

Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 166

bast

Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

von

Jörg Finger
Alexander Stolz

Mit Beiträgen von:

Kai Fischer
Sandra Hasenstein
Tassilo Rinder

Das Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik
Ernst-Mach-Institut, EMI
Freiburg

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 166

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 15.0627
Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen 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

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-584-2

Bergisch Gladbach, Juni 2021

Kurzfassung – Abstract

Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

Eine zuverlässig funktionierende Verkehrsinfrastruktur stellt eine essenzielle Voraussetzung der öffentlichen Sicherheit dar. Dabei ist es entscheidend, dass die Infrastruktur insbesondere dann zur Verfügung steht, wenn Ereignisse den Einsatz von Notfall- und Rettungsorganisationen erforderlich machen. Neben der Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur ist es wichtig, dass von dieser keine Gefährdungen für ihre Benutzer ausgehen und die Sicherheit auch bei Eintritt eines außergewöhnlichen Ereignisses gewährleistet bleibt.

Disruptive Ereignisse können die Sicherheit und Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur erheblich beeinträchtigen und der lokale Ausfall eines Objekts kann zu unerwünschten Kaskadeneffekten für eine ganze Region führen. Dieser Umstand erfordert eine Abschätzung möglicher Schwachpunkte, um an geeigneter Stelle eine Optimierung vorzunehmen, sodass ein betrachtetes System bestmöglich auf Störereignisse vorbereitet ist und Störungen hinreichend gut verkraftet werden.

Hierzu ist es insbesondere von Bedeutung, nicht nur Verwundbarkeiten der Strukturen zu identifizieren, sondern auch deren Regenerationszeiten zu betrachten. Das ermöglicht eine Bewertung der Signifikanz eines eingetretenen Schadens auch im Hinblick auf eine zeitliche Komponente. Als Betrachtungswerkzeug wird das auf dem allgemeinen Resilienzansatz aufbauende, neu etablierte »Resilience Engineering« in dieser Studie herangezogen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird die Machbarkeit der Resilienzbewertung von Verkehrsinfrastruktur untersucht. Nach eingehender Sichtung vorhandener Ansätze wird ein Konstrukt erarbeitet, das die Bewertung von Straßennetzen bis hin zu einzelnen Objekten ermöglicht. Neben der Charakterisierung zu erwartender Schäden werden auch Maßzahlen zur Bewertung Wiederherstellung abgeleitet, so dass die Verkehrsinfrastruktur nachhaltig in Hinblick auf zukünftige disruptive Ereignisse, wie beispielsweise Extremwetter durch den Klimawandel, adaptiert werden kann.

Methods and models for quantifying the availability and safety of elements of the road infrastructure in the event of exceptional events

A reliable functioning infrastructure for transport is an essential part for social and economic aspects as well as the public safety. Examples are the private individual transport, the transport of goods or the accessibility during rescue operations. Especially the field of public safety requires a functioning system, if adverse events makes the use of emergency and rescue organizations necessitate. Besides the availability of transport infrastructure, it is essential to use these traffic elements without suffering harm, especially if an extreme event occurs.

Safety-critical events could adversely affect the availability of transport infrastructure elements and the local failure of an object can produce unexpected regional cascading effects. This circumstance requires the analysis of weak points to apply potential counter measures, to prepare the investigated system optimally and increase the coping capacity.

Beside the identification of vulnerabilities, it is essential to assess the regeneration and recovery process, which enables the expected loss evaluation over time. Within this study, the method of resilience engineering is applied to consider the mentioned aspects.

The feasibility of the resilience assessment of traffic infrastructure is investigated within the current study. After a detailed overview concerning the state-of-the-art, a new approach is developed to evaluate the road network down to single objects, like bridges for example. Besides the analysis of expected losses, the new method derives quantities to assess the recovery process. The new assessment scheme results in a sustainable development to increase the coping capacity of traffic infrastructure elements to tolerate disruptive events, like extreme weather based on the climate change.

Summary

Methods and models for quantifying the availability and safety of elements of the road infrastructure in the event of exceptional events

1 Introduction

An available and reliable road infrastructure is required in order to maintain individual traffic and transport of goods. Bridges and tunnels are important road infrastructure facilities due to their function as connecting elements and therefore represent critical assets. Extreme events, such as natural disasters or major accidents, can lead to damage or even structural failure of the road infrastructure facilities. The consequences can be enormous reconstruction costs and long out of service time, which cause substantial economic damages. The safety of infrastructure facilities must also be provided for all road users during the occurrence of extreme events, which are defined as events going beyond the regular design-relevant requirements of the existing code of practice. Such events, as heavy storms, had a significant negative impact on the safety and availability of road infrastructure in Germany during the spring of 2016. In North-Western Mecklenburg traffic obstruction caused by heavy rainfall and overturned trees were reported after the occurrence of heavy storms. At several locations the traffic on federal highways came partially to a standstill, see ECKERMANN (2016). In North Rhine-Westphalia road barriers and traffic disruption was reported due to a flooded tunnel and a landslide caused by heavy storms as reported by TREß (2016). Due to increased presence of heavy storms in 2016, the German Parliament concerned with this special issue. The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB) decided that these events are no longer isolated and considers them as a consequence of climate change, see German Parliament (2016). The events demonstrate that the safety and availability of the German transport infrastructure cannot always be ensured during the presence of extreme events. Restrictions of the road availability were noticeable in the affected areas for several days. The safety of

road users can also be endangered by, for example, landslides or undercutting of bridge piers which reduce the loading capacity of bridges or if vehicles get stuck in flooded underpasses with their occupants.

The research presented in this paper focuses on the quantification and prognosis of the availability and safety of road infrastructure during extreme events. It presents the first results of the implementation of Resilience Engineering to road infrastructure in order to verify the adequacy of this approach for the evaluation and optimization of availability and safety. For this purpose, it is particularly important not only to identify vulnerabilities of the structures, but also to consider their regeneration times up to partial or complete recovery. Essential component of this assessment is the measurement of the resilience and the vulnerability at different levels (object and network level) in order to predict the infrastructure behavior during the presence of an extreme event. At object level the structural and operational condition of each individual infrastructure is investigated by a vulnerability analysis while at network level the function and relevance of the structure in the network is evaluated through a criticality analysis. In order to ensure the availability and safety existing measures, such as warning systems for wind on bridges or fire detectors in tunnels, are being considered and will be integrated into the developed methodology. The final objective is the development of a holistic resilience approach that quantifies and predicts the availability and safety of road infrastructure in extreme events in order to identify future hot spots in the road network with the need for further action. In order to achieve an improvement in resilience, a holistic assessment of the road infrastructure is necessary regarding the ability to minimize damage caused by extreme natural and man-made events and to get the road network back into operation quickly after the event.

2 The resilience engineering approach

Extreme weather events, natural hazards and human or technical failures and deliberate acts can seriously damage road infrastructure facilities or affect its functioning. Nowadays, it is not possible to predict in detail whether and, if so, to what extent

extreme events will occur and what impact they will have on the infrastructure. However, the risk-based approaches commonly used in practice today require assumptions, which are insufficient for such complex system observation. In this case, an approach is required, which is scenario-independent and takes into account the system resilience as well as its reactive probabilities.

In 'Resilience Engineering' several analysis and evaluation levels are used which interfere with each other. The smallest unit is used to determine indicators that reflect specific system specifications. These indicators serve to determine the system properties. Such system properties are for example redundancy and robustness or also safety and reliability. These system properties are again combined into capabilities of the overall system. Robustness and redundancy, for example, strengthen the capabilities of the system to 'absorb' the negative impacts of events on the function of the overall system. The individual capabilities are aimed at strengthening the different dimensions of resilience. The difference between the dimensions could be a technical or organizational approach. An example of a hierarchical representation of infrastructure resilience indicators is given by BOLOGNA et al. (2016).

The holistic concept of resilience engineering described above allows the quantification of resilience by finding suitable resilience indicators to address the system properties like safety, availability and reliability. In addition, this approach also allows a constant enhancement in order to quantify and evaluate additional capabilities and features classified as relevant in the future.

The key objective of the holistic resilience approach is to take into account all resilience phases from the failure to the re-commissioning of the road infrastructure. As a result, it is necessary to consider the road infrastructure on object level as well as part of the entire network (network level) and to establish a useful link between both. In addition, the potential impacts of extraordinary events on road infrastructure are first defined and analyzed. The focus of the impact analysis lays on the system properties that are affected by these events and not scenario-based. Initially, specific events (the scenarios fire and flooding) are defined in order to analyze their impacts. The consideration of the impacts on the system properties leads to the fact that the safety and availability analysis is no longer necessarily

based on specific events, but the approach is largely independent of the scenario. In this way, impacts of several extraordinary events can be investigated at the same time. The limitations of the system properties caused by man-made or extreme natural events can be quantified by using, indicators for the measurement of the system properties in order to define the relevant input parameters (e.g. structural data, road traffic data). These indicators are also intended to enable a preselection or categorization of relevant structures by drawing up appropriate criteria. The defined indicators are used for the further development of existing processes in order to integrate them into the basic methodology of 'Resilience Engineering'. The final deliverable is a GIS-based software prototype, with which the developed methods and models can be demonstrated.

3 Quantification of road infrastructure safety and availability

3.1 Analysis on network level

To conduct an analysis of road transportation system on the network level it has to be represented as an abstract network or graph. According to BARABÁSI and PÓSFAL (2016) the terms network and graph are used interchangeably in the scientific literature although there are subtle differences. Networks with nodes and links between them usually refer to real systems like a telephone, social or transportation network. On the other hand the term graph with its vertices and edges between

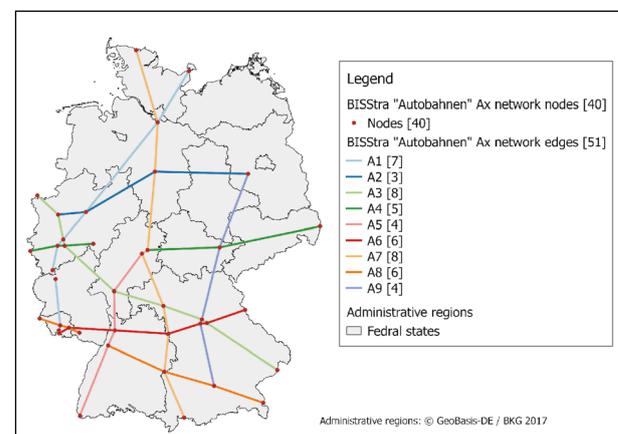


Fig. 3.1: Exemplary illustration of a subset of the German Autobahn network converted into a graph representation

them refers mostly to an abstract mathematical representation of the real network. In the following some basic concepts from graph theory relevant for our approach are explained.

