich sehr etablierten Stand der Forschung zur

Maßnahmenkosten	Maßnahme 1a	Maßnahme 1b	Maßnahme 2a
Investitionskosten [EUR]:	50.000.000	75.000.000	15.000.000
Unterhaltskosten [EUR/a]:	250.000	375.000	100.000
Betriebskosten [EUR/a]:	150.000	120.000	-
Lebensdauer [a]:	100	100	30
Jährliche Gesamtkosten [EUR/a]:	1,44 Mio.	2,06 Mio.	0,74 Mio.

Tab. 15: Berechnung der jährlichen Gesamtkosten unter Berücksichtigung der Investitionskosten, der jährlichen Unterhalts- und Betriebskosten, der Lebensdauer und eines Zinssatzes von 1,7 %

Maßnahme		Resilienz- wirkung	Kostenwirksamkeit [Wirkung/Mio. EUR]	Realisierungs- horizont [a]	Realisierungs- wahrscheinlichkeit	Rang
Maßnahme 1a	Kurze Umfahrung (redundante Straße, Autobahn)	2.02	1,40	10	0.5	2.
Maßnahme 1b	Lange Umfahrung (redundante Straße, Landstraße)	4.04	1,96	15	0.2	3.
Maßnahme 2	Materialdepot im System (Behelfsbrücke)	9.61	12,94	5	0.8	1.

Tab. 16: Vier Kenngrößen als Resultat aus der Anwendung der Methodik: Resilienzwirkung, Kostenwirksamkeitsverhältnis der Maßnahmen sowie Realisierungshorizont und -wahrscheinlichkeit. Auf Grundlage dieser vier Kriterien kann der Anwender eine Rangliste erstellen

technischen und ingenieurmäßigen Resilienzbeurteilung im anwendungsorientierten Alltag der Infrastrukturmanager geschlagen. Die entwickelte Methodik dient Entscheidungsträgern im Straßeninfrastrukturmanagement als Grundlage und Hilfestellung bei der Maßnahmenfindung und Maßnahmenpriorisierung zur Erhöhung der Systemresilienz.

Die Anwendung der Methodik des Resilienzmanagements erlaubt es erstmals sehr unterschiedliche Arten von Maßnahmen miteinander zu vergleichen und ihre Wirkungen und Kosten hinsichtlich Resilienz einander vergleichend gegenüberzustellen. Es ist festzuhalten, dass die Bewertung allein aus Resilienz­sicht erfolgt. Ist als Maßnahme beispielsweise ein neues Straßenbauprojekt vorgesehen, dann ist zu beachten, dass mittels der hier entwickelten Methodik keine vollständige Bewertung eines einzelnen Straßenbauprojekts über die gesamte Nutzungsdauer erfolgt. Die Methodik dient lediglich der Findung und Beurteilung der Resilienz­wirkung potenzieller Resilienzmaßnahmen – unabhängig von klassischen Bewertungsverfahren wie beispielsweise nach Bundesverkehrswegeplan 2030. Umgekehrt gilt, dass bis heute die Resilienz eines Straßennetzes kein Aspekt bei den etablierten und standardisierten Bewertungsverfahren von Straßen ist.

Die Prioritäten die sich aus der Anwendung der Methodik ergeben dienen dazu, erfolgversprechende Maßnahmen den weiteren konkreten Maßnahmenplanungen mit den jeweils klassischen Verfahren zur Überprüfung der Machbarkeit und Gutachten der Verträglichkeit zuzuführen, respektive laufende Planungen mit den Ergebnissen zur Resilienz zu ergänzen. Die im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelte Methodik ist somit als Grundlage zu verstehen, um überhaupt erst einmal Hinweise zu erhalten, in welche Richtung aus Sicht der Resilienz der Handlungsbedarf für ein System gehen könnte.

Die Anwender der Methodik sind Personen aus den Verkehrsbehörden der Bundesländer mit strategischer und konzeptioneller Managementfunktion sowie Entscheidungskompetenz. Für die Umsetzung des in dieser Forschungsarbeit skizzierten Resilienzmanagement-Prozesses wird die Einrichtung einer verantwortlichen Person (Resilienzmanager) empfohlen. Dieser koordiniert die Abläufe im Prozess, stellt den Einbezug der erforderlichen Stakeholder sicher und sorgt für eine intensive Abstimmung

mit den verschiedenen Fachbereichen innerhalb der Behörde. Eine direkte Koordination mit Interessensvertretern aus Politik und Organisationen außerhalb der Behörde ist für ein möglichst effizientes Vorgehen zur Maßnahmenfindung zwingend.

### Vorteile der entwickelten Methode

- Sinnvolle Hilfestellung  
Der skizzierte Resilienzmanagement-Prozess dient dem Anwender als hilfreiche und pragmatische Orientierung und Hilfestellung, um Aussagen zur Resilienz seines Systems treffen zu können und – darauf aufbauend – geeignete Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz identifizieren, priorisieren und in den Planungsprozess einfließen lassen zu können.
- Anwenderfreundliches Konzept  
Die schematische Darstellung liefert eine Art Vorgehensanleitung für ein im Alltag des Anwenders integrierbares Resilienzmanagement und definiert den konzeptionellen und prozessorientierten Ablauf bei der Durchführung. Einzelne Elemente des Resilienzmanagementprozesses können herausgelöst bearbeitet werden. Bestehende Erkenntnisse und Ergebnisse aus vorher durchgeführten Untersuchungen können einfach integriert und berücksichtigt werden.
- Integration bestehender Ansätze  
Die Konzeption des Resilienzmanagement-Prozesses berücksichtigt, dass in der Praxis bereits zahlreiche Ansätze verfolgt werden, die zwar nicht unter dem Begriff Resilienzmanagement geführt werden, aber durchaus punktuell in das Konzept integrierbar sind. Durch die Methodik werden bestehende Maßnahmen, Verfahren und Ansätze in einen übergeordneten Rahmen gefasst.
- Skalierbarkeit des Komplexitätsgrades  
Für das aktuelle Forschungsprojekt wurde bewusst eine möglichst anwendungsorientierte, pragmatische Methodik zur Umsetzung des Resilienzmanagement-Prozesses gewählt. Die Resilienzkurve zur Repräsentation der Systemfunktionalitäten wurde für eine pragmatische Abschätzung der Maßnahmenwirkung zu einer Dreiecksfunktion vereinfacht. Allerdings wurde die Methodik umfänglich so konzipiert, dass die Bearbeitung der einzelnen Elemente in ihrer

Komplexität skalierbar ist. Das heißt, dass bei ausreichendem Mittel- und Zeitbudget vom pragmatischen Ansatz abgewichen und anhand von Modellen und Studien auch eine komplexere Abschätzung der Resilienzfunktion erfolgen kann.

- **Software Tool vereinfacht Umsetzung**  
Die Entwicklung eines Software-Tools zur Durchführung der Methodik des Resilienzscreenings, der Maßnahmenbeurteilung und Maßnahmenpriorisierung ermöglicht für den Nutzer einen intuitiven und haptischen Zugang zum theoretisch-abstrakten Sachverhalt des Resilienzmanagements. Es sorgt für Verständnis von Resilienz im Allgemeinen und dadurch für eine entscheidende Akzeptanzgrundlage bei der Implementierung der methodischen Vorgehensschritte der genannten Elemente des Resilienzmanagements im Alltag des Infrastrukturmanagers.
- **Anwendbarkeit bestätigt**  
In einem Proof-of-Concept-Workshop wurde die grundsätzliche praktische Anwendbarkeit der entwickelten Methodik unter Verwendung des Software-Tools getestet und bestätigt.
- **Berücksichtigung und Übertragbarkeit auf alle Verkehrsträger**  
Für ein gesamtheitliches Resilienzmanagement von Verkehrsinfrastrukturen ist der Einbezug von Experten weiterer Verkehrsträger (Verfügbarkeit alternativer Verkehrsträger wie Bahn oder Schifffahrt im Ereignisfall) wichtig. Auch im Betreuerkreis waren Experten aus dem Bahn- und Schifffahrtsbereich vertreten. So konnte die Übertragbarkeit des konzeptionellen Lösungsansatzes auf andere Verkehrsträger sichergestellt werden. Dadurch wird eine nahtlose Einbettung des Projekts in das Expertennetz des BMVI ermöglicht.

## 7.2 Empfehlungen und Ausblick

In dieser Forschungsarbeit ergeben sich zwei unterschiedliche Arten von Empfehlungen: Die einen beziehen sich auf die Implementierung der erarbeiteten Methode in der Praxis. Die anderen auf weiteren Forschungsbedarf.

### 7.2.1 Implementierung der entwickelten Methodik

Beim Experten-Workshop zum Proof-of-Concept wurde die Konzeption des Resilienzmanagement-Prozesses und die methodische Umsetzung mit Unterstützung eines IT-Tools als wichtiger und erfolgreicher erster Schritt gewürdigt. Dies bedeutet aber auch, dass in einem zweiten Schritt das Proof-of-Concept vertieft werden muss. Dabei stehen folgende Fragestellungen im Vordergrund:

- Wer sind die tatsächlichen Endnutzer der Methodik? Identifikation und Einbezug der Anwender.
- Was ist deren Bedürfnislage und wird überhaupt ein Mehrwert durch die Einführung eines Resilienzmanagements gesehen? Umsetzung der Methodik anhand eines realen Fallbeispiels mit First Usern zur Sicherstellung der Anwendbarkeit und Akzeptanz.
- Was sind die wesentlichen Anforderungen an ein Software-Tool, damit es im praktischen Alltag anwendbar ist? Vom Prototyp zum Produkt.
- Was sind die wesentlichen Implementierungsschritte der Methodik? Wie lässt sich die Methodik in die Arbeitsumgebung des Anwenders integrieren (zum Beispiel im Rahmen des Gefäßes eines Anwenderdialogs der BAST)?
- Wie können die Nutzer für die praktische Anwendung der Methodik vorbereitet und geschult werden? Entwicklung eines Implementierungskonzepts (Schulungen, E-Learning Module, Anwendungs-Coaching).
- Wie lässt sich das Resilienzmanagement mit bereits etablierten und standardisierten Bewertungsverfahren verknüpfen? Prüfung einer Ergänzung solcher Bewertungsverfahren mit Zielgrößen aus dem Resilienzmanagement.

Wir empfehlen der BAST, die konkrete Bedürfnislage mit den Straßenbauverwaltungen der Länder (respektive den regional Zuständigen in der Nachfolgeorganisation des Bundes) zu ermitteln. Dazu kann in einem ersten Schritt eine Roadshow dienen, auf der den Zuständigen die Erkenntnisse und Tools nahegebracht werden. Ziel der Roadshow ist es, einen Zuständigen als First-User zu begeistern, mit dem weitere Entwicklungsschritte in Angriff genommen werden.

## 7.2.2 Forschungsbedarf

Das vorliegende Forschungsprojekt gliedert sich in die mittelfristigen Forschungsziele der BAST (Forschungslinie 1.03) ein und die Resilienz von Straßeninfrastrukturen stellt somit ein wichtiges Schwerpunktthema der BAST dar. Bei der Projektbearbeitung wurde sichergestellt, dass die zu diesem Schwerpunktthema durchgeführten Forschungsarbeiten eng miteinander verknüpft sind und sinnvoll aufeinander aufbauen. Das Vorgehen und die Methodik der vorliegenden Forschungsarbeit stützen sich auf die Erkenntnisse des Vorgänger-Forschungsprojekts FE 89.320/2016 und erweitern diese durch eine Einbettung in den Kontext eines gesamtheitlichen Resilienzmanagements. Die im Vorgängerprojekt erarbeiteten Definitionen von Resilienz und Resilienzmaßnahmen sowie die methodischen Ansätze zur Beurteilung von Resilienz und Bewertung von Maßnahmen bilden wichtige Grundlagen den hier weitergeführten Lösungsansätzen. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass der hier beschriebene Lösungsansatz mit den Erkenntnissen aus dem Forschungsvorhaben FE 15.0627/2016/ARB [21] kompatibel ist.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der vorliegenden Forschungsarbeit sowie der Erkenntnisse aus bereits durchgeführten Forschungsarbeiten auf nationaler/europäischer/weltweiter Ebene sowie des Inputs durch den Austausch im Rahmen des BMVI Expertennetzwerks leitet sich der folgende Ausblick und Forschungsbedarf ab:

- Aus dem vorliegenden Forschungsprojekt resultiert ein konzeptioneller Vorschlag für ein ganzheitliches Resilienzmanagement. Die hierzu entwickelnden methodischen Ansätze zur praktischen Umsetzung richten sich aufgrund der Abgrenzung des Projekts ausschließlich auf jene Prozesselemente des Resilienzmanagements, die für eine Beurteilung der Resilienz sowie die Identifikation und Priorisierung von Maßnahmen entscheidend sind.

→ Forschungsbedarf besteht in einer Erweiterung der methodischen Anwendungshilfen, um auch die restlichen Elemente des Resilienzmanagement-Prozesses (z. B. Netscreening, Gefährdungsanalyse) für den Nutzer praxisnah aufzubereiten. Die wissenschaftlichen Grundlagen liegen aus zahlreichen – auch durch die BAST mitbegleiteten – Forschungsarbeiten vor; es fehlt allerdings noch eine Art Handlungsanlei-

tung, um die Erkenntnisse für die praktische Anwendung nutzbar zu machen. Idealerweise erhält der Nutzer in Zukunft eine durch ein Software-Tool gestützte Methodik, in der sämtliche Schritte des Resilienzmanagement-Prozesses abgebildet und für eine einfache Implementierung im praktischen Alltag aufbereitet sind.

- Resilienzmaßnahmen lassen sich in verschiedene Maßnahmentypen unterteilen. Den technischen und planerisch/organisatorischen Maßnahmen auf Objektebene stehen ebenfalls technische und insbesondere planerisch/organisatorische Maßnahmen auf Netzebene gegenüber. Zusätzlich lassen sich die Maßnahmentypen in die fünf verschiedenen Phasen des Resilienzzyklus differenzieren – je nach Zeitpunkt ihrer Wirkungsentfaltung. Im Rahmen der strategischen Entscheidungsfindung für ein sinnvolles Portfolio an Maßnahmen zur Erhöhung der Systemresilienz kann die Zuordnung zu einer der Phasen des Resilienzzyklus einen entscheidenden Einfluss haben. Bei den Untersuchungen im vorliegenden Forschungsprojekt liegt der Fokus auf der Identifikation und Priorisierung von Resilienzmaßnahmen auf jenen Maßnahmen, die ihre Wirkung in den Resilienzphasen *respond* und *recover* entfalten. Durch diese Abgrenzung des Forschungsprojekts werden in der Methodik des Resilienzscreenings, der Maßnahmenbeurteilung und der Maßnahmenpriorisierung keine Maßnahmenfelder berücksichtigt, die ihre Wirkung in den übrigen Resilienzphasen entfalten (*prepare*, *prevent*, *protect*). Dies führt dazu, dass auch im Rahmen der Methodenentwicklung ausschließlich Aspekte der Resilienzoptimierung bearbeitet werden, die dieser Projektabgrenzung entsprechen. Somit wird die Bandbreite von Kriterien zur Ermittlung der bestehenden Resilienz im Zuge des Resilienzscreenings (Kapitel 4.2) sowie die Auswahl möglicher Maßnahmenfelder zur Erhöhung der Resilienz (Kapitel 4.2.5) entscheidend eingeschränkt.

→ Forschungsbedarf besteht in einer Erweiterung der Methodik auf die übrigen Phasen des Resilienzzyklus.

- Der Fokus der vorliegenden Untersuchung richtet sich auf Straßeninfrastrukturen. Jedoch kann beispielsweise eine Resilienzmaßnahme darin bestehen, für wichtige Verbindungsachsen im Straßennetzwerk für den Ereignisfall (Ausfall aufgrund eines disruptiven Ereignisses) die Ge-

währleistung der Mobilität durch die Verfügbarkeit alternativer Verkehrsträger einzuplanen. Die Methodik des Resilienzscreening und der Maßnahmenbeurteilung des vorliegenden Forschungsprojekts ist bereits so konzipiert, dass eine Übertragung auf und Einbindung von alternativen Verkehrsträgern theoretisch möglich ist. Im durchgeführten Fallbeispiel wurde diese Schnittstelle zugunsten einer Vereinfachung des betrachteten Systems jedoch noch nicht getestet.

→ Forschungsbedarf besteht in der Erweiterung und Anwendung der Methodik unter gleichzeitiger Berücksichtigung von alternativen Verkehrsträgern (z. B. im Rahmen des BMVI Expertennetzwerks).

- Bei der Analyse der Resilienz von Straßeninfrastrukturen stehen als besonders kritische Systemelemente Brücken und Tunnel im Fokus der Untersuchungen. Disruptive Ereignisse mit einer Einwirkung auf diese Objekte führen in der Regel zu besonders weitreichenden Konsequenzen in der Systemfunktionalität auf Netzebene. Aus diesem Grund wurde bei der Konzeption, Umsetzung und exemplarischen Anwendung der entwickelnden Methodik eine Ausrichtung auf Brücken und Tunnel vollzogen.

→ Forschungsbedarf besteht in der Berücksichtigung aller Elemente der Straßeninfrastruktur und somit beispielsweise auch offene Streckenabschnitte oder Kreuzungsbereiche, die beim Prozessschritt des Netscreening als kritisch eingestuft werden können (z. B. Autobahnkreuze oder Straßen mit hohen Risiken hinsichtlich Naturgefahren). Dies ohne Beschränkung auf einen bestimmten Straßentypus. Typische Anwendungssperimeter wären beispielsweise das Bundesfernstraßennetz oder aber das Straßennetz einer bestimmten Stadt.

- Das vorliegende Forschungsvorhaben bettet sich zudem in die Zielsetzungen des BMVI Expertennetzwerks ein, das Lösungsansätze für Verkehrsfragen der Zukunft durch Innovationen in den Bereichen Klimaanpassung, Umweltschutz und Risikomanagement anstrebt.

→ Forschungsbedarf besteht in einer konsequenten Weiterverfolgung der Ziele und Mehrwerte aus dem Austausch im Rahmen des BMVI Expertennetzwerks, insbesondere im Themenfeld 3 «Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur

erhöhen». Durch weitere konkrete Beiträge im Rahmen des BMVI Expertennetzwerks wird zum Erfolg dieser Vernetzung beigetragen und die Stellung der BAST als innovative Forschungseinrichtung im nationalen Verbund und im BMVI unterstrichen.

## Literatur

- [1] ANASTASSIADOU, K.; KAMMERER, H.; KAUNDINYA, I.; MITSAKIS, E. & STAMOS, I. (2016): RAINEX, Risk-Based Approach for the Protection of Land Transport Infrastructure against Extreme Rainfall – Handbook
- [2] ANASTASSIADOU, K.; STAMOS, I.; MITSAKIS, E. & KAMMERER, H. (2016): RAINEX, Risk-Based Approach for the Protection of Land Transport Infrastructure against Extreme Rainfall, Work Package 5 Report – Demonstration of the RAINEX methodology and Handbook
- [3] ANASTASSIADOU, K.; STAMOS, I.; MITSAKIS, E. & KAMMERER, H. (2016): RAINEX, Risk-Based Approach for the Protection of Land Transport Infrastructure against Extreme Rainfall, Work Package 2 Report – Natural Hazards Related Scenarios.
- [4] ANASTASSIADOU, K.; STAMOS, I.; MITSAKIS, E.; KAMMERER, H. & MIKOVEC, R. (2016): RAINEX: Risk-Based Approach for the Protection of Land Transport Infrastructure against Extreme Rainfall, Work Package 1 Report – State of the Art and Data Input
- [5] 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
- [6] Bundesministerium des Innern, BMI (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)
- [7] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030

- [8] CLARKE, J.; COAFFEE, J.; ROWLANDS, R.; FINGER, J.; HASENSTEIN, S. & SIEBOLD, U. (2015): EU Research Project RESILENS, D1.1: Resilience Evaluation and SOTA Summary Report
- [9] COCONEA, L.; DELOUKAS, A.; APOSTOLOPOULOU, E.; CIGHERI, S.; CANDELIERI, A.; ZAMICHOS, A.; ... LEUTERITZ, J. P. (2018): European Resilience Management Guidelines
- [10] 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)
- [11] DALKEY, N. (1969): An experimental study of group opinion: the Delphi method. *Futures*, 1(5), 408-426
- [12] DALKEY, N. & HELMER, O. (1963): An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science*, 9(3), 458-467
- [13] DEUBLEIN, M.; BRUNS F.; ROTH, F. & ZULAUF, C. (2017): Stand der Technik hinsichtlich der Bewertung von Resilienzmaßnahmen, BAST-Forschungsbericht FE 89.0320/2016
- [14] Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit, GIZ (2014): Assessing and Monitoring Climate Resilience – From Theoretical Considerations to Practically Applicable Tools – A Discussion Paper
- [15] EU Research Project AllTrain (2015): All-Hazard Guide für Transportinfrastrukturen, <http://www.alltrain-project.eu/>
- [16] EU Research Project RESILENS (2015): D2.2: Qualitative, Semi-Quantitative and Quantitative Methods and Measures for Resilience Assessment and Enhancement Report and Templates
- [17] EU Research Project RESILENS (2016): D2.3: Resilience Management Matrix and Audit Toolkit. ReMMAT
- [18] EU Research Project RESILENS (2016): D3.1: Development of the Methodological Framework of the European Resilience Management Guidance (ERMG)
- [19] FAHRMEIR, L.; HEUMANN, C.; KÜNSTLER, R.; PIGEOT, I. & TUTZ, G. (2016): Statistik: Der Weg zur Datenanalyse. Springer-Verlag
- [20] FLETCHER, D. R. & EKERN, D. S. (2018): Understanding transportation resilience: A 2016-2018 roadmap”, vol. 59
- [21] Fraunhofer EMI (2018) (unveröffentlicht): FE 15.0627/2016/ARB: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen, 2. Entwurf Schlussbericht
- [22] 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
- [23] HAARDT, J. & KAMMERER, H. (2013): SECMAN – Security Manual for European Road Infrastructure
- [24] HERZOG, M. & ROTH, F. (2013): Dritter Trilateraler Workshop D-A-CH – Schutz Kritischer Infrastrukturen, CSS Tagungsbericht
- [25] HUGHES, J. & HEALY, K (2014): Measuring the resilience of transport infrastructure – NZ Transport Agency research report 546
- [26] 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
- [27] Joint Committee of Structural Safety, JCSS (2010): Risk Assessment in Engineering
- [28] LINSTONE, H. A. & TUROFF, M. (Eds.) (1975): The delphi method (pp. 3-12). Reading, MA: Addison-Wesley
- [29] POSNER, R. A. (2004): Catastrophe: risk and response. Oxford University Press
- [30] RAFAELI, G.; ABBOTT, P.; SHAZAR, Y. & CHERPAK, E. (2016): EU Research Project RESILENS, D3.2: Draft ERMG Report and Templates

- [31] Schweizerisches Bundesamt für Straßen  
ASTRA (2014): ASTRA 19003: Management  
von Naturgefahren auf den Nationalstrassen
- [32] Schweizerisches Bundesamt für Bevölke-  
rungsschutz, BABS (2013): Katalog Möglicher  
Gefährdungen – Grundlage für Gefährdungs-  
analysen
- [33] Schweizerisches Bundesamt für Straßen, AS-  
TRA (2012): Naturgefahren auf den National-  
strassen: Risikokonzept
- [34] Schweizerisches Bundesamt für Strassen,  
ASTRA (2012): Nationale Strategie zum  
Schutz kritischer Infrastrukturen
- [35] THOMA, K. (2014): 'Resilience-by-Design':  
Strategie für die technologischen Zukunfts-  
themen, acatech STUDIE
- [36] ULBRICH, J.; DÜNSER, C.; ZULAUF, C.;  
KAUNDINYA, I. & HOLTHAUSEN, N. (2012):  
SeRoN – Security of Road Transport  
Networks, Deliverable 400: Importance of the  
structures for the traffic network, 2012
- [37] Verbundprojekt SKRIBT. Schutz kritischer  
Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen,  
Schlussbericht: Schutz kritischer Brücken und  
Tunnel, öffentliche Fassung
- [38] Verbundprojekt SKRIBT. Schutz kritischer  
Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen,  
Anhang 1: Schutzmaßnahmen Brücken, zum  
Bericht: Schlussbericht: Schutz kritischer Brü-  
cken und Tunnel.
- [39] Verbundprojekt SKRIBT. Schutz kritischer  
Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen,  
Anhang 2: Schutzmaßnahmen Tunnel, zum  
Bericht: Schlussbericht: Schutz kritischer Brü-  
cken und Tunnel.
- [40] ZHANG, W. & WANG, N. (2016): Resilience-  
based risk mitigation for road networks.  
*Structural Safety*, 62, 57-65

## Weiterführende Literatur

- ABIE, H.; SAVOLA, R. & DATTANI, I. (2009):  
Robust, Secure, Self-Adaptive and Resilient  
Messaging Middleware for Business Critical  
Systems. In 2009 Computation World: Future  
Computing, Service Computation, Cognitive,  
Adaptive, Content, Patterns Robust
- 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
- AMOANING-YANKSON, S. & AMEKUDZI-  
KENNEDY, A. (2017): Transportation System  
Resilience. *Transportation Research Record:  
Journal of the Transportation Research Board*,  
2604, 28–36
- ANASTASSIADOU, K.; KAMMERER, H.;  
KAUNDINYA, I.; MITSAKIS, E. & STAMOS, I.  
(2016): RAINEX, Risk-Based Approach for the  
Protection of Land Transport Infrastructure  
against Extreme Rainfall – Handbook
- ANASTASSIADOU, K.; STAMOS, I.; MITSAKIS, E.  
& KAMMERER, H. (2016): RAINEX, Risk-  
Based Approach for the Protection of Land  
Transport Infrastructure against Extreme  
Rainfall, Work Package 5 Report –  
Demonstration of the RAINEX methodology and  
Handbook
- ANASTASSIADOU, K.; STAMOS, I.; MITSAKIS, E.  
& KAMMERER, H. (2016): RAINEX, Risk-  
Based Approach for the Protection of Land  
Transport Infrastructure against Extreme  
Rainfall, Work Package 2 Report – Natural  
Hazards Related Scenarios
- ANASTASSIADOU, K.; STAMOS, I.; MITSAKIS,  
E.; KAMMERER, H. & MIKOVEC, R. (2016):  
RAINEX: Risk-Based Approach for the  
Protection of Land Transport Infrastructure  
against Extreme Rainfall, Work Package 1  
Report – State of the Art and Data Input
- AVEN, T. (2011): On Some Recent Definitions and  
Analysis Frameworks for Risk, Vulnerability,  
and Resilience. *Risk Analysis*, 31(4), 515–522
- AXHAUSEN, K. W.; EHREKE, I.; GLEMSER, A.;  
HESS, S.; JÖDDEN, C.; NAGEL, K.; ... WEIS,

- C. (2015): Schlussbericht: FE-Projekt-Nr. 96.996/2011. Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung
- BRABHAHARAN, P. (2006): Recent advances in improving the resilience of road networks. In 2006 New Zealand Society of Earthquake Engineering (NZSEE) Conference
- BRISTOW, A. & NELLTHORP, J. (2000): Transport project appraisal in the European Union. Transport Policy (Vol. 7)
- BRÜMMERHOFF, D. (2011): Finanzwissenschaft (10. Auflage). München: Oldenbourg
- 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
- BRUNS, F.; LOHER, P.; MÜLLER, R.; RUGGLI, P. & WILLI, C. (2012): Erhöhung der Winter- und Sommersicherheit Föglias-Plaun da Lej. Zürich, Schweiz: EBP Schweiz AG
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, BBK (2015): Ereignismanagement für Straßentunnel: Empfehlungen für Betriebs- und Einsatzdienste
- Bundesinstitut für Bauwesen und Raumordnung, BBSR (2018), TraViMo, Transportstrom-Visualisierungs-Modell, <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumentwicklung/Verkehrspolitik/Projekte/TraViMo/TraViMo.html?nn=1034418>
- Bundesministerium des Innern, BMI (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI (2015): Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI (2006): Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030
- BUTH, M.; KAHLENBORN, W.; SAVELSBERG, J.; BECKER, N.; BUBECK, P.; KABISCH, S.; KOFER, C. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel
- CAPTA (2016): Costing Asset Protection, An All Hazards Guide for Transportation Agencies (CAPTA) | National Operations Center of Excellence. NCHRP Report 525 Vol 15. Retrieved from
- CERWENKA, P. (2007): Handbuch der Verkehrsplanung. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag
- CLARKE, J.; COAFFEE, J.; ROWLANDS, R.; FINGER, J.; HASENSTEIN, S. & SIEBOLD, U. (2015): EU Research Project RESILENS, D1.1: Resilience Evaluation and SOTA Summary Report
- CLAVIN, C.; PETROPOULOS, Z.; ... N. G.-G. R. & 2017, undefined. (n.d.): Case Studies of Community Resilience and Disaster Recovery from the 2013 Boulder County Floods
- COAFFEE, J. (2013): Rescaling and responsabilising the politics of urban resilience: From national security to local place-making
- COAFFEE, J.; WOOD, D.; ROGERS, P. & WOOD, D. (2008): The Everyday Resilience of the City: how cities respond to terrorism and disaster
- COCONEA, L.; DELOUKAS, A.; APOSTOLOPOULOU, E.; CIGHERI, S.; CANDELIERI, A.; ZAMICHOS, A.; LEUTERITZ, J. P. (2018): European Resilience Management Guidelines
- 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)
- CUTTER, S.; BORUFF, B. & SHIRLEY, W. (2003): Social vulnerability to environmental hazards. Social Science Quarterly