A graph is an ordered pair $G = (V, E)$ comprising of a set V of n vertices (or nodes) and a set E of m edges (or links). Road networks are usually modeled by representing intersections as nodes and street segments between them as links. The degree of a vertex in a graph is the number of edges that are connected to it. In the case of an undirected graph the edges take the form of unordered pairs of vertices and are represented as lines between vertices in illustrations. In the case of a directed graph the edges take the form of ordered pairs of vertices and are represented as arrows in illustrations. In the context of road networks a one-way street is an example of a directed link. Furthermore in a weighted graph the edges have weights associated with them. In a road network these weights can for instance be geometric length or travel time associated with a link. In an unweighted graph the edges are not differentiated according to weights. The shortest path or geodesic path between two vertices is a path such that no shorter path exists, which means minimizing the sum of the weights of its constituent edges. To calculate the sum in the case of an unweighted graph all weights can be assumed to be equal to one.

In their review of recent research on vulnerability and resilience of transport systems MATTSSON and JENELIUS (2015) distinguish between topological and system-based vulnerability analysis of transport networks. In both cases the transport network is represented as an abstract graph. In the system-based analysis the networks are usually weighted where geometric lengths or travel times in the real system are represented as weights of the edges in the abstract graph representation.

The presented research relies mostly on a topological analysis but also incorporate further system attributes like the distance between nodes/length of a link for the calculation of centrality measures.

In network analysis and the mathematical field of graph theory the aim of centrality measures is to find the most important vertices in a network. Initially applied for the analysis of social networks, centrality measures have been used to identify key infrastructure nodes in transportation networks. For a review of centrality measures in social and

transportation networks the reader is referred to MISHRA et al. (2012). Some of the main centrality measures are introduced below (for a detailed introduction see NEWMAN (2015)):

- Degree centrality,
- Closeness centrality,
- Betweenness centrality.

The degree of a vertex in a graph is defined as the number of edges that are connected to it. Closeness centrality is a measure that not only considers the direct neighbors of a vertex. Instead it is defined as the average path length of the shortest path between a vertex and all the other vertices in the graph. Closeness centrality is applied to identify nodes that are “central” in a network. Betweenness centrality for a vertex in a graph measures how often the vertex lies along the shortest path between two other vertices in the graph. To calculate the betweenness centrality of a vertex v in a first step all the shortest paths between two other vertices s and t are computed. Then the fraction of these shortest paths that pass through v is identified. This fraction is then summed up for all pairs of vertices (s,t) in the graph. Examples of centrality measures with road network data are shown in section 4.

3.2 Analysis on object level

The road network is highly complex in nature and a resilience analysis requires a systematic approach. In alignment to KRÖGER and ZIO (2011), a critical infrastructure can be hierarchically classified to evaluate single components and their contribution to the whole system. Figure 3.2 shows this exemplary for the road network and the classification

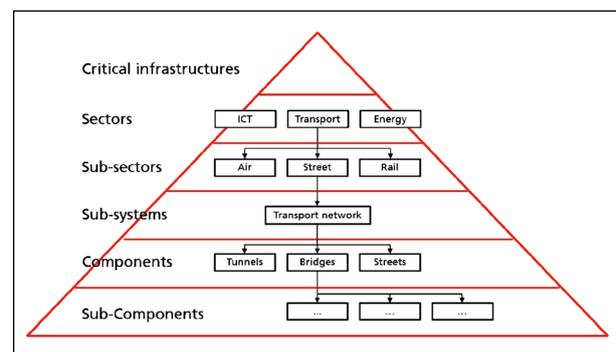


Fig. 3.2: Hierarchical classification of the transport network in alignment to KRÖGER and ZIO (2011)

of bridges. Single sub-components can have links through physical and logical relations and this classification allows a systematic analysis of weak spots.

To characterize the resilience on object level, a new framework is developed and a generalized overview is shown in figure 3.2. Different resilience management phases can be directly addressed with this framework, as indicated in green. The occurrence of a disruptive event (hazard) causes optional damage effects at the investigated object. The degree depends on the frequency, the intensity and the exposition to the hazard. Furthermore, constructional details determine the robustness or the degree of damage. The statistical occurrence quantifies constructional or dimensional properties of the object and the traffic load gives further contributions concerning the criticality. A small traffic load results in a small criticality, independent on the damage effects, for example.

A comprehensive overview of the German road network and its engineered structures, like bridges and tunnels, is given in the database SIB and the corresponding instruction ASB ING (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 2013). Currently, the database includes 39,231 bridges on federal level and 26,335 on federal state level. Each construction is categorized with certain attributes and builds the basis for a statistical evaluation of the resilience assessment on object level. For the current study, the statistical analysis includes the distribution depending on the system, construction type, length, span, age and the current state. This information is applied to derive weighting factors, which are included into the vulnerability analysis concerning the statistical occurrence. The left diagram figure 3.4 shows exemplary the statistical occurrence of dimensional parameter of bridges in Germany. Based on this information, a construction for the assessment scheme in figure 3.3 is derived, as shown in the right pictures figure 3.4.

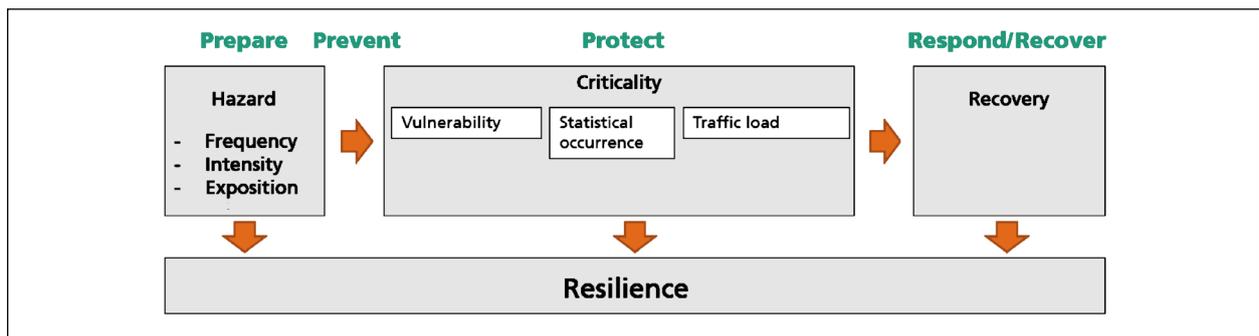


Fig. 3.3: Classification of the derived vulnerability quantities within the resilience framework for the evaluation of traffic network systems

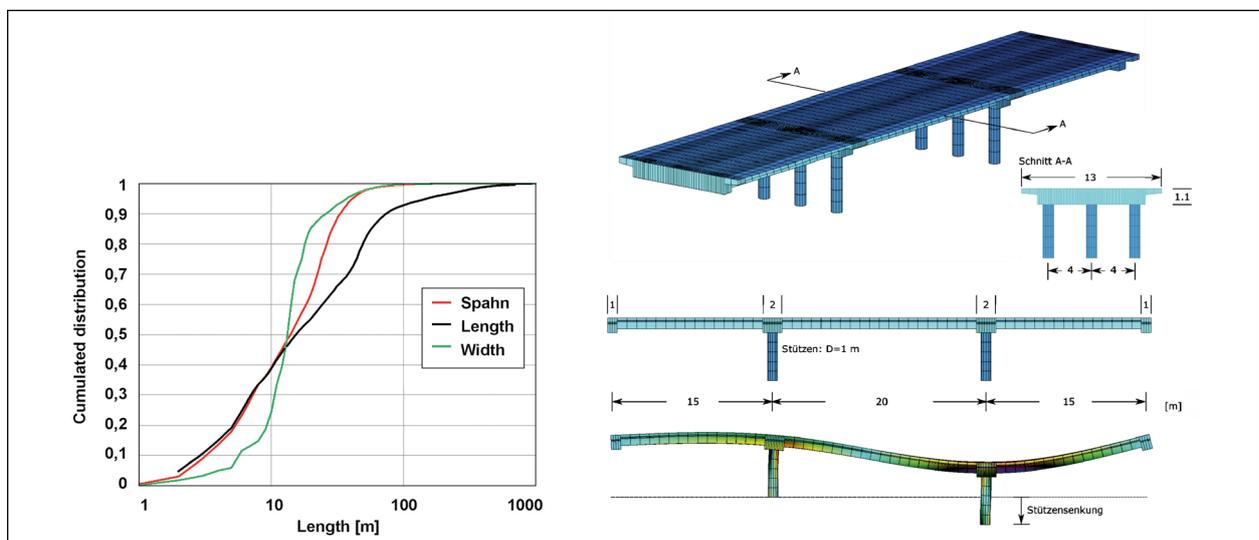


Fig. 3.4: Statistical occurrence of dimensional parameter of bridges in Germany (left) and the evaluation of a derived bridge construction based on the statistical occurrence (right) for an uneven reduction of a column as hazard scenario

Besides the statistical evaluation, the applied approach includes further a detailed analysis of single construction types, if single components will fail. With insights of the derived distributions, constructions with the highest occurrence concerning their material, system and length are characterized component-wise. Aim of the analysis is the identification of critical components and the comparison with the real state of a structure.

The results of the derived hazard-damage relation give contributions to characterize a performance target, e.g. the usability, over time and determine the degree for the required recovery. The time-dependent assessment of the expected loss builds the basis for resilience evaluation. The results of this approach can be applied to address the efficiency of different resilience enhancement measures, like prevention or protection.