- Cyber-Safe. Schutz von Verkehrs-, Tunnel- und ÖPNV-Leitzentralen vor Cyber-Angriffen
- DALKEY, N. (1969): An experimental study of group opinion: the Delphi method. *Futures*, 1(5), 408-426
- DALKEY, N. & HELMER, O. (1963): An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science*, 9(3), 458-467
- DEUBLEIN, M.; BRUNS F.; ROTH, F. & ZULAUF, C. (2017): Stand der Technik hinsichtlich der Bewertung von Resilienzmaßnahmen, BAST-Forschungsbericht FE 89.0320/2016
- Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit, GIZ (2014): Assessing and Monitoring Climate Resilience – From Theoretical Considerations to Practically Applicable Tools – A Discussion Paper
- EBINGER, J. O. & VANDYCKE, N. (2015): Moving Towards Climate-Resilient Transport. World Bank, Washington, D.C.
- EDWARDS, C. (2009): Resilient nation
- EU Research Project AllTrain (2015): All-Hazard Guide für Transport Infrastructure, <http://www.alltrain-project.eu/>
- EU Research Project AllTrain (2015): WP2 Report – Threats
- EU Research Project AllTrain (2015): WP3 Report – Infrastructure
- EU Research Project AllTrain (2015): WP3 Report – Measures
- EU Research Project AllTrain (2015): WP4 Report – Approach for Assessment
- EU Research Project AllTrain (2015): WP5 Report – Preparation and elaboration of an all-hazard guide for transport infrastructure
- EU Research Project AllTrain (2015): WP6 Report – Demonstration and Validation
- EU Research Project RAINEX (2016): Work Package 3 Report – Vulnerability and Criticality of Transport Infrastructure
- EU Research Project RAINEX (2016): Work Package 4 Report – Risk Assessment
- EU Research Project RESILENS (2015): D2.2: Qualitative, Semi-Quantitative and Quantitative Methods and Measures for Resilience Assessment and Enhancement Report and Templates
- EU Research Project RESILENS (2016): D2.3: Resilience Management Matrix and Audit Toolkit. ReMMAT
- EU Research Project RESILENS (2016): D3.1: Development of the Methodological Framework of the European Resilience Management Guidance (ERMG)
- European Commission (1996): Cost-benefit and multi-criteria analysis for new road construction. Office for Official Publications of the European Communities
- FAHRMEIR, L.; HEUMANN, C.; KÜNSTLER, R.; PIGEOT, I. & TUTZ, G. (2016): Statistik: Der Weg zur Datenanalyse. Springer-Verlag
- FEHRL (2017): The Resilient Road – A Roadmap for Research. An Element of the Forever Open Road Programme
- FEKETE, A.; HUFSCHMIDT, G.; BLANK-GORKI, V.; BLONIARZ, R.; BLÜMEL, M.; EDBAUER, L.; ... TZAVELLA, K. (2016): Atlas der Verwundbarkeit und Resilienz – Pilotausgabe zu Deutschland, Österreich, Liechtenstein und Schweiz. Köln, Bonn
- FHWA (2003): Recommendations for Bridge and Tunnel Security. The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Transportation Security Task Force
- FISCHER, R.; BASSETT, G.; BUEHRING, W.; COLLINS, M.; DICKINSON, D.; EATON, L.; ... PEERENBOOM, J. (2010): Construction a Resilience Index for the Enhanced Critical Infrastructure Protection Program
- FLETCHER, D. R. & EKERN, D. S. (2018): Understanding transportation resilience: A 2016-2018 roadmap”, vol. 59
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV (1997): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen
- Fraunhofer EMI (2018) (unveröffentlicht): FE 15.0627/2016/ARB: Verfahren und Modelle zur

- Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen, 2. Entwurf Schlussbericht
- 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
- GALLOPÍN, G. C. (2006): Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), 293–303
- GEISTEFELDT, J.; HOHMANN, S. & WU, N. (2014): Ermittlung des Zusammenhangs von Infrastruktur und Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs für den Verkehrsträger Straße
- GILBERT, S. W. (2016): Disaster resilience: A guide to the literature. CreateSpace Independent Publishing Platform
- 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
- GIORGI, L.; GIORGI, L.; T, A.; GIORGI, L. & TANDON, A. (2000): *The Theory and Practice of Evaluation*
- 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
- GUSTAVSSON, R. & STÅHL, B. (2009): *Self-healing and Resilient Critical Infrastructures* (pp. 84–94). Springer, Berlin, Heidelberg
- HAARDT, J. (2013): EU Research Projekt AllTrain, WP1 Report – State of the Art
- HAARDT, J. & KAMMERER, H. (2013): *SECMAN – Security Manual for European Road Infrastructure*
- 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
- HAGMANN, J. (2012): 3 RG REPORT Factsheet Neue Gefahrenkonzepte in der internationalen Sicherheitsanalyse. Zurich, Switzerland
- HAYASHI, Y. & MORISUGI, H. (2000): International comparison of background concept and methodology of transportation project appraisal. *Transport Policy* (Vol. 7)
- 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
- HERZOG, M. & ROTH, F. (2013): Dritter Trilateraler Workshop D-A-CH – Schutz Kritischer Infrastrukturen, CSS Tagungsbericht
- HUGHES, J. & HEALY, K (2014): Measuring the resilience of transport infrastructure – NZ Transport Agency research report 546
- 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
- IWW, SRF & VWI (2009): *Volkswirtschaftliche Bewertung des Projektes Baden-Württemberg 21 (BW21)*. Karlsruhe
- Joint Committee of Structural Safety, JCSS (2010): *Risk Assessment in Engineering*
- Joint Committee of Structural Safety, JCSS. (2001): *Probabilistic Model Code*
- JONES, H.; MOURA, F. & DOMINGOS, T. (2014): Transport infrastructure project evaluation using cost – benefit analysis. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 111, 400–409
- 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
- KRÖGER, W. (2011): *An Overview of Swiss Research on Vulnerability of Critical Infra-*

- structure. *European Perspectives on Security Research*
- LEE, D. (2000): *Methods for evaluation of transportation projects in the USA. Transport Policy (Vol. 7)*
- LINSTONE, H. A. & TUROFF, M. (Eds.) (1975): *The delphi method (pp. 3-12). Reading, MA: Addison-Wesley*
- Lloyd's (2017): *Future Cities: Building infrastructure resilience. Emerging Risk Report 2017*
- 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*
- MASSOUD A., S. (2008): *Resilience and Self-healing Challenge: Present/Possible Futures. In: CRITIS'08, 3<sup>rd</sup> International Workshop on Critical Information Infrastructures Security*
- MEISSNER, J. O. (2018): *Risikomanagement und Organisationale Resilienz. In: Ganzheitliches Chancen- und Risikomanagement (S. 29–59). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden*
- MICHEL, B. (2000): *Methods of transport projects evaluation. From Cost-Benefit to Multicriteria and Decision.*
- MORISUGI, H. (2000): *Evaluation methodologies of transportation projects in Japan. Transport Policy, 7(1), 35–40*
- National Research Council (2002): *Making the Nation Safer. Washington, D.C.: National Academies Press*
- NCHRP (2005): *Incorporating Security into the Transportation Planning Process. Washington, D.C.: Transportation Research Board*
- NCHRP (2015): *Guidelines to Incorporate the Costs and Benefits of Adaptation Measures in Preparation for Extreme Weather Events and Climate Change*
- POSNER, R. A. (2004): *Catastrophe: risk and response. Oxford University Press*
- PRIOR, T. (2015): *Measuring Critical Infrastructure Resilience: Possible Indicators, Risk and Resilience Report 9*
- PRIOR, T. & HAGMANN, J. (2012): *Measuring Resilience: Benefits and Limitations of Resilience Indices*
- PRIOR, T. & HERZOG, M. (2013): *The Practical Application of Resilience: Resilience Manifestation and Expression, Risk Factsheet 9*
- PRIOR, T. & ROTH, F. (2013): *Disaster, resilience and security in global cities. Journal of Strategic Security*
- PROAG, S. & PROAG, V. (2014): *The cost benefit analysis of providing resilience. Procedia Economics and Finance, 18, 361–368*
- pwc. (2013): *Rebuilding for resilience – Fortifying infrastructure to withstand disaster*
- RAFAELI, G.; ABBOTT, P.; SHAZAR, Y. & CHERPAK, E. (2016): *EU Research Project RESILENS, D3.2: Draft ERMG Report and Templates*
- 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*
- ROSE, A. (2015): *Measuring Economic Resilience: Recent Advances and Future Priorities*
- ROTHENGATTER, W. (2017): *Erweiterte wirtschaftliche Folgewirkungen von Verkehrsinvestitionen – Wider Economic Impacts. Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 88(1), 1–20*
- 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*
- Schweizerisches Bundesamt für Verkehr, BAV (2016): *NIBA: Nachhaltigkeitsindikatoren für Bahninfrastrukturprojekte*
- Schweizerisches Bundesamt für Bevölkerungsschutz, BABS (2013): *Katalog Möglicher Gefährdungen – Grundlage für Gefährdungsanalysen*

- Schweizerisches Bundesamt für Straßen ASTRA (2014): ASTRA 19003: Management von Naturgefahren auf den Nationalstrassen
- Schweizerisches Bundesamt für Straßen, ASTRA (2003): NISTRA: Nachhaltigkeitsindikatoren für Straßeninfrastrukturprojekte
- Schweizerisches Bundesamt für Straßen, ASTRA (2012): Naturgefahren auf den Nationalstrassen: Risikokzept
- Schweizerisches Bundesamt für Strassen, ASTRA (2012): Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen
- Significance quantitative research (2012): Erfassung des Indikators Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung: Schlussbericht. Erstellt für: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- TCRP. Improving the Resiliency of Transit Systems Threatened by Natural Disasters
- The Institution of Engineering and Technology, IET (2014): Infrastructure Risk and Resilience: Managing Complexity and Uncertainty in Developing Cities
- The UK Cabinet Office (2015): National Risk Register of Civil Emergencies. National Risk Register of Civil Emergencies
- The White House (2013): Presidential Policy Directive (PPD) 21
- THOMA, K. (2014): 'Resilience-by-Design': Strategie für die technologischen Zukunftsthemen, acatech STUDIE
- Transportation Research Board, TRB (2006): Making Transportation Tunnels Safe and Secure. Washington, D.C.: Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/13965>
- Transportation Research Board, TRB (2017): Resilience: Key Products & Projects
- Transportation Research Board, TRB (2017): Transportation Systems Resilience – Preparation, Recovery and Adaptation
- Tredis (2017): TREDPLAN, <https://www.tredis.com/products/tredplan>
- TURRÓ, M. (2001): Evaluation of transport projects in the European Investment Bank. Integrated Transport Infrastructure Planning in Europe
- UK Department for Transport (2014): Government Response to the Transport Resilience Review
- ULBRICH, J.; DÜNSER, C.; ZULAUF, C.; KAUNDINYA, I. & HOLTHAUSEN, N. (2012): SeRoN – Security of Road Transport Networks, Deliverable 400: Importance of the structures for the traffic network, 2012
- Verbundprojekt SKRIBT. Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen, Schlussbericht: Schutz kritischer Brücken und Tunnel, öffentliche Fassung
- Verbundprojekt SKRIBT. Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen, Anhang 1: Schutzmaßnahmen Brücken, zum Bericht: Schlussbericht: Schutz kritischer Brücken und Tunnel
- Verbundprojekt SKRIBT. Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen, Anhang 2: Schutzmaßnahmen Tunnel, zum Bericht: Schlussbericht: Schutz kritischer Brücken und Tunnel
- 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
- WINK, R. (Ed.) (2016): Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung (Studien zur Resilienzforschung). Springer Gabler
- World Energy Council (2015): World Energy Perspective: The road to resilience – managing and financing extrem weather risks
- ZHANG, W. & WANG, N. (2016): Resilience-based risk mitigation for road networks. Structural Safety, 62, 57-65
- 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 1: Struktur des Berichts
- Bild 2: Funktionalitätskurve
- Bild 3: Resilienzyklus
- Bild 4: Zeitpunkt der Wirkungsentfaltung von Resilienzmaßnahmen
- Bild 5: Konzept zur Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses
- Bild 6: Grafische Darstellung des Resilienzmanagementprozesses
- Bild 7: Für die vorliegende Arbeit relevante Prozesselemente
- Bild 8: Bestandteile der Methodik
- Bild 9: Resilienzyklus mit Beschränkung auf respond und recover
- Bild 10: Wirkung der Maßnahmen
- Bild 11: Vereinfachte Darstellung der Resilienzkurve
- Bild 12: Vorgehen zur Ermittlung der Kennwerte der Resilienzwirkung von Maßnahmen
- Bild 13: Bewertung des Einflusses auf den maximalen Funktionalitätsverlust
- Bild 14: Bewertung des Einflusses auf die Dauer bis zur Wiederherstellung
- Bild 15: Bewertungsmatrix
- Bild 16: Resilienzyklus
- Bild 17: Übersicht der Struktur des Handbuchs
- Bild 18: Beispiel für die Festlegung einer Punktzahl
- Bild 19: Beispiel einer Zusammenfassung der Resultate
- Bild 20: Beispiel einer Zusammenfassung der Resultate
- Bild 21: Beispiel für die Festlegung der Gewichtungen der einzelnen Kriterien
- Bild 22: Beispiel für die Festlegung der Gewichtungen der einzelnen Dimensionen
- Bild 23: Exemplarischer Entscheid zur Bestimmung des Handlungsbedarfs
- Bild 24: Bestimmung der Handlungsfelder, basierend auf den Kriterien
- Bild 25: Bestimmung der Handlungsfelder, basierend auf den Dimensionen
- Bild 26: Ausschnitt aus der Kreuztabelle
- Bild 27: Hervorhebung infrage kommender Maßnahmenfelder
- Bild 28: Bewertung des Einflusses auf den maximalen Funktionalitätsverlust
- Bild 29: Bewertung des Einflusses auf die Dauer bis zur Wiederherstellung
- Bild 30: Prinzip der Punkteverteilung
- Bild 31: Beispiel für eine Punkteverteilung und -kombination
- Bild 32: Festlegung der Gewichtungen
- Bild 33: Beispiel einer Zusammenfassung der Resultate für eine spezifische Maßnahme
- Bild 34: Ermittlung der Maßnahmenkosten am Beispiel von drei fiktiven Maßnahmen
- Bild 35: Ermittlung des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses
- Bild 36: Räumliche Systemabgrenzung des Fallbeispiels
- Bild 37: Resilienzscores für die einzelnen Kriterien für das Anwendungsbeispiel
- Bild 38: Handlungsbedarfs-Indizes der einzelnen Kriterien
- Bild 39: Grafische Darstellung der Maßnahmen

## Tabellen

- Tab. 1: Auszug aus den berücksichtigten Projekten
- Tab. 2: Zu berücksichtigende Gefährdungen
- Tab. 3: Strategien zur Erhöhung der Resilienz
- Tab. 4: Kriterienkatalog mit Zuordnung der Kriterien zu den Dimensionen
- Tab. 5: Ziel- und Indikatorensystem zur Erfassung der Resilienzwirkung
- Tab. 6: Bewertungsskala zur Abschätzung des Einflusses auf die Systemfunktionalitäten
- Tab. 7: Kriterienkatalog mit Zuordnung der Kriterien zu den Dimensionen
- Tab. 8: Ziel- und Indikatorensystem zur Erfassung der Resilienzwirkung
- Tab. 9: Aufbau der Bewertungsskalen für die Punkteverteilung
- Tab. 10: Bewertung der Resilienzwirkung der Maßnahme 1a auf das kritische Objekt 2
- Tab. 11: Bewertung der Resilienzwirkung der Maßnahme 1b auf die kritischen Objekte 1-3
- Tab. 12: Bewertung der Resilienzwirkung der Maßnahme 1b auf das kritische Objekt 4
- Tab. 13: Bewertung der Resilienzwirkung der Maßnahme 2a auf das kritische Objekt 2
- Tab. 14: Resilienzwirkung der Maßnahmen auf das definierte System
- Tab. 15: Berechnung der jährlichen Gesamtkosten
- Tab. 16: Vier Kenngrößen als Resultat aus der Anwendung der Methodik

## Tabellen im Anhang

- Tab. 17: Gliederung des Gefährdungskatalogs des schweizerischen Bundesamts für Bevölkerungsschutz

## Anhang

### A1 Hinweise zu den Elementen des Resilienzmanagement-Prozesses

Aufgrund der Aufgabenstellung wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts nur für die Elemente Resilienzscreening, Maßnahmenbeurteilung und Resilienzoptimierung eine Methodik entwickelt. Da jedoch insbesondere die vorgelagerten Prozesselemente (Ziele und Systemabgrenzung, Netscreening und Gefährdungsanalyse) eine notwendige Grundlage für die Anwendung der entwickelten Methodik darstellen, beinhaltet dieser Anhang erste Überlegungen zu diesen Prozesselementen. Neben eigenen Überlegungen wird auf Forschungsprojekte verwiesen, in denen bereits Methoden für diese Prozesselemente entwickelt wurden.

#### Zieldefinition und Systemabgrenzung

##### Kurzbeschreibung und Ziele

Die Zieldefinition und Systemabgrenzung sind wichtige Elemente des Resilienzmanagement-Prozesses. Auf dieser Grundlage entscheidet sich, wann welche Elemente eines inhaltlich, zeitlich und räumlich abgegrenzten Systems als kritisch gelten. Zudem wird über die Zielsetzung definiert, welche Kriterien für das Resilienzscreening und welche Funktionalitäten für die Maßnahmenbeurteilung betrachtet werden sollen.

Das Ziel besteht in der Klärung der Verantwortlichkeiten, einer Identifikation der einzubindenden/relevanten Akteure, der zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen sowie einer Festlegung der anzustrebenden Ziele für die weiteren Schritte des Resilienzmanagement-Prozesses.

##### Vorgehen

1. Initial sind die Verantwortlichkeiten zu bestimmen und die relevanten Akteure zu identifizieren, die in die Maßnahmenfindung im Rahmen des Resilienzmanagements mit einbezogen werden sollen. Folgende Fragestellungen sind zu beantworten und in geeigneter Weise zu dokumentieren:
  - a. Wer übernimmt die Führung für das Resilienzmanagement und die Koordination mit den involvierten Akteuren?
  - b. Welche Kompetenzen hat diese Person/Institution?
  - c. Handelt es sich um eine projektbezogene Organisation für die Etablierung des Resilienzmanagements oder um eine ständige, dauerhaft vorhandene Organisation? → Hinweis: Anzustreben ist eine über den Projektrahmen inhaltlich und zeitlich hinaus etablierte Institution.
  - d. Wer sind die relevanten Akteure, die in das gesamtheitliche Resilienzmanagement mit einbezogen werden müssen? Zum Beispiel: politische Entscheidungsträger, Stadtverwaltung, Infrastrukturbetreiber, Zielgruppen (z.B. Haushalte, privatwirtschaftliche Unternehmen, ...), Versorgungsgruppen wie z.B. Stromversorger.
2. Der Kreis der ausgewählten Akteure definiert die Systemgrenzen. Dafür werden die folgenden Fragestellungen beantwortet und dokumentiert:
  - a. Was ist das betrachtete System und wie wird es räumlich, zeitlich und inhaltlich abgegrenzt?
  - b. Welche übergeordneten Grundlagen sind relevant?
  - c. Besteht eine nationale Resilienzstrategie?
  - d. Welche Rechtsgrundlagen, geltende Normen und Standards, Masterpläne, etc. müssen berücksichtigt werden?
  - e. Welche Datengrundlagen stehen zur Verfügung?
  - f. Was sind die Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen des Systems?
3. Der Kreis der ausgewählten Akteure legt die Ziele des Resilienzmanagements/der Resilienzstrategie fest. Als übergeordnetes Ziel kann die Erhöhung der Resilienz des betrachteten Systems

stehen. Für die detaillierte Zielfestlegung werden die folgenden Fragestellungen diskutiert, beantwortet und dokumentiert:

- a. Bestehen zusätzliche übergeordnete Entwicklungsziele, Programme oder Zielsetzungen des Unternehmens/Betreibers?
  - b. Auf welche Teilziele lassen sich die übergeordneten Ziele herunterbrechen? Die Teilziele dienen später der Festlegung des Kriterienkatalogs beim Resilienzscreening und der Funktionalitäten (und ihren Indikatoren) bei der Maßnahmenbeurteilung.
  - c. Welches Leistungs- oder Funktionalitätsniveau bzw. welcher minimale Verlauf der Systemfunktionalität über die Zeit ist noch akzeptierbar und muss mindestens durch geeignete Maßnahmen angestrebt werden?
  - d. Welche direkten und indirekten Konsequenzen sind gerade noch akzeptierbar und welche nicht, weil sonst die Funktionalität des Systems zu stark beeinflusst oder die Einwirkung einen zu langen Zeitraum beanspruchen würde?
4. Der Kreis der Akteure legt Intervalle zur periodischen Überprüfung der Wirkung der im Zuge des Resilienzmanagements ausgewählten und umgesetzten Maßnahmen fest.

Hinweis: Die Zieldefinition und Systemabgrenzung unterliegen dem iterativen Prozess des Resilienzmanagements. Das heißt, dass beim wiederholten durchlaufen des Resilienzmanagement-Zyklus die Zieldefinition stets verfeinert und justiert werden kann; das gleiche gilt auch für eine Anpassung der Systemgrenzen.

## Netscreening

Das Ziel des Netscreenings besteht darin, dass Resilienzscreening, die Maßnahmenbeurteilung und die Resilienzoptimierung nur auf die besonders relevanten/kritischen/verletzlichen Elemente des Systems zu fokussieren. Netzelemente gelten als kritisch, wenn die erwarteten direkten und indirekten Konsequenzen bei deren (teilweisen oder totalen) Ausfall der Funktionalität als besonders hoch, schwerwiegend oder teuer eingestuft werden. Für das Netscreening wurden im Rahmen von europäischen Forschungsprojekten bereits Methoden entwickelt. Hierbei sei auf [15], [1] - [4] und [23] verwiesen.

Hinweis: Je nach betrachtetem System kann es auch sinnvoll sein, erst eine Gefährdungsanalyse durchzuführen und dann die betroffenen, kritischen Systemelemente zu identifizieren (pro Gefährdung).

## Gefährdungsanalyse

### Kurzbeschreibung und Ziele

Unter der Kenntnis der kritischen Elemente im Straßennetz (meist Brücken und Tunnel als «Nadelöhre» des Verkehrs) wird eine Gefährdungsanalyse für jedes kritische Element durchgeführt. Das Ziel der Gefährdungsanalyse besteht in der Identifikation aller relevanten Gefährdungen, die eine negative Einwirkung auf die Systemfunktionalität bewirken können. Daraus resultiert für jedes kritische Objekt eine Liste der jeweilig relevanten Gefährdungen. Das Netscreening kombiniert mit der Gefährdungsanalyse kann auch als Vulnerabilitätsanalyse verstanden werden.

Bei der Gefährdungsanalyse sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Nutzung und Überlagerung von georeferenzierten Informationssystemen für die Identifikation von besonders kritischen und verletzlichen Systemelementen (Vulnerabilitäts-Mapping)
- Berücksichtigung und Antizipation von Trends, die aktuell zwar noch nicht unmittelbar messbar sind, die sich aber für langfristige Betrachtungen abzeichnen.
- Aus der Gefährdungsanalyse können sich neue/weitere Schutzziele für das System ableiten, welche vorgängig bei der Zieldefinition und Systemabgrenzung noch nicht erkannt wurde.
- Gefährdungen müssen zwischen kurzfristigen (schockartigen, katastrophalen, acute shocks) Gefährdungen und schleichenden Gefährdungen (chronic stresses) differenziert werden. Je nachdem stellt sich der Funktionalitätsverlauf der Resilienzkurve unterschiedlich dar.
- Die Einwirkungsdauer der jeweiligen Gefährdung auf die Systemfunktionalitäten ist abzuschätzen.

### Vorgehen

Der Kreis der Akteure wählt ausgehend von einem umfassenden nationalen Gefährdungskatalog, jene Gefährdungen aus, die auf die einzelnen kritischen Elemente des Systems zutreffen können.

Tabelle 17 zeigt exemplarisch die Gliederung des Gefährdungskatalogs des schweizerischen Bundesamts für Bevölkerungsschutz.

<b>Naturbedingte Gefährdungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hydrologische / meteorologische Naturgefahren</li> <li>- Gravitative Naturgefahren</li> <li>- Seismische Naturgefahren</li> <li>- Durch Klimaveränderung induzierte Naturgefahren</li> <li>- Massenverbreitung von Schadorganismen</li> <li>- Andere naturbedingte Gefährdungen</li> </ul>
<b>Technikbedingte Gefährdungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Großunfälle Verkehr</li> <li>- Störfälle / Unfälle in Produktions- und Speichereinrichtungen</li> <li>- Schadensereignisse bei Bauwerken</li> <li>- Ausfälle von Versorgungs-, Verkehrs- und Informationsinfrastrukturen</li> </ul>
<b>Gesellschaftsbedingte Gefährdungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Krankheiten von Mensch und Tier</li> <li>- Politische Ereignisse oder Entwicklungen</li> <li>- Versorgungsengpässe</li> <li>- Entsorgungsengpässe</li> <li>- Kriminalität / Terrorismus</li> <li>- Bewaffnete Konflikte</li> <li>- Andere gesellschaftlich bedingte Gefährdungen</li> </ul>

Tabelle 17: Gliederung des Gefährdungskatalogs des schweizerischen Bundesamts für Bevölkerungsschutz

Der vollständige Gefährdungskatalog der BABS dient als Grundlage für die Auswahl der relevanten Gefährdungen. Er ist im Anhang A5 dargestellt.

Die folgenden Aspekte sind für die Auswahl der relevanten Gefährdungen maßgebend:

- Ihr Eintritt führt zu relevanten negativen Auswirkungen bzw. Schäden für das betrachtete System
- Sie haben sich bereits im In- oder Ausland ereignet oder sind daran, sich zu entwickeln, bzw. sie könnten sich in den nächsten 10 Jahren manifestieren.
- Schleichende Entwicklungen und Trends sind insofern berücksichtigt, als sich deren Auswirkungen in den nächsten 10 Jahren zeigen könnten.