3.3 Relation between network and object level

In this section the relation between the network level and the object level is addressed. The analysis on the network level aims at identifying important and critical nodes and objects. For these critical elements an additional analysis on the object level is performed to assess the safety and availability of these elements. The investigations comprise of identification of resilience indicators that are suitable for ascertaining safety and availability. For these indicators methods for quantification will be developed. Through aggregation of the individual analyses on object level the safety and availability for parts of the network under investigation can be determined.

The object level analysis results in the characterization of a performance target over time. The evaluation of expected losses builds the basis to evaluate the resilience of a single construction. The loss of a single object decreases the usability rapidly and this information can be combined with the network level analysis where critical nodes are identified. Very critical nodes in combination with weak construction marks indicate possible weak spots.

4 Development of a GIS application

4.2 Input data

The road network data in the presented research consists of the federal highways (Autobahnen, Bundesstraßen) in Germany. The dataset was exported from the federal information system for streets (Bundesinformationssystem Straße, BISStra) which is a geographic information system that consists of a core system and supplementary systems specialized in different domains Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (2015). See figure 4.1 for an illustration of the available road network data, where the 'Autobahnen' are represented with blue lines and the 'Bundesstraßen' are represented with yellow lines. Additionally the thickness of the lines varies according to designations of the roads.

4.2 Demonstrator

For demonstration and testing purposes the latest version of QGIS was used as a free and open-source desktop geographic information system QGIS developers (2017).

For network preparation a plugin for QGIS was developed that uses functionality from the free and open source geographic information system GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), see GRASS Development Team (2017), NETELER et al. (2012).

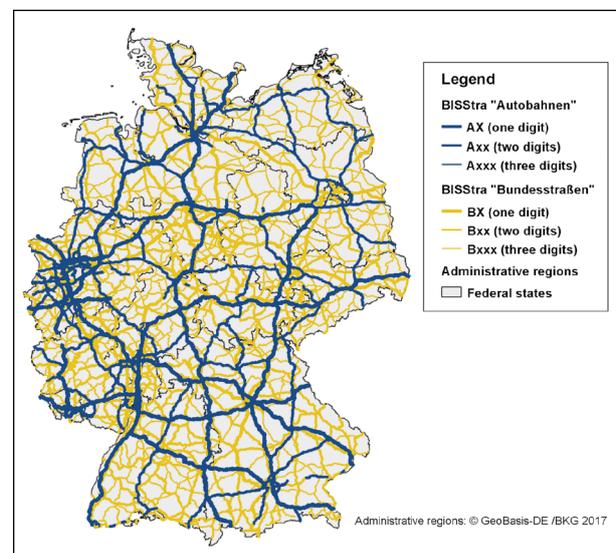


Fig. 4.1: Federal highways in Germany

For the network analysis the functionality offered by GRASS GIS was extended by developing another plugin for QGIS that allows to access functionality offered by the free and open source Python library NetworkX, see NetworkX developers (2017).

4.3 Network analysis example

In this section the network preparation and network analysis are addressed. In order to perform a network analysis in a first step road data has to be converted into a network (graph) as an abstract representation. For the example presented here the network of primary federal motorways (Autobahnen) in Germany was chosen. In the numbering system

of the federal motorways the letter A stands for "Autobahn" which is followed by a number. For the motorways of national importance that go across Germany only a single number is used.

Figure 4.2 depicts on the left side the example dataset of motorways A1 through A9 which consist of around 1,000 to 1,700 features per Autobahn. On the right side the corresponding abstract network representation consisting of 40 nodes and 51 edges is shown. The example dataset of primary motorways with national importance was chosen for the sake of a clear and comprehensible illustration. In our research we will later rely on more complex networks consisting of more extensive road network data.

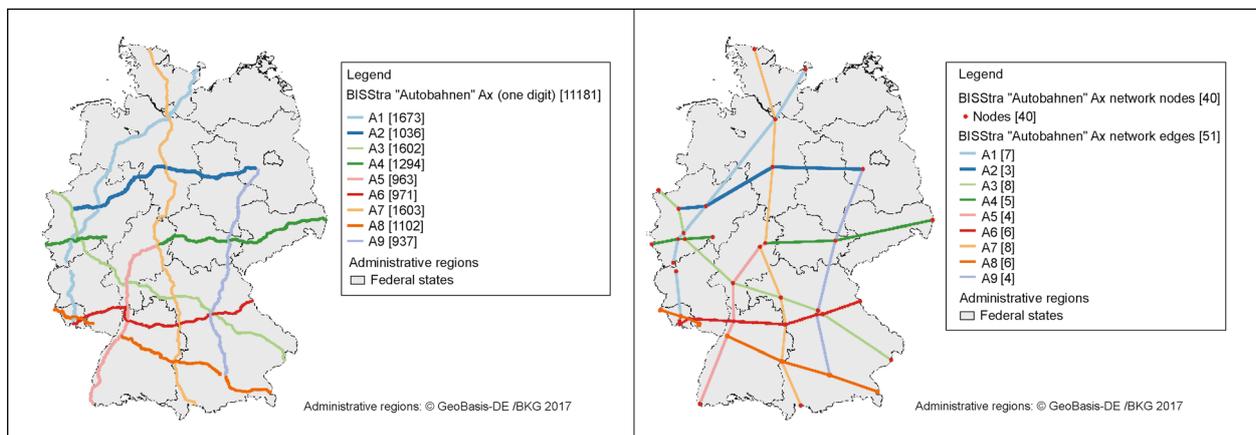


Fig. 4.2: Federal highways in Germany Major German highway network (left) and the abstract network representation (right)

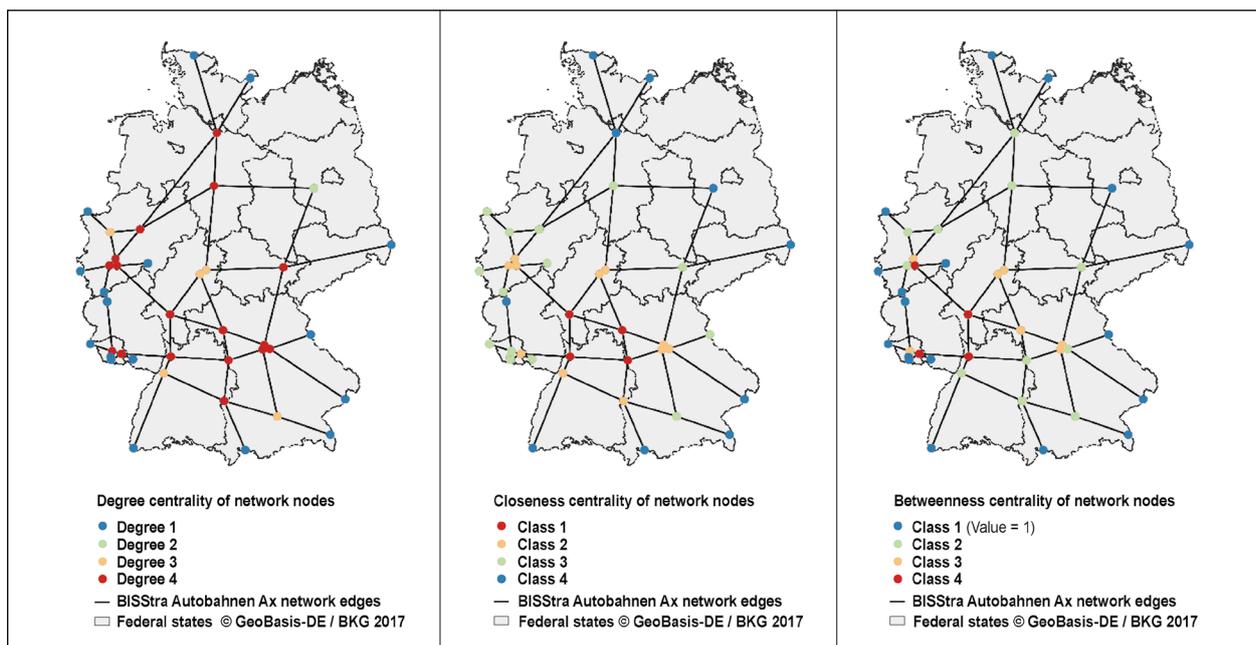


Fig. 4.3: Centrality measures: degree centrality (left), closeness centrality (middle) and betweenness centrality (right)

The illustration of a network analysis by means of centrality measures is based on the example described above. In figure 4.3 the three centrality measures introduced in section 3 are depicted, namely (a) degree centrality, (b) closeness centrality and (c) betweenness centrality (NEUMANN, 2015). Depending on the applied centrality measures different key infrastructure nodes are identified.

5 Output and further investigations

For a holistic assessment and forecasting of the availability of road infrastructure during the occasion of disruptive events, methods and concepts are needed that enable the management of the disruptions or damage in order to maintain or rapidly restore the functionality of an infrastructure.

In Germany, the presence of regression levels is of high relevance in order to maintain the function and operation of the road network during and after the presence of extraordinary events. This can be understood as both, the provision of redundancies at the infrastructure facility (object level) as well as the possibility of relocating traffic flows to evasion routes at the road network (network level). In addition, the aim is to examine the organizational and technical prerequisites for an immediate (re-) action of the responsible authorities, with the aim of ensuring the maintenance of the traffic route (or the damaged structure) in the case of an extraordinary event.

Within the framework of this project, methods and concepts shall be developed that allow the reaction and restoration process to be designed and optimized more effectively than before, in order to minimize out of service time and financial costs that would result from failure and restoration after damage or destruction of the road infrastructure.

Inhalt

| | | | | | |
|----------|--|----|-----------|---|----|
| 1 | Einleitung | 13 | 8 | Daten zur Netzebene/Geodaten ... | 27 |
| 2 | Projektziele | 13 | 8.1 | Verwaltungsgebiete | 27 |
| 2.1 | Teilziele | 13 | 8.2 | Straßennetzdaten | 28 |
| 3 | Bedeutung | 15 | 8.3 | Verkehrsstärke | 31 |
| 3.1 | Wirtschaftliche Bedeutung | 15 | 8.4 | Zustandsnote und Substanz- kennzahl von Brückenbau- werken | 36 |
| 3.2 | Wissenschaftliche Bedeutung | 15 | 8.5 | Hochwassergefahrenkarten | 37 |
| 3.3 | Technische Bedeutung | 15 | 9 | Daten zur Objektebene | 38 |
| 4 | Vorgehensweise | 15 | 9.1 | Kategorisierung Brückenbauwerke nach »SKRIBT« | 39 |
| 4.1 | Hauptschritte | 15 | 9.2 | Angewandte statistische Methoden | 40 |
| 4.2 | Arbeitsschritte | 16 | 9.3 | Auswertung des Datenbestands nach verschiedenen Merkmalen | 42 |
| 5 | Literaturstudie | 17 | 9.4 | Zusammenfassende Übersicht zur statistischen Auswertung des Datenbestands | 46 |
| 5.1 | Vorgehen und Aufbau der Literaturstudie | 17 | 10 | Entwicklung/Weiterentwicklung von Verfahren und Modellen der Netzebene | 48 |
| 5.2 | Strategiepapiere | 18 | 10.1 | Netzwerkmodell | 48 |
| 5.3 | Reliabilität | 18 | 10.2 | Verfahren zur Netzwerkanalyse | 49 |
| 5.4 | Vulnerabilität | 19 | 10.3 | Anwendungsbeispiele | 52 |
| 5.5 | Resilienz | 20 | 10.3.1 | Szenario Brand unter Autobahn- brücke bei Dormagen-Nieven- heim | 52 |
| 5.6 | Objektebene | 22 | 10.3.2 | Stundendaten der automatischen Dauerzählstellen | 53 |
| 5.7 | Studien der Bundesverkehrs- wegeplanung | 23 | 10.3.3 | Netzwerkanalyse um die DB-Brücke »Nievenheim« bei Dormagen mittels Graphentheorie | 55 |
| 5.8 | Zusammenfassung | 23 | 10.3.4 | Szenario Hochwasser in Thüringen | 59 |
| 6 | Begriffsdefinitionen und angewandte Methodik | 23 | 10.4 | Weiterentwicklung | 62 |
| 6.1 | Begriffsdefinitionen | 24 | | | |
| 6.2 | Methodik zur Bewertung von Straßenverkehrsinfrastruktur | 24 | | | |
| 7 | Szenarien | 26 | | | |
| 7.1 | Brandbelastung in Anlehnung an ein Realereignis | 26 | | | |
| 7.2 | Hochwasserbelastung | 27 | | | |

| | | |
|-----------|---|----|
| 11 | Entwicklung/Weiterentwicklung von Verfahren und Modellen der Objektebene | 63 |
| 11.1 | Allgemeine Vorgehensweise | 63 |
| 11.2 | Anwendungsbeispiele | 65 |
| 11.2.1 | Bewertung eines Realereignisses – Brücke Dormagen | 66 |
| 11.2.2 | Generisches Brückenobjekt | 69 |
| 12 | Demonstrator | 70 |
| 13 | Zusammenfassung | 73 |
| | Literatur | 74 |
| | Bilder | 79 |
| | Tabellen | 81 |
| | Anhang | 82 |

1 Einleitung

Eine zuverlässig funktionierende Verkehrsinfrastruktur ist eine essentielle Voraussetzung für den freien Individualverkehr einerseits wie auch für den volkswirtschaftlich bedeutsamen Gütertransport auf der Straße andererseits. Zusätzlich sichern funktionierende Verkehrsinfrastrukturen die Erreichbarkeit von Einsatzorten mit Fahrzeugen der Notfall- und Rettungsorganisationen. Damit ist die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland nicht nur zentrale Grundlage für die persönliche Mobilität und die Wirtschaft, sondern auch für die öffentliche Sicherheit. Vor allem im Hinblick auf die öffentliche Sicherheit ist es entscheidend, dass die Infrastruktur insbesondere dann zur Verfügung steht, wenn Ereignisse den Einsatz von Notfall- und Rettungsorganisationen erforderlich machen. Neben der Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur ist es wichtig, dass von dieser keine Gefährdungen für ihre Benutzer ausgehen. Die Sicherheit muss auch bei Eintritt eines außergewöhnlichen Ereignisses gewährleistet bleiben.

Ereignisse, die die Sicherheit und Verfügbarkeit von Straßenverkehrsinfrastrukturen einschränken können, sind beispielsweise schwere Unwetter, wie sie im Frühjahr 2016 ganz Deutschland getroffen haben. So wurde im Landkreis Nordwestmecklenburg nach einem Unwetter von Verkehrsbehinderungen durch Starkregen und umgestürzte Bäume berichtet. Teilweise kam der Verkehr auf Bundesstraßen an mehreren Stellen zum Erliegen (ECKERMANN 2016). Ein weiteres Beispiel aus Grevenbroich im Rhein-Kreis Neuss berichtet nach einem Unwetter von einem vollgelaufenen Tunnel und einem abgerutschten Hang, was Straßensperrungen und Verkehrschaos zur Folge hatte (TREß 2016). Aus Düsseldorf wurde nach einem weiteren Unwetter von überspülten Unterführungen, in denen Autos steckenblieben, und mehreren überschwemmten Tunneln berichtet. Aufgrund der Unwetter, von denen hier nur einige beispielhaft aufgeführt wurden, hat sich auch der Deutsche Bundestag mit diesem Thema befasst. Die Bundesumweltministerin stellte dabei fest, dass es sich bei solchen Ereignissen längst nicht mehr um Einzelfälle handelt und sieht die Ursache im Klimawandel (Deutscher Bundestag).

Die Ereignisse belegen, dass die Sicherheit und Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland bei außergewöhnlichen Ereignissen nicht immer gewährleistet werden kann. Einschränkungen in der Verfügbarkeit von Straßen waren in den betroffenen Gebieten über mehrere Tage hinweg spür-

bar. Die Sicherheit der Nutzer kann ebenfalls gefährdet werden, wenn beispielsweise Hangrutschungen oder Unterspülungen von Pfeilern die Tragfähigkeit von Brücken mindern oder Fahrzeuge mit ihren Insassen in überfluteten Unterführungen feststecken. Umso wichtiger ist es, die Abschätzung von Sicherheit und Verfügbarkeit zu ermöglichen, um an geeigneter Stelle Optimierungen vornehmen zu können und für zukünftige Ereignisse, aber auch langfristige Trends wie den Klimawandel, besser gewappnet zu sein. Die Herausforderung besteht dabei in der Entwicklung einer Analyse- und Bewertungsmethode, die beide Gesichtspunkte – Sicherheit und Verfügbarkeit – berücksichtigen und bewerten kann. Hierzu ist es insbesondere von Bedeutung, nicht nur Verwundbarkeiten der Strukturen zu identifizieren, sondern auch deren Regenerationszeiten bis zur teilweisen oder vollständigen Wiederinbetriebnahme zu betrachten. Das ermöglicht eine Bewertung der Signifikanz eines eingetretenen Schadens auch im Hinblick auf eine zeitliche Komponente. Als Betrachtungswerkzeug wird das auf dem allgemeinen Resilienzansatz aufbauende, neu etablierte Resilience Engineering herangezogen. Mit der geplanten Machbarkeitsstudie soll somit eine wichtige Grundlage für weitere Untersuchungen in diesem Themenfeld geschaffen werden.

2 Projektziele

Gesamtziel des Forschungsprojekts ist die Erarbeitung von Verfahren und Modellen zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Verkehrsinfrastrukturen bei außergewöhnlichen Ereignissen.

2.1 Teilziele

Nach einer Auflistung der Teilziele werden die Zusammenhänge noch ausführlicher erläutert.

- Ziel des gewählten ganzheitlichen Resilienz-Ansatzes ist es, alle Phasen vom Ausfall bis zur Wiederinbetriebnahme der Verkehrsinfrastruktur zu berücksichtigen.
- Sowohl die Objekt- als auch die Netzebene zu betrachten und diese sinnvoll miteinander zu verknüpfen, stellt ein weiteres Ziel dar.
- Die Realisierung des Forschungsprojekts als Machbarkeitsstudie hat eine Überprüfung der

Eignung des gewählten Ansatzes zur Bewertung und Optimierung von Sicherheit und Verfügbarkeit zum Ziel.

- Ein abschließendes Ziel ist die Entwicklung eines GIS-basierten¹ Software-Prototypen, anhand dessen die entwickelten Verfahren und Modelle demonstriert werden können.

Eine zuverlässig funktionierende Verkehrsinfrastruktur ist eine wichtige Voraussetzung für Individualverkehr und Gütertransport auf der Straße einerseits sowie für die Erreichbarkeit von Einsatzorten mit Fahrzeugen der Notfall- und Rettungsorganisationen andererseits. Damit ist die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland nicht nur zentrale Grundlage für die persönliche Mobilität und die Wirtschaft, sondern auch für die öffentliche Sicherheit. Vor allem im Hinblick auf die öffentliche Sicherheit ist es entscheidend, dass die Infrastruktur insbesondere dann zur Verfügung steht, wenn Ereignisse den Einsatz von Notfall- und Rettungsorganisationen erforderlich machen. Neben der Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur ist es wichtig, dass von dieser keine Gefährdungen für ihre Benutzer ausgehen. Die Sicherheit muss auch bei Eintritt eines Ereignisses gewährleistet bleiben.

Die in der Einleitung beschriebenen Ereignisse belegen, dass die Sicherheit und Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland bei außergewöhnlichen Ereignissen nicht immer sichergestellt werden kann. Umso wichtiger ist es, die Abschätzung von Sicherheit und Verfügbarkeit zu ermöglichen, um an geeigneter Stelle Optimierungen vornehmen zu können und für zukünftige Ereignisse, aber auch langfristige Trends wie den Klimawandel, besser gewappnet zu sein. Hierfür ist es notwendig, Sicherheit und Zuverlässigkeit quantifizieren zu können. Dabei gilt es, einerseits die betriebliche Zuverlässigkeit des Verkehrsnetzes und andererseits die bauliche Beschaffenheit von einzelnen Infrastrukturobjekten zu betrachten. Die Betrachtung ist neben dem Normalbetrieb auch für den Ereignisfall erforderlich und soll den gesamten Zeitraum vom Eintritt eines disruptiven Ereignisses bis zur Wiederherstellung des Normalbetriebs umfassen.