## A2 Bewertungsskalen für die Kriterien

Dimension		Kriterium	Bewertungsskala
ORGANISATORISCH	1	Verantwortlichkeiten  Sind die Verantwortlichkeiten definiert und den Verantwortlichen Rollen und Funktionen zugewiesen (auch außerhalb des Ereignisfalls)?	<p>5 - Für die kritischen Objekte sind alle Verantwortlichkeiten definiert, den Verantwortlichen Rollen und Funktionen zugewiesen und die Handlungsfähigkeit ist sichergestellt (Rollen und Verantwortlichkeiten etabliert und akzeptiert; Defizite aufgrund unerwarteter Ereignisse berücksichtigt; hinreichende Kompetenz der Verantwortlichen nachgewiesen)</p> <p>4 - Für die kritischen Objekte ist die Mehrheit (mindestens 75%) aller Verantwortlichkeiten definiert, den Verantwortlichen Rollen und Funktionen zugewiesen und die Handlungsfähigkeit ist sichergestellt (Rollen und Verantwortlichkeiten etabliert und akzeptiert; Defizite aufgrund unerwarteter Ereignisse berücksichtigt; hinreichende Kompetenz der Verantwortlichen nachgewiesen)</p> <p>3 - Für die kritischen Objekte ist mehr als die Hälfte (mindestens 50%) aller Verantwortlichkeiten definiert, den Verantwortlichen Rollen und Funktionen zugewiesen und die Handlungsfähigkeit ist sichergestellt (Rollen und Verantwortlichkeiten etabliert und akzeptiert; Defizite aufgrund unerwarteter Ereignisse berücksichtigt; hinreichende Kompetenz der Verantwortlichen nachgewiesen)</p> <p>2 - Für die kritischen Objekte ist ein Teil (mindestens 25%) aller Verantwortlichkeiten definiert, den Verantwortlichen Rollen und Funktionen zugewiesen und die Handlungsfähigkeit ist sichergestellt (Rollen und Verantwortlichkeiten etabliert und akzeptiert; Defizite aufgrund unerwarteter Ereignisse berücksichtigt; hinreichende Kompetenz der Verantwortlichen nachgewiesen)</p> <p>1 - Für die kritischen Objekte ist nur für einen sehr kleiner Teil (weniger 25%) aller Verantwortlichkeiten definiert, den Verantwortlichen Rollen und Funktionen zugewiesen und die Handlungsfähigkeit ist sichergestellt (Rollen und Verantwortlichkeiten etabliert und akzeptiert; Defizite aufgrund unerwarteter Ereignisse berücksichtigt; hinreichende Kompetenz der Verantwortlichen nachgewiesen)</p> <p>0 - Verantwortlichkeiten sind nicht definiert, den Verantwortlichen sind keine Rollen und Funktionen zugewiesen oder die Handlungsfähigkeit ist nicht sichergestellt (Rollen und Verantwortlichkeiten nicht etabliert und akzeptiert; Defizite aufgrund unerwarteter Ereignisse nicht berücksichtigt; hinreichende Kompetenz der Verantwortlichen nicht nachgewiesen)</p>
	2	Notfallpläne  Existieren Notfallpläne für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis ( <i>respond</i> ), welche die Bewältigung dieses Ereignisses hinreichend ermöglichen?	<p>5 - Für alle kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist</p> <p>4 - Für die Mehrheit (mindestens 75%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist</p> <p>3 - Für mehr als die Hälfte (mindestens 50%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist</p> <p>2 - Für einen Teil (mindestens 25%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist</p> <p>1 - Nur für einen sehr kleinen Teil (weniger 25%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Notfallpläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Notfallplanung abdecken (u.a. Definition konkreter Handlungen und zugehörige Akteure/Ansprechpersonen, benötigte Ressourcen, Ansprechpersonen, Verkehrsmanagement) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist</p> <p>0 - Keine Notfallpläne vorhanden, Notfallpläne sind nicht hinreichend, Wirksamkeit nicht nachgewiesen</p>
	3	Wiederherstellungspläne  Existieren Wiederherstellungspläne, welche die Bewältigung von disruptiven Ereignissen hinreichend ermöglichen/die Wiederherstellung ( <i>recover</i> ) beschleunigen?	<p>5 - Für alle kritischen Objekte bestehen hinreichende Wiederherstellungs-/Business Continuity-Pläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Wiederherstellung abdecken (u.a. benötigte Ressourcen, Vereinbarungen mit Dienstleistern, Kostenvereinbarungen, Prioritätenlisten, detaillierte Übergangsregelungen, Triage-Richtlinien, Maßnahmen zur beschleunigten Abwicklung von Baubewilligungen) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist</p> <p>4 - Für die Mehrheit (mindestens 75%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Wiederherstellungs-/Business Continuity-Pläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Wiederherstellung abdecken (u.a. benötigte Ressourcen, Vereinbarungen mit Dienstleistern, Kostenvereinbarungen, Prioritätenlisten, detaillierte Übergangsregelungen, Triage-Richtlinien, Maßnahmen zur beschleunigten Abwicklung von Baubewilligungen) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist</p> <p>3 - Für mehr als die Hälfte (mindestens 50%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Wiederherstellungs-/Business Continuity-Pläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Wiederherstellung abdecken (u.a. benötigte Ressourcen, Vereinbarungen mit Dienstleistern, Kostenvereinbarungen, Prioritätenlisten, detaillierte Übergangsregelungen, Triage-Richtlinien, Maßnahmen zur beschleunigten Abwicklung von Baubewilligungen) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist</p> <p>2 - Für einen Teil (mindestens 25%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Wiederherstellungs-/Business Continuity-Pläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Wiederherstellung abdecken (u.a. benötigte Ressourcen, Vereinbarungen mit Dienstleistern, Kostenvereinbarungen, Prioritätenlisten, detaillierte Übergangsregelungen, Triage-Richtlinien, Maßnahmen zur beschleunigten Abwicklung von Baubewilligungen) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist</p> <p>1 - Nur für einen sehr kleinen Teil (weniger 25%) aller kritischen Objekte bestehen hinreichende Wiederherstellungs-/Business Continuity-Pläne, d.h. Pläne, welche alle Aspekte der Wiederherstellung abdecken (u.a. benötigte Ressourcen, Vereinbarungen mit Dienstleistern, Kostenvereinbarungen, Prioritätenlisten, detaillierte Übergangsregelungen, Triage-Richtlinien, Maßnahmen zur beschleunigten Abwicklung von Baubewilligungen) und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist</p> <p>0 - Keine Wiederherstellungs-/Business Continuity-Pläne vorhanden, Wiederherstellungs-/Business Continuity-Pläne sind nicht hinreichend, Wirksamkeit nicht nachgewiesen</p>
	4	Interoperabilität  Ist eine Interoperabilität (d.h. z.B. Harmonisierung Kommunikation, Harmonisierung Notfallpläne, Harmonisierung IT-Systeme, Harmonisierung technische Ausrüstung, funktionierende Zusammenarbeit zwischen den Akteuren) zwischen den Stakeholdern gewährleistet?	<p>5 - Es bestehen keine bekannten Inkompatibilitäten, die Stakeholder sind auf allen Ebenen und in allen kritischen Objekte miteinander vernetzt.</p> <p>4 - Interoperabilität für die Mehrheit (mindestens 75%) aller kritischen Objekte</p> <p>3 - Interoperabilität für mehr als die Hälfte (mindestens 50%) aller kritischen Objekte</p> <p>2 - Interoperabilität für einen Teil (mindestens 25%) aller kritischen Objekte</p> <p>1 - Interoperabilität für nur einen sehr kleinen Teil (weniger 25%) aller kritischen Objekte</p> <p>0 - Unbekannt ob Interoperabilität gewährleistet, unbekannt ob Inkompatibilitäten vorhanden, kein Versuch der Harmonisierung</p>

Dimension		Kriterium	Bewertungsskala
ORGANISATORISCH	5	Humanressourcen (respond) In welchem Umfang können Humanressourcen für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis ("respond") aktiviert werden?	5 - Der geschätzte Bedarf ist vollständig abgedeckt in allen kritischen Objekte 4 - Für die kritischen Objekte ist die Mehrheit (mindestens 75%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 3 - Für die kritischen Objekte ist mehr als die Hälfte (mindestens 50%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 2 - Für die kritischen Objekte ist ein Teil (mindestens 25%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 1 - Für die kritischen Objekte ist nur ein sehr kleiner Teil (weniger 25%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 0 - Bedarf nicht abgeschätzt, unbekannt ob Bedarf abgedeckt, kritische Objekte nicht identifiziert
	6	Humanressourcen (recover) In welchem Umfang können Humanressourcen für die Phase der Wiederherstellung ("recover") aktiviert werden?	5 - Der geschätzte Bedarf ist vollständig abgedeckt in allen kritischen Objekte 4 - Für die kritischen Objekte ist die Mehrheit (mindestens 75%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 3 - Für die kritischen Objekte ist mehr als die Hälfte (mindestens 50%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 2 - Für die kritischen Objekte ist ein Teil (mindestens 25%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 1 - Für die kritischen Objekte ist nur ein sehr kleiner Teil (weniger 25%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 0 - Bedarf nicht abgeschätzt, unbekannt ob Bedarf abgedeckt, kritische Objekte nicht identifiziert
	7	Aus-/Weiterbildung Verfügen die Humanressourcen über eine ausreichende Ausbildung/ausreichende Fähigkeiten um die ihnen zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen?	5 - Alle Einsatzkräfte verfügen über eine ausreichende Ausbildung und sind nachweislich in der Lage (Besitz der benötigten Fähigkeiten) die ihnen in den kritischen Objekte zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen. 4 - Die Mehrheit (mindestens 75%) aller Einsatzkräfte verfügt über eine ausreichende Ausbildung und sind nachweislich in der Lage (Besitz der benötigten Fähigkeiten) die ihnen in den kritischen Objekte zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen. 3 - Die Hälfte (mindestens 50%) aller Einsatzkräfte verfügt über eine ausreichende Ausbildung und sind nachweislich in der Lage (Besitz der benötigten Fähigkeiten) die ihnen in den kritischen Objekte zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen. 2 - Ein Teil (mindestens 25%) aller Einsatzkräfte verfügt über eine ausreichende Ausbildung und sind nachweislich in der Lage (Besitz der benötigten Fähigkeiten) die ihnen in den kritischen Objekte zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen. 1 - Nur ein sehr kleiner Teil (weniger 25%) aller Einsatzkräfte verfügt über eine ausreichend Ausbildung und sind nachweislich in der Lage (Besitz der benötigten Fähigkeiten) die ihnen in den kritischen Objekte zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen. 0 - Die Einsatzkräfte können die ihnen zugewiesenen Aufgaben nicht hinreichend erfüllen (Ausbildung nicht hinreichend, Ausbildung nicht mehr auf dem neusten Stand, Befähigung nicht nachgewiesen, etc.)

WIRTSCHAFTLICH	8	Finanzen (respond) In welchem Umfang können innerhalb einer nützlichen Frist finanzielle Mittel für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis ("respond") aktiviert werden?	5 - Finanzmittel reichen aus, um 100% des geschätzten Bedarfs eines sehr wahrscheinlichen Einwirkungsszenarios zu bewältigen 4 - Finanzmittel reichen aus, um die Mehrheit (mindestens 75%) des geschätzten Bedarfs eines sehr wahrscheinlichen Einwirkungsszenarios zu bewältigen 3 - Finanzmittel reichen aus, um mehr als die Hälfte (mindestens 50%) des geschätzten Bedarfs einer sehr wahrscheinlichen Gefährdung zu bewältigen 2 - Finanzmittel reichen aus, um einen Teil (mindestens 25%) des geschätzten Bedarfs eines sehr wahrscheinlichen Einwirkungsszenarios zu bewältigen 1 - Finanzmittel reichen aus, um nur einen sehr kleinen Teil (weniger als 25%) des geschätzten Bedarfs eines sehr wahrscheinlichen Einwirkungsszenarios zu bewältigen 0 - Keine verfügbaren liquiden Finanzierungsquellen
	9	Finanzen (recover) In welchem Umfang können innerhalb einer nützlichen Frist finanzielle Mittel für die Phase der Wiederherstellung ("recover") aktiviert werden?	5 - Finanzmittel reichen aus, um 100% des geschätzten Bedarfs eines sehr wahrscheinlichen Einwirkungsszenarios zu bewältigen 4 - Finanzmittel reichen aus, um die Mehrheit (mindestens 75%) des geschätzten Bedarfs eines sehr wahrscheinlichen Einwirkungsszenarios zu bewältigen 3 - Finanzmittel reichen aus, um mehr als die Hälfte (mindestens 50%) des geschätzten Bedarfs einer sehr wahrscheinlichen Gefährdung zu bewältigen 2 - Finanzmittel reichen aus, um einen Teil (mindestens 25%) des geschätzten Bedarfs eines sehr wahrscheinlichen Einwirkungsszenarios zu bewältigen 1 - Finanzmittel reichen aus, um nur einen sehr kleinen Teil (weniger als 25%) des geschätzten Bedarfs eines sehr wahrscheinlichen Einwirkungsszenarios zu bewältigen 0 - Keine verfügbaren liquiden Finanzierungsquellen

Dimension		Kriterium	Bewertungsskala
PHYSISCH/TECHNISCH	10	Materielle Ressourcen In welchem Umfang können materielle Ressourcen/technische Ausrüstung für die Zeit unmittelbar nach einem disruptiven Ereignis ("respond") aktiviert werden?	5 - Der geschätzte Bedarf ist vollständig abgedeckt in allen kritischen Objekte 4 - Für die kritischen Objekte ist die Mehrheit (mindestens 75%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 3 - Für die kritischen Objekte ist mehr als die Hälfte (mindestens 50%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 2 - Für die kritischen Objekte ist ein Teil (mindestens 25%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 1 - Für die kritischen Objekte ist nur ein sehr kleiner Teil (weniger 25%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 0 - Bedarf nicht abgeschätzt, unbekannt ob Bedarf abgedeckt, kritische Objekte nicht identifiziert
	11	Materielle Ressourcen In welchem Umfang können materielle Ressourcen/technische Ausrüstung für die Phase der Wiederherstellung ("recover") aktiviert werden?	5 - Der geschätzte Bedarf ist vollständig abgedeckt in allen kritischen Objekte 4 - Für die kritischen Objekte ist die Mehrheit (mindestens 75%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 3 - Für die kritischen Objekte ist mehr als die Hälfte (mindestens 50%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 2 - Für die kritischen Objekte ist ein Teil (mindestens 25%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 1 - Für die kritischen Objekte ist nur ein sehr kleiner Teil (weniger 25%) des geschätzten Bedarfs abgedeckt 0 - Bedarf nicht abgeschätzt, unbekannt ob Bedarf abgedeckt, kritische Objekte nicht identifiziert
	12	Kommunikationssysteme Wie groß ist die Reichweite von Kommunikationssystemen zur Information/Warnung der Betroffenen bei einem disruptiven Ereignis?	5 - Die Erreichung von 100% aller Betroffenen ist in allen kritischen Objekte sichergestellt 4 - Die Erreichung der Mehrheit (mindestens 75%) aller Betroffenen ist in allen kritischen Objekte sichergestellt 3 - Die Erreichung von mehr als der Hälfte (mindestens 50%) aller Betroffenen ist in allen kritischen Objekte sichergestellt 2 - Die Erreichung eines Teils (mindestens 25%) aller Betroffenen ist in allen kritischen Objekte sichergestellt 1 - Die Erreichung eines nur sehr kleinen Teils (weniger 25%) aller Betroffenen ist in allen kritischen Objekte sichergestellt 0 - Keine Warnung, Kommunikation (Warnung und Information) kann nicht in allen kritischen Objekte garantiert werden (z.B. da keine Redundanzen vorhanden, etc.)
	13	Krisen-/Notfallzentrum Existiert ein Krisen-/Notfallzentrum mit ausreichender Ausstattung?	5 - Ja. Fix installiert, dauerhaft besetzt. 4 - Ja. Fix installiert, nicht dauerhaft besetzt. Besetzung durch Experten. 3 - Ja. Fix installiert, nicht dauerhaft besetzt. Besetzung durch Laien. 2 - Ja. Mobile Notfallzentrale, nicht dauerhaft besetzt. Besetzung durch Experten. 1 - Ja. Mobile Notfallzentrale, nicht dauerhaft besetzt. Besetzung durch Laien. 0 - Nein
	14	Technische Einrichtungen Existieren technische Einrichtungen am Objekt, welche die Funktionalität im Bedarfsfall erhöhen? (z.B. Sprinkleranlagen, Rauchgasabsaugungsanlagen, verkürzte Notausgangsabstände in Tunnel, etc.)	5 - Alle kritischen Objekte sind mit Massnahmen ausgestattet, welche die negativen Auswirkungen nachweislich und hinreichend verringern 4 - Die Mehrheit (mindestens 75%) aller kritischen Objekte sind mit Massnahmen ausgestattet, welche die negativen Auswirkungen nachweislich und hinreichend verringern 3 - Mehr als die Hälfte (mindestens 50%) aller kritischen Objekte sind mit Massnahmen ausgestattet, welche die negativen Auswirkungen nachweislich und hinreichend verringern 2 - Ein Teil (mindestens 25%) aller kritischen Objekte sind mit Massnahmen ausgestattet, welche die negativen Auswirkungen nachweislich und hinreichend verringern 1 - Nur ein sehr kleiner Teil (weniger 25%) aller kritischen Objekte sind mit Massnahmen ausgestattet, welche die negativen Auswirkungen nachweislich und hinreichend verringern 0 - Kein Objekt ist mit Massnahmen ausgestattet, welche die negativen Auswirkungen verringern, die Wirkung ist nicht nachgewiesen oder die Reduktion der negativen Auswirkungen nicht hinreichend
	15	Alternative Routen Wie viele kritische Objekte verfügen über alternative Routen, mit einer maximalen Reisezeiterhöhung von 30 Minuten?	5 - 80%+ der kritischen Anlagen haben alternative Routen mit einer maximalen Reisezeiterhöhung von 30 Minuten 4 - 60%+ haben alternative Routen mit einer maximalen Reisezeiterhöhung von 30 Minuten 3 - 40%+ haben alternative Routen mit einer maximalen Reisezeiterhöhung von 30 Minuten 2 - 20%+ haben alternative Routen mit einer maximalen Reisezeiterhöhung von 30 Minuten 1 - <20% haben alternative Routen mit einer maximalen Reisezeiterhöhung von 30 Minuten 0 - 0% haben alternative Routen mit einer maximalen Reisezeiterhöhung von 30 Minuten
	16	Kapazität alternative Routen Verfügen die alternativen Routen über freie Kapazitäten?	5 - 80%+ der alternativen Routen verfügen über eine Verkehrsqualitätsstufe A bis C 4 - 60-80% der alternativen Routen verfügen über eine Verkehrsqualitätsstufe A bis C 3 - 40-60% der alternativen Routen verfügen über eine Verkehrsqualitätsstufe A bis C 2 - 20-40% der alternativen Routen verfügen über eine Verkehrsqualitätsstufe A bis C 1 - <20% der alternativen Routen verfügen über eine Verkehrsqualitätsstufe A bis C 0 - Keine alternative Route besitzt verfügt über eine Verkehrsqualitätsstufe A bis C
17	Redundanzen Wie viele kritische Objekte verfügen über alternative Verkehrsträger, welche bei einem disruptiven Ereignis als Alternative darstellen können?	5 - Für >80% der kritischen Objekte gibt es alternative Verkehrsträger 4 - Für 60-80% der kritischen Objekte gibt es alternative Verkehrsträger 3 - Für 40-60% der kritischen Objekte gibt es alternative Verkehrsträger 2 - Für 20-40% der kritischen Objekte gibt es alternative Verkehrsträger 1 - Für <20% der kritischen Objekte gibt es alternative Verkehrsträger. 0 - Keine alternativen Verkehrsträger vorhanden, welche im Ereignisfall eine Alternative darstellen können	