Für solche Aufgabenstellungen eignet sich der Ansatz des Resilience Engineering, der in der Wissenschaft zunehmend an Bedeutung gewinnt. Unter Resilience Engineering versteht man »die ingenieurwissenschaftlich-interdisziplinäre Erforschung und Entwicklung von Vorgehensweisen und Methoden zur Erhöhung von Funktions-, Widerstands-, Anpassungs-, und Lernfähigkeit von Systemen hohen gesellschaftlichen Werts« (SCHARTE und THOMA 2016). Der Ansatz beinhaltet die Messung von Resilienz und Vulnerabilität (Verletzlichkeit) sowie die Modellierung und ggf. Simulation komplexer Systeme zur Vorhersage ihres Verhaltens bei Eintritt eines außergewöhnlichen Ereignisses.

Ausgangspunkt für die Machbarkeitsstudie zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Verkehrsinfrastrukturen, insbesondere bei unerwarteten und außergewöhnlichen Ereignissen, ist eine gründliche Untersuchung des derzeitigen Standes der Technik und der existierenden konzeptionellen Weiterentwicklungen in der Wissenschaft bezüglich geeigneter Verfahren und Modelle. Bei der Untersuchung der konzeptionellen Ansätze geht es neben der Überprüfung der Machbarkeit um eine Bewertung von möglichen Auswirkungen. Insgesamt spielt die sinnvolle Verknüpfung von zwei verschiedenen Betrachtungsebenen eine entscheidende Rolle. Das sind zum einen die Objektebene, in der das Infrastrukturobjekt selber betrachtet wird, und zum anderen die Netzebene, die die Funktion im Verkehrsnetz widerspiegelt. Ein weiterer Aspekt der Sicherstellung von Verfügbarkeit und Sicherheit ist die Berücksichtigung von bereits bestehenden Maßnahmen. So sollen beispielsweise Maßnahmen wie die auf Brücken eingesetzten Warnanlagen bezüglich der Windgeschwindigkeit oder die Beschränkung der Zufahrt vor Tunneln (z. B. automatische Höhenkontrolle) in die Überlegungen mit einbezogen werden.

Ziel dieses Vorhabens ist es, Resilience Engineering auf die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland anzuwenden und in einer Machbarkeitsstudie die Eignung dieses Ansatzes für die Bewertung und Optimierung von Sicherheit und Verfügbarkeit dieser zu überprüfen. Die Überprüfung wird durch die Anwendung von Fallbeispielen ergänzt.

¹ GIS = Geoinformationssystem

3 Bedeutung

3.1 Wirtschaftliche Bedeutung

Für Deutschland haben die Sicherheit und die Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur eine immense Bedeutung. Die spiegelt sich auch in Erklärungen wieder, die der Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. gemeinsam mit anderen Organisationen herausgibt (Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) 2010, 2012). Hier wird die Verkehrsinfrastruktur als Grundlage für Mobilität, Produktion, Export und Logistik benannt und gilt somit als zentrale Basis für die Wirtschaft und weiteres Wirtschaftswachstum. Gerade für internationale Unternehmen ist die Verkehrsanbindung häufig ein Grund für die Standortwahl und somit auch ein wichtiger Faktor im globalen Wettbewerb. Trotz dieser wichtigen Rolle der Verkehrsinfrastruktur sind einzelne Infrastrukture Objekte zum Teil in schlechtem Zustand, wie über Jahre für den Güterverkehr gesperrte Brücken zeigen. Dem entgegen steht der im Bundesverkehrswegeplan 2030 prognostizierte Anstieg (Zuwachs zu 2010) des Güterverkehrs um insgesamt 38 % wobei jeweils auf die Eisenbahn 42,9 %, auf die Straße 22,8 % und die Binnenschifffahrt 22,8 % entfallen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2016).

3.2 Wissenschaftliche Bedeutung

Wie das Ergebnis der Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik zeigt, sind Resilienz und Resilience Engineering zentrale Themenstellungen in der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion um die Sicherheit, Verletzlichkeit und Verfügbarkeit von kritischen Infrastrukturen. Das schließt auch den Transportsektor bzw. die Verkehrsinfrastruktur mit ein. Die Herausforderung besteht darin, Resilienz zu messen bzw. zu quantifizieren. Hier kommen häufig ingenieurwissenschaftliche Ansätze zum Einsatz, die dem Engineering zuzuordnen sind. Das gegenständliche Forschungsvorhaben gliedert sich damit in die aktuelle wissenschaftliche Diskussion ein. Das bezieht sich auch auf die Betrachtung von kritischen Infrastrukturen als komplexe Systeme und ihre Modellierung als Netzwerk. Die umfangreichen existierenden Forschungsergebnisse zur Anwendung von Analysemethoden aus dem Gebiet der Graphen- und Netzwerktheorie zur Bestimmung der Resilienz komplexer Systeme bietet eine reiche Basis für die Auswahl von Verfahren zur spezifischen Anwen-

dung auf Verkehrsnetze. Damit sind die Verfahren für Straßeninfrastrukturen besonders geeignet. Eine wissenschaftliche Herausforderung ist auch die Visualisierung von Resilienz in Verbindung mit Geoinformationssystemen (GIS).

Mit dem Anspruch, die Resilienz der Verkehrsinfrastruktur zu quantifizieren und Methoden auf ihre praktische Anwendbarkeit hin zu überprüfen, kann dieses Projekt sehr wertvolle Beiträge für die wissenschaftliche Weiterentwicklung des Resilienz bzw. Resilience Engineering-Konzepts leisten.

3.3 Technische Bedeutung

Bezüglich der technischen Bedeutung der Studie liegt der Fokus darauf, die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse praktisch nutzbar zu machen. Die betrachteten Verfahren und Modelle werden auf ihre Anwendbarkeit für Verkehrsinfrastrukturen geprüft und bezüglich Machbarkeit bewertet. So können technische Erkenntnisse aus der Netzbetrachtung von kritischen Infrastrukturen im Allgemeinen oder anderer Infrastrukturektoren auf den Sektor Transport und Verkehr sinnvoll übertragen werden. Neben der Auswahl praktisch relevanter Referenzszenarien spielt auch die Verfügbarkeit von zweckmäßigen und aktuellen Daten eine große Rolle. Die Anwendbarkeit der entwickelten Verfahren und Modelle wird überprüfbar demonstriert durch die Entwicklung einer anwenderfreundlichen GIS-basierten Prototypen-Software.

Im Ganzen gesehen ist der Resilience Engineering-Ansatz technisch wertvoll, da sowohl Sicherheit als auch Verfügbarkeit durch ein Maß der Resilienz verknüpft werden können.

4 Vorgehensweise

4.1 Hauptschritte

Im Folgenden wird das geplante Vorgehen bzw. der vorgesehene Prozess zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur beschrieben, der im Wesentlichen auf drei Hauptschritten beruht.

In einem ersten Schritt werden konzeptuelle Definitionen für Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur definiert. Weiterhin werden sie mit dem Ziel der Quantifizierung mit den

Begriffen Zuverlässigkeit, Verlässlichkeit und Vulnerabilität in Beziehung gesetzt. Dabei soll eine ganzheitliche Betrachtung aller Phasen vom Ausfall bis zur Wiederherstellung der Funktion gewährleistet sein, was die für Verwendung eines Resilienz-Ansatzes spricht. Insgesamt geht es um die Aufstellung konzeptueller Maße für den zu untersuchenden Gegenstandsbereich.

In dem zweiten Schritt werden die konzeptuellen Maße unter Berücksichtigung der verfügbaren Daten, der zur Verfügung stehenden Berechnungsmethoden und der gewünschten Art der Analyseergebnisse adaptiert. Das beinhaltet die Ableitung von Indikatoren, welche für die betrachtete Problemstellung geeignet sind und sich in der Praxis bestimmen lassen.

Der dritte und letzte Schritt adressiert die Anwendung der entwickelten Modelle und Verfahren zur Quantifizierung in zwei Fallbeispielen. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in einem Geoinformationssystem (GIS).

4.2 Arbeitsschritte

Ziel des Vorhabens ist es, die zuvor beschriebene Methodik des Resilience Engineering in einer Machbarkeitsstudie auf ihre Anwendbarkeit hin zu überprüfen. Um ein strukturiertes Vorgehen und die Einhaltung des vorgegebenen Zeitrahmens zu gewährleisten, werden die Arbeiten in fünf Arbeitsschritte (AS1 – AS5) unterteilt.

Arbeitsschritt 1

Der erste Arbeitsschritt beinhaltet im Wesentlichen eine vertiefte Literaturstudie. Die Literaturstudie baut auf die bereits bekannten und in diesem Angebot dargestellten Literaturangaben auf. Besonderes Augenmerk wird auf eine Bestandsaufnahme zu vorhandenen Modellen und Verfahren zur Bewertung und Quantifizierung von Sicherheit und Zuverlässigkeit gelegt. Bei diesen Modellen und Verfahren werden auch Ansätze, die im Ausland bereits Anwendung finden, berücksichtigt und vorhandene Erfahrungen zur Praxistauglichkeit mit einbezogen. Identifizierte Verfahren und Modelle werden im Sinn des Resilience Engineering auf ihre Anwendbarkeit auf Verkehrsinfrastrukturen überprüft. Mit Bezug auf die verfügbaren Daten wird die praktische Umsetzbarkeit bewertet. Dabei wird berücksichtigt, ob die Anwendbarkeit für die

Infrastrukturen unterschiedlicher Verkehrsträger variiert.

Arbeitsschritt 2

In diesem Arbeitsschritt, der teilweise parallel zu AS1 bearbeitet wird, werden zunächst mögliche Auswirkungen von außergewöhnlichen Ereignissen auf die Straßenverkehrsinfrastruktur wie der Ausfall von einzelnen oder mehreren Streckenabschnitten gesammelt und analysiert. Der Fokus bei der Betrachtung der Auswirkungen soll dabei auf den Systemeigenschaften, die durch diese Ereignisse beeinträchtigt werden, liegen und nicht auf den Szenarien selbst. Dabei wird zunächst von konkreten, spezifischen Ereignissen (z. B. Unwetterereignissen) ausgegangen, um deren Auswirkungen zu analysieren. In einem nächsten Schritt werden Gemeinsamkeiten in den Auswirkungen gesucht, die die gleichen Beeinträchtigungen von Systemeigenschaften zur Folge haben. Die Betrachtung der Auswirkungen auf die Systemeigenschaften führt dazu, dass für die Untersuchung von Sicherheit und Verfügbarkeit nicht mehr zwingend spezifische Ereignisse zugrunde gelegt werden müssen, sondern der Ansatz weitestgehend szenariounabhängig funktioniert. Damit kann auch eine Betrachtung der Auswirkungen bei gleichzeitigem Auftreten mehrerer außergewöhnlicher Ereignisse erfolgen. Eine spätere Ausweitung dieser Betrachtungsweise auf weitere Ereignisse (z. B. menschliche oder technische Fehler), insbesondere auf deren Auswirkungen, wird durch diese Herangehensweise unterstützt. Für die spätere Überprüfung des Ansatzes in Verbindung mit dem geplanten Demonstrator werden dennoch zwei konkrete Ausgangsszenarien (z. B. Ausfall einer Brücke durch Brand oder Ausfall mehrere Streckenabschnitte durch Überflutung) erarbeitet. Die konkreten Ereignisse und der damit einhergehenden Ausfall, der zur Einschränkung der Verfügbarkeit führt, werden in einem abstrakten Modell in einer Form repräsentiert, die auch für andere Ereignisse anwendbar und somit vom Ansatz her szenariounabhängig ist. Beispielsweise werden in einem Netzwerkmodell die Ausfälle durch das Entfernen der entsprechenden Netzwerkkanten repräsentiert unabhängig von der tatsächlichen Ursache des Ausfalls.

Arbeitsschritt 3

Aufbauend auf die Erkenntnisse aus AS1 und AS2, wird in diesem Arbeitsschritt überprüft, ob die in der

Literatur identifizierten Verfahren und Modelle für die Quantifizierung der Einschränkungen der Systemeigenschaften durch die betrachteten Ereignisse geeignet und ausreichend sind. Dafür werden Indikatoren für die Messung der Systemeigenschaften ermittelt, um die relevanten Eingangsparameter (z. B. Bauwerkdaten, verkehrliche Relevanz) zu finden. Diese Indikatoren sollen auch eine Vorselektion bzw. Kategorisierung relevanter Bauwerke ermöglichen und entsprechende Kriterien dafür vorgeben. Mit den definierten Indikatoren werden vorhandene Modelle und Verfahren weiterentwickelt, um sie in die grundlegende Methodik des Resilience Engineering einbetten zu können.

Arbeitsschritt 4

In diesem Arbeitsschritt wird ein anwenderfreundlicher GIS-basierter Software-Prototyp entwickelt, der sich dazu eignet, die erarbeiteten Verfahren und Modelle aus den vorangegangenen Arbeitsschritten an Beispielen zu demonstrieren. Die Auswahl von zwei Beispielen geschieht auf der Grundlage der Ergebnisse des Arbeitsschritts 2 bezüglich der Referenzszenarien. Die dabei zum Einsatz kommenden Daten stützen sich auf den in Arbeitsschritt 1 angestellten Untersuchungen zu relevanten und verfügbaren Daten. Abschließend wird der entwickelte GIS-basierte Software-Prototyp und die dafür ausgewählten Beispielszenarien demonstriert.

Arbeitsschritt 5

Der Arbeitsschritt 5 umfasst die Überarbeitung der Projektergebnisse – Demonstrator und Schlussbericht – auf Basis der Ergebnisse der Evaluation.

5 Literaturstudie

In diesem Kapitel wird der Stand von Wissenschaft und Technik zu den für die Machbarkeitsstudie relevanten Themenfeldern dargestellt. Da laut Leistungsbeschreibung FE 15.0627/2016/ARB bei einem außergewöhnlichen Ereignis im Sinn einer ganzheitlichen Betrachtung alle Phasen vom Ausfall bis zur Wiederherstellung der Verkehrsinfrastruktur zu berücksichtigen sind, spielt das Konzept der Resilienz bei dieser Zusammenstellung relevanter Literatur eine zentrale Rolle. Der Begriff Resilienz stammt ursprünglich aus der Psychologie und beschreibt in der ingenieurtechnischen Be-

trachtung die Fähigkeit eines Systems, disruptiven Ereignissen zu widerstehen und im Anschluss wieder zu seiner Funktionsfähigkeit zurückzukehren (KAUFMANN und BLUM 2012).

5.1 Vorgehen und Aufbau der Literaturstudie

Im Folgenden werden das Vorgehen zur Erstellung sowie der Aufbau der Literaturstudie bezüglich der im Projekt relevanten Konzepte dargestellt.

Nach einer kurzen Darstellung von Strategiepapieren für den Infrastruktorsektor Verkehr auf Bundes- und europäischer Ebene aus Veröffentlichungen von staatlichen Behörden bzw. Regierungsorganen bezieht sich die Literaturstudie hauptsächlich auf Arbeiten aus dem wissenschaftlichen Bereich mit einem Schwerpunkt auf englischsprachigen Fachzeitschriften (Journal-Veröffentlichungen).

Ein Ausgangspunkt für die Literaturstudie ist die in der Leistungsbeschreibung dargestellte Problemstellung einer zuverlässigen Verkehrsinfrastruktur, die ihre Aufgaben auch unter ungünstigen Bedingungen (z. B. Naturereignissen) erfüllen muss. Weiterhin spielt das genannte Ziel eines ganzheitlichen Resilienzansatzes, der alle Phasen vom Ausfall bis zur Wiederinbetriebnahme einer Infrastruktur berücksichtigt, eine entscheidende Rolle.

Daher stellen Fachartikel, die eine Bestandsaufnahme der Literatur zur Zuverlässigkeit von Verkehrsnetzen (transportation network reliability) liefern, einen Einstiegspunkt dar. Generell gewinnt, wie weiter unten erläutert, in diesem Zusammenhang das neuere Konzept der Vulnerabilität (vulnerability) immer mehr an Bedeutung. Zur Berücksichtigung des Ziels eines ganzheitlichen Resilienzansatzes werden darüber hinaus Artikel herangezogen, die einen Literaturüberblick zur Resilienz von Verkehrssystemen geben. Nach dieser Behandlung von Übersichtsartikeln zur Resilienz und ihrer Messung, insbesondere im Zusammenhang mit Transportsystemen, wird eine Auswahl von Artikeln vorgestellt, deren Spektrum von eher konzeptionellen bis hin zu anwendungsorientierten Ansätzen und Arbeiten reicht.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Konzepte Verlässlichkeit, Vulnerabilität und Resilienz von Verkehrsnetzen anhand entsprechender Literatur dargestellt. Dabei erfolgte die Auswahl der

Übersichtsartikel im Sinn einer Verbindung zwischen den Konzepten, sodass in den Artikeln immer jeweils zwei dieser Konzepte behandelt werden. Zudem wurde bei der Auswahl der Überblicksartikel darauf geachtet, dass die dort vorgestellten Arbeiten aus dem Anwendungsbereich Verkehr stammen und dass eine systematische Einordnung nach verwendeten Verfahren und Modellen erfolgt.

In ihrer Studie zur Analyse von Transportnetzwerken, die Naturgefahren (natural hazards) ausgesetzt sind, stellen MURIEL-VILLEGAS et al. eine Literaturübersicht bezüglich Reliabilität und Vulnerabilität von Transportnetzen zusammen (MURIEL-VILLEGAS et al. 2016). MATTSSON und JENELIUS geben einen Überblick über aktuelle Forschung auf den Gebieten Vulnerabilität und Resilienz von Transportsystemen (MATTSSON und JENELIUS 2015). In einer Publikation von REGGIANI et al. werden verschiedene Studien aus dem Bereich Verkehr systematisch bezüglich der Konzepte Resilienz und Vulnerabilität eingeordnet, wobei der Fokus auf der Verbindung dieser Konzepte zu Konnektivität und Erreichbarkeit in Verkehrsnetzen liegt (REGGIANI et al. 2015).

5.2 Strategiepapiere

Im Folgenden werden zunächst Aspekte von Strategiepapieren für den Infrastruktursektor Verkehr auf Bundes- und europäischer Ebene aus Veröffentlichungen von staatlichen Behörden bzw. Regierungsorganen dargestellt.

Die Betrachtung der Resilienz von Transportsystemen gewinnt in der Bundesrepublik Deutschland zunehmend an Bedeutung. Das zeigt u. a. die vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2014 veröffentlichte Broschüre »Sicherheitsstrategie für die Güterverkehrs- und Logistikwirtschaft«. Sie stellt die Strategie zur Bewältigung der Aufgabe des Schutzes kritischer Infrastrukturen und der verkehrsträgerübergreifende Gefahrenabwehr zusammenfassend dar (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2014). Neben dem Befürworten von bewährten risikobasierten Ansätzen wie beispielsweise Anwendung eines Risiko-Management-Prozesses wird bei Maßnahmen zur Stärkung der Widerstandsfähigkeit und im Ausblick auf das weitere Vorgehen der konzeptionelle Ansatz der Resilienz adressiert.

Auf europäischer Ebene bringt ein »White Paper« für den Sektor Transport der Europäischen Kom-

mission die Begriffe Resilienz und Sicherheit zusammen, indem gefordert wird, dass zukünftige Infrastrukturprojekte resilient gegenüber Einwirkungen des Klimawandels sein sollten sowie die Sicherheit der Benutzer verbessern sollten.