# A3 Kreuztabelle für die Maßnahmenidentifikation

Dimension		Maßnahmefelder und zugehörige Phasen (Nicht abschliessend, Konkretisierung notwendig)					
		Nr. 1 Abschluss von Versicherungen/Erhöhung der Deckung	Nr. 2 Treffen von Kostenvereinbarungen bei netzwerkübergreifenden/ sektorübergreifenden disruptiven Ereignissen	Nr. 3 Entwicklung von Mechanismen zur schnellen Freigabe von finanziellen Mitteln bei netzwerkübergreifenden/ sektorübergreifenden disruptiven Ereignissen	Nr. 4 Regelmässige Überprüfung und Anpassung der verfügbaren Finanzmittel auf neu auftretende Gefahren/Bedrohungen	Nr. 5 Redundante Finanzierungsquellen etablieren	Nr. 6 Regelmässige Erneuerung und Anpassung der getroffenen Vereinbarungen zur Kostenteilung
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten						
	2 Notfallpläne						
	3 Wiederherstellungspläne						
	4 Interoperabilität		x	x			
	5 Humanressourcen (respond)						
	6 Humanressourcen (recover)						
	7 Aus-/Weiterbildung						
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)	x	x	x	x	x	x
	9 Finanzen (recover)	x	x	x	x	x	x
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)						
	11 Materielle Ressourcen (recover)						
	12 Kommunikationssysteme						
	13 Krisen-/ Notfallzentrum						
	14 Technische Einrichtungen						
	15 Alternative Routen						
	16 Kapazität alternative Routen						
17 Redundanzen							

Dimension	Kriterien	Nr. 7	Nr. 8	Nr. 9	Nr. 10	Nr. 11	Nr. 12
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten						Treffen von Vereinbarungen mit externen Hilfsorganisationen/Blaulichtorganisationen (Polizei, Feuerwehr), um deren Verfügbarkeit und Mobilisierung auf der Grundlage eines vereinbarten MOJ zu ermöglichen
	2 Notfallpläne						
	3 Wiederherstellungspläne						
	4 Interoperabilität	x	x	x	x	x	x
	5 Humanressourcen (respond)						x
	6 Humanressourcen (recover)						x
	7 Aus-/Weiterbildung						
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)						
	9 Finanzen (recover)						
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)						
	11 Materielle Ressourcen (recover)						
	12 Kommunikationssysteme	x					x
	13 Krisen-/ Notfallzentrum						
	14 Technische Einrichtungen						
	15 Alternative Routen						
	16 Kapazität alternative Routen						
17 Redundanzen							

Dimension	Kriterien	Nr. 13 Treffen von Vereinbarungen mit externen Fachleuten (öffentliche Ordnung, Kommunikationsberater, Dienstleistungen), um deren Verfügbarkeit und Mobilisierung auf der Grundlage eines vereinbarten MOU zu ermöglichen	Nr. 14 Treffen von Vereinbarungen mit technischen Dienstleistern (Baufirmen, Ingenieurbüros etc.)	Nr. 15 Ernennung von Gemeindevertretern, welche in Notfällen als Verbindungsbeamte fungieren können	Nr. 16 Abschluss von Verträgen für eine funktionierende Kommunikation mit der Öffentlichkeit (Informationsvermittlern, digitalen Medien, Mobilfunkbetreibern, sozialen Netzwerkbetreibern, Humanressourcen und Experten für die Verbreitung von Informationen in der Öffentlichkeit)	Nr. 17 Treffen von Vereinbarungen mit externen Ressourcenzulieferanten
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten					
	2 Notfallpläne					
	3 Wiederherstellungspläne					
	4 Interoperabilität	x	x	x	x	x
	5 Humanressourcen (respond)	x	x			
	6 Humanressourcen (recover)	x	x			
	7 Aus-/Weiterbildung					
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)					
	9 Finanzen (recover)					
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)					x
	11 Materielle Ressourcen (recover)					x
	12 Kommunikationssysteme		x	x	x	
	13 Krisen-/ Notfallzentrum					
	14 Technische Einrichtungen					
	15 Alternative Routen					
	16 Kapazität alternative Routen					
17 Redundanzen						

Dimension	Kriterien	Nr. 18	Nr. 19	Nr. 20	Nr. 21	Nr. 22
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten	Ausreichende Verfügbarkeit des Personals beim Betreiber der kritischen Infrastruktur sicherstellen/alle Einsatzpositionen gemäss Notfallplan vollständig besetzen (unter Berücksichtigung, dass im Falle einer Notlage das Personal evtl. nicht zur Arbeit erscheinen kann (keine Möglichkeit zum Arbeitsplatz zu kommen, Verpflichtungen gegenüber der Familie, etc.))	x	x	x	x
	2 Notfallpläne					
	3 Wiederherstellungspläne					
	4 Interoperabilität					
	5 Humanressourcen (respond)	x	x			
	6 Humanressourcen (recover)	x	x			
	7 Aus-/Weiterbildung					
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)					
	9 Finanzen (recover)					
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)					
	11 Materielle Ressourcen (recover)					
	12 Kommunikationssysteme					
	13 Krisen-/ Notfallzentrum					
	14 Technische Einrichtungen					
	15 Alternative Routen					
	16 Kapazität alternative Routen					
	17 Redundanzen					

Dimension	Kriterien	Nr. 23	Nr. 24	Nr. 25	Nr. 26	Nr. 27	Nr. 28
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten	x					
	2 Notfallpläne		x	x	x	x	x
	3 Wiederherstellungspläne						
	4 Interoperabilität						
	5 Humanressourcen (respond)						
	6 Humanressourcen (recover)						
	7 Aus-/Weiterbildung						
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)						
	9 Finanzen (recover)						
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)						
	11 Materielle Ressourcen (recover)						
	12 Kommunikationssysteme						
	13 Krisen-/ Notfallzentrum						
	14 Technische Einrichtungen						
	15 Alternative Routen						
	16 Kapazität alternative Routen						
	17 Redundanzen						

Dimension	Kriterien	Nr. 29	Nr. 30	Nr. 31	Nr. 32	Nr. 33	Nr. 34
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten						
	2 Notfallpläne	x	x	x	x	x	
	3 Wiederherstellungspläne						
	4 Interoperabilität						
	5 Humanressourcen (respond)						
	6 Humanressourcen (recover)						
	7 Aus-/Weiterbildung						
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)						
	9 Finanzen (recover)						
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)						
	11 Materielle Ressourcen (recover)						
	12 Kommunikationssysteme						
	13 Krisen-/ Notfallzentrum						
	14 Technische Einrichtungen						
	15 Alternative Routen						
	16 Kapazität alternative Routen						
17 Redundanzen							

Dimension	Kriterien	Nr. 35	Nr. 36	Nr. 37	Nr. 38	Nr. 39	Nr. 40
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten						
	2 Notfallpläne						
	3 Wiederherstellungspläne						
	4 Interoperabilität						
	5 Humanressourcen (respond)						
	6 Humanressourcen (recover)						
	7 Aus-/Weiterbildung	x					
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)						
	9 Finanzen (recover)						
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)		x			x	x
	11 Materielle Ressourcen (recover)		x			x	x
	12 Kommunikationssysteme			x			
	13 Krisen-/ Notfallzentrum				x		
	14 Technische Einrichtungen						
	15 Alternative Routen				x		
	16 Kapazität alternative Routen						
	17 Redundanzen						

Dimension	Kriterien	Nr. 41	Nr. 42	Nr. 43	Nr. 44	Nr. 45	Nr. 46
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten						
	2 Notfallpläne						
	3 Wiederherstellungspläne						
	4 Interoperabilität						
	5 Humanressourcen (respond)						
	6 Humanressourcen (recover)						
	7 Aus-/Weiterbildung						
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)						
	9 Finanzen (recover)						
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)	x					
	11 Materielle Ressourcen (recover)	x					
	12 Kommunikationssysteme						
	13 Krisen-/ Notfallzentrum						
	14 Technische Einrichtungen						
	15 Alternative Routen			x			
	16 Kapazität alternative Routen		x	x			
17 Redundanzen				x		x	

Nr. 41	Nr. 42	Nr. 43	Nr. 44	Nr. 45	Nr. 46
Back-up Inventare und Ausrüstungen bereitstellen	Ausbau bestehender Routen	Neubau von Routen	Neubau alternativer Verkehrsträger	Ausbau bestehender alternativer Verkehrsträger	Regelmässige Übungen für das relevante Personal zum Umgang mit den identifizierten potentiellen Notfällen, Katastrophen, Krisen und unerwarteten Ereignissen, angepasst auf die definierten Einwirkungsszenarien

Dimension	Kriterien	Nr. 47 Regelmässige gemeinsame Übungen mit den externen Stakeholdern (abhängige Betreiber, Notfalldienste, Rettungsdienste, Gemeinden, Regierungsstellen, etc.), angepasst auf die definierten Einwirkungsszenarien	Nr. 48 Disziplinübergreifende Schulungen, deren Lehrplan multidisziplinäre kritische Management- und Reaktion-/Reparaturdienste umfasst	Nr. 49 Regelmässige Wiederholung der Übungen, angepasst auf die definierten Einwirkungsszenarien	Nr. 50 Regelmässige Überprüfung der Übungen hinsichtlich ihrer Aktualität	Nr. 51 Erstellung von Business Continuity Plänen, welche alle identifizierten Gefährdungen/Risiken abdecken	Nr. 52 Erstellen von Plänen für Routen/Strukturen/Objekten, welche prioritär verwaltet und Instand gesetzt werden sollen?
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten						
	2 Notfallpläne						
	3 Wiederherstellungspläne					x	
	4 Interoperabilität	x					
	5 Humanressourcen (respond)						
	6 Humanressourcen (recover)						
	7 Aus-/Weiterbildung	x	x	x		x	
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)						
	9 Finanzen (recover)						
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)						
	11 Materielle Ressourcen (recover)						
	12 Kommunikationssysteme						
	13 Krisen-/ Notfallzentrum						
	14 Technische Einrichtungen						
	15 Alternative Routen						
	16 Kapazität alternative Routen						
	17 Redundanzen						

Dimension	Kriterien	Nr. 53 Erstellen von Wiederherstellungsplänen, welche detailliert Übergangsregelungen für beschädigte Anlage für verschiedene Einwirkungsszenarien, Trage-Richtlinien, etc. berücksichtigen	Nr. 54 Massnahmen zur beschleunigten Abwicklung von Baubewilligungen (Bürokratieabbau)	Nr. 55 Temporärer Austausch nicht funktionsfähiger Elemente	Nr. 56 Regelmässige Überprüfung und Anpassung der bestehenden Wiederherstellungspläne	Nr. 57 Regelmässige Überprüfung und Anpassung der bestehenden Business Continuity Pläne	Nr. 58 Sprinkleranlage im Tunnel
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten						
	2 Notfallpläne						
	3 Wiederherstellungspläne	x	x	x	x	x	
	4 Interoperabilität						
	5 Humanressourcen (respond)						
	6 Humanressourcen (recover)						
	7 Aus-/Weiterbildung						
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)						
	9 Finanzen (recover)						
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)						
	11 Materielle Ressourcen (recover)						
	12 Kommunikationssysteme						
	13 Krisen-/ Notfallzentrum						
	14 Technische Einrichtungen						x
	15 Alternative Routen						
	16 Kapazität alternative Routen						
17 Redundanzen							

Dimension	Kriterien	Nr. 59	Nr. 60	Nr. 61	Nr. 62	Nr. 63	Nr. 64
ORGANISATORISCH	1 Verantwortlichkeiten						
	2 Notfallpläne						
	3 Wiederherstellungspläne						
	4 Interoperabilität						
	5 Humanressourcen (respond)						
	6 Humanressourcen (recover)						
	7 Aus-/Weiterbildung						
WIRTSCHAFTLICH	8 Finanzen (respond)						
	9 Finanzen (recover)						
PHYSISCH/TECHNISCH	10 Materielle Ressourcen (respond)						
	11 Materielle Ressourcen (recover)						
	12 Kommunikationssysteme						
	13 Krisen-/ Notfallzentrum						x
	14 Technische Einrichtungen	x	x	x	x	x	
	15 Alternative Routen						
	16 Kapazität alternative Routen						
17 Redundanzen							