- »Cofunded projects should equally reflect the need for infrastructure (...) that is resilient to the possible impact of climate change and that improves the safety and security of users.« (European Commission 2011).

5.3 Reliabilität

Ausgangspunkt für diese Darstellung ist eine Veröffentlichung von MURIEL-VILLEGAS et al., die eine Bestandsaufnahme von Literatur zur Reliabilität und Vulnerabilität von Transportnetzwerken liefert (MURIEL-VILLEGAS et al. 2016). In der Literatur werden verschiedene Reliabilitätsmaße unterschieden. DA-RONG et al. stellen drei Indizes für die Reliabilität von Straßennetzen bezüglich Konnektivität, Reisezeit und Kapazität jeweils einzeln vor und behandeln anschließend das Verhältnis zwischen ihnen im Detail (DA-RONG et al. 2013).

Reliabilität der Konnektivität (connectivity reliability) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass es eine Verbindung zwischen einem Paar von Knoten gibt, wenn eine bestimmte Menge von Kanten aus einem Graphen entfernt wurde (BELL und IIDA 1997). Reliabilität der Reisezeit (travel time reliability) ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, ein ausgewähltes Ziel in einer bestimmten Zeit zu erreichen (TAYLOR 2013; CARRION und LEVINSON 2012). Reliabilität der Kapazität (capacity reliability) ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Netzwerk ein bestimmtes Niveau an Verkehrsnachfrage zur Verfügung stellen kann (CHEN et al. 1999, 2002).

In einer neueren Arbeit evaluieren SOLTANI-SOBH et al. die Zuverlässigkeit von Verkehrsnetzen (transportation network reliability) unter dem Einfluss von unerwarteten Ereignissen wie beispielsweise Naturkatastrophen (SOLTANI-SOBH et al. 2016). Umgebungsparameter von Straßen wie Sichtbarkeit, Geometrie und Zustand des Straßenbelags finden dabei Berücksichtigung.

MURIEL-VILLEGAS et al. fassen die Reliabilität der Reisezeit und der Kapazität unter dem Begriff Reliabilität der Performanz (performance reliability) zusammen. Die Mehrzahl der von ihnen vorgestellten Arbeiten zur Analyse von Verkehrsnetzen bei Natur-

gefahren sind allerdings der Vulnerabilität zuzuordnen, welche nachfolgend adressiert wird.

5.4 Vulnerabilität

Es existieren unterschiedliche Definitionen zur Verwundbarkeit von Transportnetzwerken (transport network vulnerability). Wir stellen hier zwei der zentralen Arbeiten vor, die die Forschung auf diesem Gebiet mit begründet haben.

Eine Einführung in die Vulnerabilität von Straßen gibt BERDICA (2002), wobei ihre Definition auf dem Konzept der Funktionstüchtigkeit/Betriebsfähigkeit (serviceability) basiert. Sie geht von auslösenden Ereignissen (incidents) aus, die signifikante Konsequenzen für das Straßennetz haben.

- »Vulnerability in the road transportation system is a susceptibility to incidents that can result in considerable reductions in road network serviceability.«

D'ESTE und TAYLOR (2003) stützen ihre zweiteilige Definition der Vulnerabilität von Netzwerkknoten und der Kritikalität von Netzwerkkanten auf das Konzept der Erreichbarkeit (accessibility) (siehe auch TAYLOR et al. 2006).

- »a network node is vulnerable if loss (or substantial degradation) of a small number of links significantly diminishes the accessibility of the node, as measured by a standard index of accessibility,«
- »a network link is critical if loss (or substantial degradation) of the link significantly diminishes the accessibility of the network or of particular nodes, as measured by a standard index of accessibility.«

In den ersten Arbeiten zur Verwundbarkeit von Transportsystemen wurde argumentiert, dass es neben der Reliabilität zusätzlicher Ansätze bedarf, um eine adäquate Analyse und Bewertung von Szenarien mit schwereren Konsequenzen durchzuführen.

Verwundbarkeit (vulnerability) wird oft als das Gegenstück zur Widerstandsfähigkeit (robustness) gesehen (KNOOP et al. 2012; SNELDER et al. 2012). Unterschiede in der Definition von Widerstandsfähigkeit ergeben sich durch die betrachtete Störungursache, wobei schwere selten auftretende Störungen beispielsweise durch Naturgefahren von täglich wiederkehrenden Variationen unterschieden werden.

Eine Sonderausgabe der Zeitschrift »Transportation Research Part A« widmet sich dem aktuellen Stand der Forschung zur Verwundbarkeit von Transportnetzen bezüglich konzeptuellen Definitionen und Anwendungen auf reale Transportnetze (TAYLOR 2012). In dieser Ausgabe unterteilen KNOOP et al. (2012) die Literatur zur Verwundbarkeit einzelner Verbindungen (link-level vulnerability) in zwei Gruppen. Die erste führt eine vollständige Berechnung durch, in der die Kapazität jeweils einzelner Verbindungen reduziert wird. Bei diesem insbesondere bei größeren Netzen sehr aufwendigen Verfahren werden alle Netzwerkzustände simuliert, um die Schwachstellen zu finden. Die zweite Gruppe verwendet bestimmte Indikatoren, die die Suche nach den verwundbarsten Verbindungen einschränken. Diese Indikatoren können entweder in einer Verkehrssimulation berechnet oder am realen Straßennetz gemessen werden. Die Autoren geben einen Überblick zu den in der Literatur vorgeschlagenen Indikatoren, bewerten deren Qualität und schlagen einen besseren kombinierten Indikator vor. Ein Ergebnis ist, dass verschiedene Indikatoren unterschiedliche Verbindungen als verwundbar einschätzen.

Im spezifischen Kontext der alpinen Naturgefahren wie Hangrutschungen, Überschwemmungen oder Lawinen erstellen (PAPATHOMA-KÖHLE et al. 2011) eine Literaturübersicht existierender Methoden zur Bestimmung der Verwundbarkeit. Dabei analysieren sie die Ansätze bezüglich Unterschiede im Maßstab und der betrachteten Naturgefahren sowie der berücksichtigten Indikatoren. Als Ergebnis identifizieren sie künftige Anforderungen an die Forschung zur Bestimmung der Verwundbarkeit und gehen auch auf die Verwendung von GIS (Geografische Informationssysteme) sowie die räumliche (Karten) und zeitliche Betrachtung der Verwundbarkeit ein.

JENELIUS und MATTSSON (2015) beschreiben einen Prozess zur Analyse der Verwundbarkeit von Straßennetzen, ausgehend von einer konzeptionellen Definition von Verwundbarkeitsmaßen über die Ableitung von praktischen Modellen und Indikatoren und ihrer Implementierung als Berechnungsverfahren zur Anwendung der Methodik auf Fallbeispiele.

Bild 5.1 stellt die von MURIEL-VILLEGAS et al. (2016) aufgelisteten Veröffentlichungen summarisch in einem Balkendiagramm dar. Dabei repräsentiert die Höhe der Balken die Anzahl der Arbei-

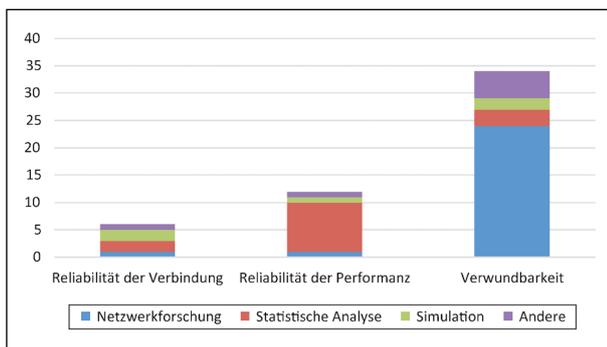


Bild 5.1: Eingesetzte Methoden zur Analyse von Verkehrsnetzwerken nach MURIEL-VILLEGAS et al. (2016)

ten in den drei Bereichen Reliabilität der Konnektivität, Reliabilität der Performanz sowie Vulnerabilität. Zusätzlich sind die Balken nach der verwendeten Methodik unterteilt. Die Methoden Theorie komplexer Netzwerke, statistische Analysen und Simulation finden in allen drei Bereichen Anwendung und sind somit explizit aufgeführt. Weitere Methoden werden unter dem Sammelbegriff »Andere« zusammengefasst. Während bei Studien zur Reliabilität von Verkehrsnetzen vor allem statistische Analysen zum Einsatz kommen, basieren Studien zur Vulnerabilität zum größten Teil auf Methoden aus der Theorie komplexer Netzwerke (NEWMAN 2015; BARABÁSI und PÓSFAL 2016). Die Untersuchung von Graphen, bestehend aus einer Menge von Knoten und einer Menge von Kanten in der Graphentheorie (graph theory), zählt zu den Inhalten der Netzwerktheorie (TRUDEAU 2013; CHARTRAND und ZHANG 2012). Nachfolgend werden einige Arbeiten aus dem Bereich der Netzwerk- bzw. Graphentheorie vorgestellt.

MISHRA et al. listen verschiedene Maße für Zentralität und Konnektivität auf, die in der Literatur zu sozialen Netzen und zu Verkehrsnetzen als Indikatoren für die Performanz Verwendung finden (MISHRA et al. 2012). ZHANG et al. untersuchen den Einfluss der Netzwerktopologie auf die Fähigkeit eines Transportnetzwerkes, mit Katastrophen zurechtzukommen (ZHANG et al. 2015). In numerischen Experimenten wurden 17 unterschiedliche Netzwerkstrukturen hinsichtlich Durchsatz, Konnektivität und Kompaktheit verglichen. IP und WANG repräsentieren Verkehrsnetze als ungerichtete Graphen und werten deren Resilienz und »Zerreibbarkeit« (friability) quantitativ aus (IP und WANG 2011). Der Ansatz wird am Beispiel des Schienennetzes auf dem chinesischen Festland verdeutlicht. DUAN und LU (2014) modellieren das Straßensystem einer Stadt zur Bestimmung seiner Widerstandsfähigkeit in ver-

schiedener Granularität. In einer empirischen Studie mit Straßennetzen sechs verschiedener Städte heben sie die Bedeutung der topologischen Struktur für die Widerstandsfähigkeit hervor.