Zielgröße	Funktion	Indikator	Beschreibung	Bewertungsskala: ΔF	Bewertungsskala: ΔT
WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE	Betriebskosten	Beförderungs- bzw. Transportkosten im Personen und Güterverkehr	Abhängig von Länge der Routen im Netz und den Reisezeiten	<p>3 - Die Maßnahme senkt die Beförderungs- und Transportkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme senkt die Beförderungs- und Transportkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme senkt die Beförderungs- und Transportkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Beförderungs- und Transportkosten respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme erhöht die Beförderungs- und Transportkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme erhöht die Beförderungs- und Transportkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme erhöht die Beförderungs- und Transportkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p>	<p>3 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beförderungs- und Transportkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beförderungs- und Transportkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beförderungs- und Transportkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Dauer der Wiederherstellung respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beförderungs- und Transportkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beförderungs- und Transportkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beförderungs- und Transportkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80% oder erhöht die Beförderungs- und Transportkosten dauerhaft.</p>
	Innertliche Trennwirkung	Wartezeit Fussgänger zur Querung von Straßen (bei unterschiedlichen Verkehrsbelastungen in Siedlungen)	Abhängig von Routenverlauf durch Ortschaften im Netz (Wird Ortschaft durchschnitten und Verkehrsbelastungen wenn ja wo und wie?)	<p>3 - Die Maßnahme verkürzt die Wartezeit im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme verkürzt die Wartezeit im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme verkürzt die Wartezeit im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Wartezeit respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme verlängert die Wartezeit im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme verlängert die Wartezeit im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme verlängert die Wartezeit im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p>	<p>3 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Wartezeit im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Wartezeit im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Wartezeit im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Dauer der Wiederherstellung respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Wartezeit im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Wartezeit im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Wartezeit im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80% oder erhöht die Wartezeit dauerhaft.</p>
	Wertschöpfungseffekte	Gesamtwirtschaftliche Kosten	Abhängig von potenziellen Produktionsausfällen und Arbeitsplatzeffekten	<p>3 - Die Maßnahme reduziert die gesamtwirtschaftlichen Kosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme reduziert die gesamtwirtschaftlichen Kosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme reduziert die gesamtwirtschaftlichen Kosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die gesamtwirtschaftlichen Kosten respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme erhöht die gesamtwirtschaftlichen Kosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme erhöht die gesamtwirtschaftlichen Kosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme erhöht die gesamtwirtschaftlichen Kosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p>	<p>3 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der gesamtwirtschaftlichen Kosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der gesamtwirtschaftlichen Kosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der gesamtwirtschaftlichen Kosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Dauer der Wiederherstellung respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der gesamtwirtschaftlichen Kosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der gesamtwirtschaftlichen Kosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der gesamtwirtschaftlichen Kosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80% oder erhöht die Wartezeit dauerhaft.</p>

Zielgröße	Funktionalität	Indikator	Beschreibung	Bewertungsskala: ΔF	Bewertungsskala: Δt
VERKEHRS-SICHERHEIT	Unfallkosten aus dem Verkehrsgeschehen	Veränderung der Unfallkosten aus dem Verkehrsgeschehen (Personen- und Sachschäden)	Abhängig von Exposition (Anzahl Fahrzeuge auf Ausweichroute und Länge)	<p>3 - Die Maßnahme senkt die Unfallkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme senkt die Unfallkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme senkt die Unfallkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Unfallkosten respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme erhöht die Unfallkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme erhöht die Unfallkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme erhöht die Unfallkosten im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p>	<p>3 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Unfallkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Unfallkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Unfallkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Dauer der Wiederherstellung respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Unfallkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Unfallkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Unfallkosten im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80% oder erhöht die Unfallkosten dauerhaft.</p>
UMWELT	Luftschadstoffemissionen und Treibhausgasemissionen	Fahrleistung	Abhängig von Weglänge und Geschwindigkeit	<p>3 - Die Maßnahme senkt die Fahrleistung im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme senkt die Fahrleistung im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme senkt die Fahrleistung im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Fahrleistung respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme erhöht die Fahrleistung im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme erhöht die Fahrleistung im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme erhöht die Fahrleistung im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p>	<p>3 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Dauer der Wiederherstellung respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80% oder erhöht die Fahrleistung dauerhaft.</p>
UMWELT	Lärmbelastung	Fahrleistung innerorts	Abhängig von Anzahl Fahrzeuge und Geschwindigkeit	<p>3 - Die Maßnahme senkt die Fahrleistung innerorts im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme senkt die Fahrleistung innerorts im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme senkt die Fahrleistung innerorts im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf Fahrleistung innerorts respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme erhöht die Fahrleistung innerorts im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme erhöht die Fahrleistung innerorts im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme erhöht die Fahrleistung innerorts im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p>	<p>3 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung innerorts im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung innerorts im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung innerorts im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Dauer der Wiederherstellung respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung innerorts im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung innerorts im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Fahrleistung innerorts im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80% oder erhöht die Fahrleistung innerorts dauerhaft.</p>

Zielgröße	Funktionalität	Indikator	Beschreibung	Bewertungsskala: AF	Bewertungsskala: AT
UMWELT	Beeinträchtigung durch das Bauwerk	Einschätzung, z. B. aufgrund von Einträge ins Gewässer, umweltfreundliche Baustoffe (Brand), Lage des Objekts	Abhängig von Maßnahme – Einfluss netzweit, ereignisunabhängig	<p>3 - Die Maßnahme reduziert die Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme reduziert die Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme reduziert die Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Beeinträchtigung durch das Bauwerk respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme erhöht die Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme erhöht die Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme erhöht die Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p>	<p>3 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Dauer der Wiederherstellung respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung der Beeinträchtigung durch das Bauwerk im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80% oder beeinträchtigt die Beeinträchtigung dauerhaft.</p>
	Landschafts- und Ortsbild	Abhängig von Maßnahme – Einfluss netzweit, ereignisunabhängig	<p>3 - Die Maßnahme verbessert das Landschafts- und Ortsbild im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme verbessert das Landschafts- und Ortsbild im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme verbessert das Landschafts- und Ortsbild im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf das Landschafts- und Ortsbild respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme verschlechtert das Landschafts- und Ortsbild im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme verschlechtert das Landschafts- und Ortsbild im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme verschlechtert das Landschafts- und Ortsbild im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p>	<p>3 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung des Landschafts- und Ortsbilds im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80%.</p> <p>2 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung des Landschafts- und Ortsbilds im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>1 - Die Maßnahme verkürzt die Dauer bis zur Wiederherstellung des Landschafts- und Ortsbilds im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>0 - Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Dauer der Wiederherstellung respektive die Auswirkung ist kleiner 20%.</p> <p>-1 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung des Landschafts- und Ortsbilds im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 20%.</p> <p>-2 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung des Landschafts- und Ortsbilds im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 50%.</p> <p>-3 - Die Maßnahme verlängert die Dauer bis zur Wiederherstellung des Landschafts- und Ortsbilds im Ausgangszustand (vor dem Ereignis) im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme um mehr als 80% oder beeinträchtigt das Landschafts- und Ortsbild dauerhaft.</p>	

# A5 Maßnahmenbeurteilung im Anwendungsbeispiel

Resilienzwirkung System:		2.02		WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE										VERKEHRS-SICHERHEIT		UMWELT								
Resilienzwirkung Zielgröße:		1.95		Reisezeit		Kapazitätsreserven		Betriebskosten Fahrzeuge		Wertschöpfungseffekte		Innerörtliche Trennwirkung		Unfallkosten		Luftschadstoffe		Lärmbelastung		Beeinträchtigung durch Bauwerk				
<i>Maßnahme 1a: Kurze Umfahrung</i>	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$
<b>Gesamtsystem</b>	3	0	3	3	0	3	3	0	3	0	0	3	3	0	3	3	0	3	3	0	3	3	0	3
Kritisches Objekt 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kritisches Objekt 2	3	0	3	3	0	3	3	0	3	0	0	3	3	0	3	3	0	3	3	0	3	3	0	3
Kritisches Objekt 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kritisches Objekt 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kritisches Objekt 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kritisches Objekt 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kritisches Objekt 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kritisches Objekt 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kritisches Objekt 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kritisches Objekt 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		3.00		3.95										6.00		0.50								

Resilienzwirkung System:		4.04		WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE										VERKEHRS-SICHERHEIT		UMWELT								
Resilienzwirkung Zielgröße:		3.95		Reisezeit		Kapazitätsreserven		Betriebskosten Fahrzeuge		Wertschöpfungseffekte		Innerörtliche Trennwirkung		Unfallkosten		Luftschadstoffe		Lärmbelastung		Beeinträchtigung durch Bauwerk				
<i>Maßnahme 1b: Lange Umfahrung</i>	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$	$\Delta F$	$\Delta t$	$\Sigma$
<b>Gesamtsystem</b>	6	0	6	6	0	6	10	0	10	0	0	-5	6	0	6	10	0	10	-5	0	-5	-3	-3	-6
Kritisches Objekt 1	2	0	2	1	0	1	3	0	3	0	0	-1	2	0	2	3	0	3	-1	0	-1			
Kritisches Objekt 2	2	0	2	1	0	1	3	0	3	0	0	-1	2	0	2	3	0	3	-1	0	-1			
Kritisches Objekt 3	2	0	2	1	0	1	3	0	3	0	0	-1	2	0	2	3	0	3	-1	0	-1			
Kritisches Objekt 4	0	0	0	3	0	3	1	0	1	0	0	-2	0	0	0	1	0	1	-2	0	-2			
Kritisches Objekt 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Kritisches Objekt 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Kritisches Objekt 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Kritisches Objekt 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Kritisches Objekt 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Kritisches Objekt 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		6.00		3.95										6.00		0.70								



## A6 Gefährdungskatalog des schweizerischen Bundesamts für Bevölkerungsschutz (BABS)

### Naturbedingte Gefährdungen

Gefährdung	Vergleichbare Ereignisse oder Entwicklungen sowie Erläuterungen
<b>Hydrologische / meteorologische Naturgefahren</b>	
Unwetter ( <i>Starkregen, Gewitter, Blitzschlag, Murgang</i> )	Döttingen, 2007; Murgang, Brienz, 2005; Mitteleuropa, 2002; Gewittersturm «Lea», BS, BL, SO, VD, ZH, Juli 1992; Westschweiz, Innerschweiz, Rheintal, August 1986; Tessin, 1983 (vgl. KATARISK-Dokumentation)
Hagelschlag	Laupen, 1999; Luzern, 1998; München (DE), Juni 1984; Inneringen (DE), 1853 (vgl. KATARISK-Dokumentation)
Starker Schneefall	Schweiz, Winter 1999/2000 (vgl. KATARISK Dokumentation)
Starke Eisbildung	Genf/Versoix, Februar 2005
Sturm */**	Lothar, Mitteleuropa, 1999; Vivian/Wiebecke, Schweiz, 1990 (vgl. KATARISK-Dokumentation und ABCN-Referenzszenario N3)
Hochwasser */**	Hochwasser, Schweiz, 2007, 2005, 2000, 1910, 1852, 1570; Elbe (DE/CZ), 2002 (vgl. KATARISK Dokumentation und ABCN-Referenzszenario N2)
Kältewelle	Eissturm, USA/Kanada, 1998; Schweiz, 1985 (vgl. KATARISK-Dokumentation)
Trockenheit *	USA, 2012, 1980; Schweiz, 2011, 2003, 1976, 1947, 1540 (vgl. KATARISK Dokumentation)
Hitzewelle	Schweiz, Sommer 2003, 1947; USA, 1980 (vgl. KATARISK-Dokumentation)
Waldbrand	Visp, April 2011; Leuk, 2003; Tessin/Misox 1997; Lüneburger Heide (DE), 1975

Zu den mit \* markierten Gefährdungen liegt ein entsprechendes Gefährdungsdossier vor, welches bei [risk-ch@babs.admin.ch](mailto:risk-ch@babs.admin.ch) bezogen werden kann.

Zu den mit \*\* markierten Gefährdungen liegt ein entsprechendes ABCN-Referenzszenario vor, welches bei [laborspiez@babs.admin.ch](mailto:laborspiez@babs.admin.ch) bezogen werden kann.

Gefährdung	Vergleichbare Ereignisse oder Entwicklungen sowie Erläuterungen
------------	---

### Gravitative Naturgefahren

Schneelawine	Lawinenwinter Schweiz, 1999/2000, 1951; Galtür (AT), 1999 (vgl. KATARISK-Dokumentation)
Eislawine	Mattmark/Saas, 1965
Rutschung, Hangmure	Schweiz, 2005; Gondo, 2000; Falli Hölli, 1994 (vgl. www.planat.ch)
Stein- und Blockschlag, Fels- und Bergsturz	Gurtellen auf A2, 2006; Randa, 1991; Elm, 1881; Goldau, 1806; Villach (AT), 1348 (vgl. www.planat.ch)
Tsunami	Japan, März 2011; Thailand u.a., 2004; Lauerzersee, September 1806; Vierwaldstättersee, September 1601; Genfersee, 563 (vgl. www.planat.ch)

### Seismische Naturgefahren

Erdbeben */**	Emilia Romagna (IT), 2012; Christchurch (NZ), 2011; Haiti, 2010; L'Aquila (IT), 2009; Bam (IR), 2003; Kobe (JP), 1995; Visperstal, 1855; Basel, 1356 (vgl. auch KATARISK-Dokumentation und ABCN-Referenzszenario N1)
Vulkanausbruch	Volcano del Fuego (GT), September 2012; Eyjafjallajökull (IS), April 2010 (massive Einschränkung des Luftverkehrs in Europa); Pinatubo (PH), 1991; Mount St. Helens (USA), 1980; Vesuv (IT), 1906; Krakatau (ID), 1883; Tambora (ID), 1816; Laki (IS), 1783

### Durch Klimaveränderung induzierte Gefährdungen

Destabilisierung Schutzwälder	z.B. Föhrensterben Wallis
Destabilisierung Permafrostgebiete	z.B. Pontresina (Schutzbauten gegen Bergsturz u.a.)

Gefährdung	Vergleichbare Ereignisse oder Entwicklungen sowie Erläuterungen
------------	---

### Massenverbreitung von Schadorganismen

Massenverbreitung invasiver gesundheitsschädigender Arten	z.B. Ambrosia; Riesen-Bärenklau; Tigermücke
Massenverbreitung invasiver Arten, die zu wirtschaftlichen Schäden führen	z.B. Amaranth; Sonnenwend-Flockenblume, USA
Massenverbreitung invasiver Arten, die Biodiversität verringern	z.B. Drüsiges Springkraut; Japanischer Staudenknöterich; Sumpfkrebs
Massenverbreitung landwirtschaftlicher Schädlinge	z.B. Heuschrecken; Kartoffelkäfer; Rapsglanzkäfer
Massenverbreitung forstwirtschaftlicher Schädlinge	Borkenkäfer, Kanada, 2008; Borkenkäfer-Kalamitäten nach Stürmen, Schweiz, 1999, 1990
Zunahme von Pflanzenkrankheiten in der Landwirtschaft	z.B. Kartoffel, Kraut- und Knollenfäule; Kernobst, Feuerbrand; Steinobst, Scharka-Krankheit; Weinrebe, Falscher Mehltau
Zunahme von Pflanzenkrankheiten im Wald	z.B. Hallimasch; Ulmenkrankheit; Wurzelschwamm

### Andere naturbedingte Gefährdungen

Meteoriteneinschlag	Tscheljabinsk, Ural, 2013; Twannberg, Twann, 1984; Allende, Mexiko, 1969; Tunguska, Sibirien, 1908
Sonnensturm ( <i>magnetischer Sturm</i> )	Störung Telekomsatellit, Kanada, 1994; weltweite Lahmlegung des Telegrafennetzes, 1859
Bodenerosion	Schleichende Entwicklung (z.B. Wasser- und Winderosion), bisher keine schwerwiegenden Ausprägungen in der Schweiz

**Technikbedingte Gefährdungen**

Gefährdung	Vergleichbare Ereignisse oder Entwicklungen sowie Erläuterungen
<b>Grossunfälle Verkehr</b>	
Absturz Luftfahrtobjekt ( <i>Flugzeuge, Helikopter, Satelliten usw.</i> )	MIR, 2001; Crossair, Bassersdorf, 2001; Swissair-Flug 111, Halifax (CA), 1998; Amsterdam (NL), 1992; Skylab, 1979
Unfall Personenzug	Mals-Meran (IT), 2010; Glacier Express, 2010; Zimmerbergtunnel, Zürich, 2006; Valencia (ES), 2006; Eschede (DE), 1998; Däniken, 1994; Hirschengrabentunnel, Zürich, 1991
Gefahrgutunfall Schiene **	Flüssiggas, Viareggio (IT), 2009; Chlor, South Carolina (USA), 2005; Benzin, Zürich-Affoltern, 1994; Epichlorhydrin, Lausanne, 1994; Benzin, Stein-Säckingen, 1991 (vgl. auch ABCN-Referenzszenario C1: Anschlag/Unfall auf/mit Transport (Tankwagen mit Chlor))
Strassenverkehrsunfall	Massenkarambolage A9 bei Lausanne, 2008; A1 bei Niederbipp, 2003; Unfall/Brand, Gotthardtunnel, 2001; Tauerntunnel (AT), 1998
Gefahrgutunfall Strasse *	Benzin, Zürich, 1998; Benzin, Herborn (DE), 1987; Propylengas, Los Alfaques (ES), 1978
Unfall Passagierschiff	Übung REGIOCAT, Basel, 2006; London (GB), 1989; Köln (DE), 1975
Gefahrgutunfall Wasser	Dormagen (DE), 1999; Ludwigshafen (DE), 1970
Seilbahnunfall	Hubschrauber verliert angehängte Last, Sölden (AT), 2005; Brand im Tunnel, Kaprun (AT), 2000; Kampfflugzeug durchtrennt Tragseil, Cavalese (IT), 1998, 1976; Riss Drahtseil, Tiflis, 1990; Zugseilriss, Bettmeralp, 1972

**Störfälle / Unfälle in Produktions- und Speicheranlagen**

Störfall A-Betrieb/-Anlage	z.B. in Wiederaufbereitungsanlagen, Zwischen- und Endlagern oder Forschungslabors
Störfall B-Betrieb/-Anlage	z.B. Biosafety Labors Level 3 und 4
Störfall C-Betrieb/-Anlage *	Ölverunreinigung, Fluss Lambro (IT), 2010; Schweizerhalle, Basel, 1986; Bophal (IN), 1984; Seveso (IT), 1976 (vgl. ABCN-Referenzszenario C2: Unfall in stationärer Anlage eines chemischen Betriebs)
Störfall konventioneller Betrieb/Anlage	Explosion einer Erdölpipeline, Hafenstadt Dalian (CN), 2010
KKW-Unfall Inland	Lucens, 1969 (vgl. ABCN-Referenzszenario A1)
KKW-Unfall Ausland	Fukushima (JP), März 2011; Tschernobyl (UA), April 1986, Three Miles Island (USA), 1979; Windscale (GB), 1957
Versagen Stauanlage	Bruch Staudamm, Bogatynia (PL), August 2010; Bruch Staumauer, Baschkortostan (RU), 1994; Bruch Staudamm, Qinghai (CN), 1993
Überlaufen Stauanlage	Wasserablassen als Schutz vor Überlaufen, Saastal, 1989; Beinahe-Unfall, Palagnedra-Stausee, 1978
Überschwappen Stauanlage	Tal des Vajont Longarone (IT), 1963

Gefährdung	Vergleichbare Ereignisse oder Entwicklungen sowie Erläuterungen
------------	---

### Schadensereignisse bei Bauwerken

Brand/Explosion Gebäude	Flims, 2006; Kaufhausbrand, Ormoc (PH), 2006; Bern Nordring, 1998; Brand TELA AG, Niederbipp, 1996; Lissabon (PT), 1988
Versagen/Einsturz Gebäude	Stadtarchiv, Köln (DE), 2009; Turnhalle, St. Gallen, 2009; Eisstadion, Bad Reichenhall (DE), 2006; Hallenbad, Moskau (RU), 2004; Tiefgarage, Gretzenbach, 2004; Hallenbad, Uster, 1985
Brand Kunstbau	Putzlitiz-Brücke, Berlin (DE), 2008
Versagen/Einsturz Kunstbau	Makaham-Brücke, Indonesien, 2011; Autobahnbrücke, Minneapolis (USA), 2007
Versagen/Einsturz Schutzinfrastruktur	Dämme/Lawinenverbauungen, Gondo, 2000

### Ausfälle von Versorgungs-, Verkehrs- und Informationsinfrastrukturen

Ausfall Logistikzentrum	Evakuierung Briefzentrum, Mülligen, 2012; z.B. Post; Grossverteiler (längere Betriebsunterbrüche)
Ausfall Stromversorgung *	Lausanne, 2010; Sydney (AU), 2009; Zürich Nord, 2009; SBB, 2005; Münsterland (DE), 2005; Ostküste USA, 2003; Italien, 2003
Ausfall Verteilinfrastruktur Erdölprodukte	Bruch einer Erdölpipeline, Dalian (CN), 2010
Ausfall Verteilinfrastruktur Gas	z.B. Pipelines
Ausfall Verteilinfrastruktur Wasser	Zusammenbruch Wasserversorgung infolge Hurrikan «Alex», Mexiko, 2010
Ausfall Informations- und Kommunikationsinfrastruktur	Ausfall Kommunikationsnetz der Regierung, Deutschland, 2004; Ausfall Mobilfunknetz, Grossraum Frankfurt (DE), 2003; Mobilfunknetz, Schweiz, 2002
Ausfall von GPS-Systemen	Unterbruch oder Einschränkung von GPS-Signalen
Ausfall Fluginfrastruktur	Flughafen, Tokio (JP), 2007; Ausfall Skyguide, 2003
Ausfall Bahninfrastruktur	Stellwerkstörung, Zürich, 2010; Ausfall Bahnstrom SBB, 2005; Unwetter, Schweiz, 2005; Ausfall Stellwerk, Hamburg-Altona (DE), 1995
Ausfall Strasseninfrastruktur	Sperrung A2, Gurtellen, 2006; Sperrung Gotthard-Strassentunnel, 2001; Sperrung A2 Gotthard nach Unwetter, 1987
Einschränkung Wasserweg	Rhein-Niedrigwasser, 2003, 1985, 1947; Rhein-Hochwasser, 1999, 1993

## Gesellschaftsbedingte Gefährdungen

Gefährdung	Vergleichbare Ereignisse oder Entwicklungen sowie Erläuterungen
<b>Krankheiten von Mensch und Tier</b>	
Epidemie/Pandemie ( <i>Infektionskrankheit Mensch</i> ) */**	Influenza A (H1N1), 2009; Masern, Schweiz, 2008/2009; Influenza A (H5N1), 2003; SARS, 2003; Spanische Grippe, 1918-1920; Noro- oder Ebola-Virus; Resistenz gegen Medikamente (z.B. Antibiotika); Influenzapandemie; neue (Zoonose-) Pathogene aus Xenotransplantation; Tollwut (vgl. ABCN-Referenzszenario B4: Pandemie – neuer, bisher unbekannter Erreger; B5: Pandemie – Influenza)
Tierseuche */**	BSE; Blauzungenkrankheit; Maul- und Klauenseuche; Vogelgrippe (vgl. ABCN-Referenzszenario B6: Tierseuche (MKS))
Populationsrückgang durch Umwelteinflüsse bei Nutztier/Nützlichling	z.B. Bienensterben
Verunreinigung von Lebensmitteln	Lebensmittel in Mensa, Berlin (DE), 2012; EHEC-verseuchte Sprossen, Deutschland, 2011; Milch, China, 2008; «Gammelfleisch» (D), 2005/2006
Verunreinigung Trinkwasser	Kolibakterien, La Neuveville, 1998
<b>Politische Ereignisse oder Entwicklungen</b>	
Flüchtlingsschwelle *	Arabischer Frühling, 2011/2012; Kosovo-Konflikt, 1998/1999; Jugoslawien-Konflikt, 1991-1994
Politischer Druck/Erpressung Ausland	«Steuerparadies Schweiz», 2009; Libyen, 2008-2010; Nachrichtenlose Vermögen, 1996-1999
Bedrohung schweizerischer Interessen im Ausland	Piraterie vor Somalia 2008/2009; Botschaftsschutz; Druck auf Schweizer Firmen
Innere Unruhen	England, August 2011; Griechenland, 2008; Paris (FR), 2005; ethnische Konflikte, gewalttätige Auseinandersetzungen (z.B. Anschläge PKK)
Sonstige Unruhen	«Saubannerzug» Zürich, 2010; z.B. Hooliganismus

Gefährdung	Vergleichbare Ereignisse oder Entwicklungen sowie Erläuterungen
------------	---

### Versorgungsengpässe

Versorgungsengpass Strom	Haiti, 2010-2012; Südafrika, 2008/2009
Versorgungsengpass Gas	Gasstreit Russland-Ukraine, 2008
Versorgungsengpass Erdölprodukte	Ölkrise, 1979,1973
Versorgungsengpass Nahrungsmittel	«Tortilla-Krise», Mexiko, 2008; Erhöhung Nahrungsmittelpreise, 2008; vermehrte Produktion von Biofuel
Versorgungsengpass Wasser	z.B. KKW-Unfall in Grenznähe mit Niederschlag auf die Schweiz; verschmutzte Quellen oder Grundwasser
Versorgungsengpass Personal Gesundheitswesen	z.B. bedingt durch demografischen Wandel
Versorgungsengpass Medikamente	Grippe-Impfstoff, Schweiz, 2012; z.B. Tamiflu

### Entsorgungsengpässe

Entsorgungsengpass normaler Abfall	Neapel (IT), 2007 / 2008; Stuttgart (DE), 2006
Entsorgungsengpass Abwasser	Versagen/Überlastung von Kläranlagen, Aargau, 2008
Entsorgungsengpass Sondermüll (radioaktiv, Gifte, Altlasten)	z.B. Deponie Kölliken; Endlagerung radioaktiver Abfälle

Gefährdung	Vergleichbare Ereignisse oder Entwicklungen sowie Erläuterungen
------------	---

### Kriminalität / Terrorismus

Organisierte Kriminalität	z.B. Erpressung, Menschenhandel, Drogenhandel, IT
Wirtschaftskriminalität und -spionage	Fall Lopez VW, Deutschland, 1996; Fall Rey, Schweiz, 1991; z.B. staatliche Spionage
Amoklauf	Finnland, 2012, 2008, 2007; Winnenden (D), 2009; Zug, 2001; Columbine (USA), 1999
Entführung/Geiselnahme	Ingrid Betancourt, 2002; Aldo Moro, 1978; H. M. Schleyer RAF, Deutschland, 1977; Flugzeugentführungen: Mogadischu (SO), 1977; Richard Oetker, Deutschland, 1976; Zarqa (JO), 1970
Cybercrime	Proliferation Fall Tinner, Schweiz, 2004; z.B. Datenklau oder -missbrauch, Phishing
Konventioneller Anschlag	Boston (USA), 2013; Oslo (NO), 2011; London (GB), 2005; Madrid (ES), 2004; Anschlag U-Bahn, Moskau (RU), 2004; Kulturpalast, Moskau (RU), 2002; Anschlag Bahnhof, Bologna (IT), 1980
A-Anschlag */**	z.B. «Dirty Bomb» (vgl. ABCN-Referenzszenario A2: «Dirty Bomb» (spontane Freisetzung von Radioaktivität mit Kontamination); A4: Anschlag auf einen Transport mit hochradioaktiven Abfällen)
B-Anschlag **	Anthrax-Briefe, 2001; z.B. auch mit Pocken, Ricin oder anderen Erregern (vgl. ABCN-Referenzszenario B1: Anschlag über Lebensmittel mit B-Toxin; B2: Anschlag mit hochansteckenden Viren; B3: Anschlag mit Anthrax)
C-Anschlag */**	Sarin-Anschlag, Tokio (JP), 1995; z.B. auch mit Blausäure, Anschlag/Sabotage C-Betriebe oder Gefahrguttransporte mit C-Substanzen (vgl. ABCN-Referenzszenario C1: Anschlag/Unfall auf/bei Transport; C3: C-Terror (Anschlag mit hochgiftiger Chemikalie); C4: C-Terror (Anschlag mit C-Kampfstoff))
E-Anschlag	z.B. Angriff mit Mikrowellen-Waffen
Cyber-Angriff *	DDoS-Attacke PostFinance, Schweiz, 2010; Lahmlegen von Servern; SPAM-Attacken

### Bewaffnete Konflikte

Militärischer Angriff **	(vgl. ABCN-Referenzszenario A3: A-Waffenexplosion in Grenznähe; C5: Fernwaffenangriff auf die Schweiz)
--------------------------	--

### Andere gesellschaftlich bedingte Gefährdungen

Massenpanik	Loveparade, Duisburg (DE), 2010; Heysel-Stadion (BE), 1985; z.B. bei Grossanlässen (div. Ereignisse in Mekka (SA))
Generalstreik	Schweiz, 1918
Sektoriieller Streik	Flugbegleiter/Bodenpersonal Lufthansa, Deutschland, 2012; Lokführer Deutsche Bahn, 2008; Milchbauern, Schweiz, 2008

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

## 2016

**B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung**  
Geißler, Krohn € 15,50

**B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**  
Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**  
Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**  
Mielecke, Graubner, Roth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden**  
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

**B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden**  
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

**B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen**  
Schmellekamp  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags**  
Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 131: Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus**  
Schmidt-Thrö, Mielecke, Jungwirth, Graubner, Fischer, Kuhlmann, Hauf  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke**  
Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit**  
Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erhaltungskonzepte von Straßenbrücken**  
Gehrlein, Lingemann, Jungwirth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2017

**B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**  
Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**  
Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton**  
Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

**B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken**  
Mayer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie**  
Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

**B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5**  
U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourastad  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln**  
Moormann, Buhmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken**  
Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

**B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**  
Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

**B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**  
Neumann, Brauer € 16,50

**B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband**  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2019

**B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen**  
Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2020

**B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden**

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

**B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit**

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

**B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke**

Keßler, Gehlen € 16,00

**B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze**

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheuffler, Zilch, Tecusan  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken**

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

**B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens**

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

**B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

**B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern**

Friedrich € 9,00

**B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken**

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

**B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten**

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 157: 9. BASt-Tunnelsymposium – Tagungsband**

€ 16,00

**B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags**

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems**

Lehardt, Seiler, Gerdes € 15,50

## 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.

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.