Als Abschluss der obigen Ausführungen zur Reliabilität und Vulnerabilität sei mit OLIVEIRA et al. (2016) noch auf eine neuere Arbeit verwiesen, die diese beiden Konzepte auf Ebene der Indikatoren vergleicht. Nach einer Aufstellung der in der Literatur verwendeten Indikatoren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Straßennetzen werden am Anwendungsbeispiel eines komplexen Netzes, welches die Stadt Rio de Janeiro repräsentiert, Maße für Zuverlässigkeit und Verwundbarkeit gegenübergestellt und auf ihre Anwendbarkeit hin verglichen.

Als Überleitung vom Konzept der Vulnerabilität zum im nächsten Punkt behandelten Konzept der Resilienz erwähnen wir hier den Übersichtsartikel von MATTSSON und JENELIUS (2015), der die beiden Konzepte in Verbindung bringt und der weiter unten nochmals aufgegriffen wird.

5.5 Resilienz

In der wissenschaftlichen Literatur existieren umfangreiche Überblicksartikel zum Konzept der Resilienz und ihrer Messung. Zunächst stellen wir einen aktuellen Überblicksartikel vor, der sich mit Resilienz in verschiedenen Anwendungsfeldern beschäftigt, um dann auf eine Übersicht speziell aus dem Bereich Verkehr einzugehen.

HOSSEINI et al. geben einen umfassenden Überblick zu Definitionen und Maßen der Resilienz von Systemen (HOSSEINI et al. 2016). In ihrer Klassifizierung der Fachliteratur zur Modellierung von Resilienz bezüglich qualitativer und quantitativer Ansätze wird zusätzlich der untersuchte Anwendungsbereich – unter anderem auch Transport und Verkehr – angegeben. Bei den quantitativen Maßen für Resilienz unterscheiden die Autoren zwischen generischen Resilienz-Metriken (generic resilience metrics) und Modellen, die die Struktur des untersuchten Systems berücksichtigen (structural-based modeling). Bei ersteren wird zwischen deterministischen und probabilistischen Ansätzen unterschieden. Bei letzteren unterscheiden die Autoren zwischen Optimierungs-, Simulations- oder »Fuzzy Logic«-Modellen. Durch die tabellarische Aufstellung der in dem Artikel vorgestellten Literatur ist es möglich, gezielt nach oben angegeben Kriterien zu

suchen. Von den über 60 aufgelisteten Veröffentlichungen werden zehn dem Bereich Verkehr zugeordnet. Zwei Arbeiten aus diesem Bereich mit quantitativen Methoden werden hier als Beispiele angeführt.

HENRY und RAMIREZ-MARQUEZ beschreiben generische Metriken zur Quantifizierung der Resilienz von Systemen, wobei sie Resilienz als eine zeitabhängige Funktion betrachten (HENRY und RAMIREZ-MARQUEZ 2012). Zur Illustration ihres Ansatzes verwenden sie das Seervada-Park-Problem (HILLIER und LIEBERMAN 2015) als ein einfaches Netzwerkbeispiel aus dem Bereich Verkehr. In einer Erweiterung dieser Arbeit, die dasselbe Netzwerkbeispiel zur Illustration verwendet, wird eine neuartige »Heat Map«-Visualisierung vorgestellt, die es erlaubt, die Resilienz verschiedener Systeme oder unterschiedlicher Modifikationen eines Systems zu vergleichen (GAMA DESSAVRE et al. 2016). Dabei führen die Autoren eine neue Dimension der System-Resilienz ein, die sie »Stress« nennen, welche an die Definition von Resilienz in den Materialwissenschaften angelehnt ist.

Ein Beispiel für eine strukturbasierte Modellierung ist der Optimierungsansatz von FATURECHI und MILLER-HOOKS, der ebenfalls aus dem Anwendungsbereich Transport stammt (FATURECHI und MILLER-HOOKS 2014). Die Autoren schlagen ein Verfahren zur Quantifizierung und Optimierung der Resilienz von Wegzeiten in Straßennetzen unter Katastrophenereignissen vor. Sie betrachten verschiedene Phasen des Katastrophen-Managements vor und nach dem Ereignis. Zur Illustration von Modellen und zugehöriger Berechnung wird ein aus der Literatur bekanntes Beispiel eines Fernverkehrsstraßennetzes (SUWANSIRIKUL et al. 1987) eingesetzt.

Das Thema der Resilienz in Transportsystemen behandeln auch TAMVAKIS und XENIDIS (2012). Nach einer Literaturübersicht stellen sie einen Rahmen (framework) für Resilience Engineering von Transportsystemen vor. In einer weiteren Publikation der selben Autoren evaluieren und vergleichen sie verschiedene Methoden zur Quantifizierung von Resilienz (TAMVAKIS und XENIDIS 2013).

Zur Erarbeitung eines konzeptionellen Rahmens zum Verständnis von Resilienz im Bereich Verkehr sei hier auf Aura REGGIANI verwiesen. Sie schlägt ein generelles Framework zur Integration der Konzepte Netzwerk-Resilienz mit dem der Sicherheit

von Verkehr vor (REGGIANI 2013). Insbesondere werden methodische Überlegungen zur Rolle von Resilienz und Vulnerabilität im Verhältnis zur Konnektivität von Netzwerkstrukturen angestellt.

In einer weiteren Publikation von REGGIANI und Kollegen werden verschiedene Studien auf diesem Gebiet systematisch bezüglich der Konzepte Resilienz und Vulnerabilität eingeordnet, wobei der Fokus auf der Verbindung dieser Konzepte zu Konnektivität und Erreichbarkeit in Verkehrsnetzen liegt (REGGIANI et al. 2015). Diese Publikation ist Teil einer Sonderausgabe zur Resilienz von Netzwerken der Fachzeitschrift »Transportation Research Part A«, die die Konzepte Resilienz, Vulnerabilität, Konnektivität und Störung (disruption) miteinander in Beziehung bringt (CASCHILI et al. 2015). Dabei sind die Artikel so ausgewählt, dass sie jeweils zwei der vier Konzepte adressieren, was in der Summe zu sechs möglichen Kombinationen führt (siehe Bild 5.2).

Neben den bereits erwähnten Artikeln zur Verbindung der Konzepte Resilienz und Vulnerabilität von (MATTSSON und JENELIUS 2015) sowie (REGGIANI et al. 2015), die zusätzlich noch das Konzept der Konnektivität einbeziehen, gehen wir an dieser Stelle auf DEMIREL et al. ein, die ein Framework vorschlagen, um die die beiden letztgenannten Konzepte Vulnerabilität und Konnektivität in Bezug auf das Straßennetz der EU untersuchen (DEMIREL et al. 2015). Dabei geht es um eine Bewertung der potenziellen Sensitivität der Transportinfrastruktur bezüglich eines Anstieg des Meeresspiegels und einer zukünftigen Zunahme von Sturmfluten. In einer Fallstudie zur nordöstlichen Küstenregion

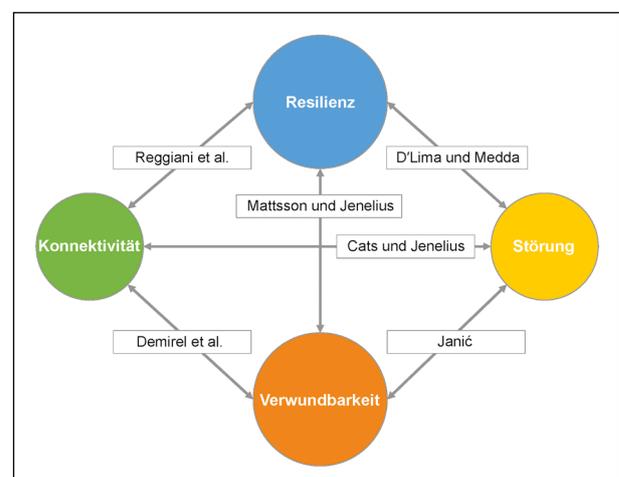


Bild 5.2: Veröffentlichungen zu Verbindungen zwischen Konzepten nach CASCHILI et al. (2015)

Spaniens kommen Indikatoren für Erreichbarkeit und Konnektivität zum Einsatz.

Das Verhältnis der Konzepte Resilienz und Störung (disruption) wird von (D'LIMA und MEDDA 2015) aufgegriffen. Sie fokussieren auf neue Maße für Resilienz, um Anwendern quantifizierbare Indikatoren der Systemresilienz zu liefern. Anwendungsbeispiel ist dabei die Auswirkungen von disruptiven Ereignissen auf die Londoner U-Bahn.

Zum Abschluss der Artikel aus der Sonderausgabe zum Thema Resilienz von Netzwerken erwähnen wir noch die verbleibenden zwei Anwendungsstudien von (JANIĆ 2015) zu Transportnetzwerken im Bereich Luftfahrt, die großflächigen disruptiven Ereignissen ausgesetzt sind und (CATS und JENELLUS 2015) zu öffentlichen Verkehrsnetzen (public transport networks).

Neben verschiedenen Indikatoren und Systemeigenschaften können auch unterschiedliche Ebenen mit Resilience Engineering betrachtet werden. Das umfasst die Betrachtung einzelner Infrastrukturobjekte auf Objektebene sowie die Bewertung der Funktion bzw. Relevanz eines Objekts auf Netzebene. Das erlaubt die Beurteilung der baulichen Zuverlässigkeit, die vor allem für die Sicherheit von Betreibern und Nutzern relevant ist, einerseits sowie die Bewertung der Verfügbarkeit, die die betriebliche (verkehrsliche) Zuverlässigkeit abbildet, andererseits. Die Thematik Objektebene wird im nächsten Kapitel behandelt.

5.6 Objektebene

Speziell im Bereich der Resilienz auf Objektebene zeigen verschiedene Veröffentlichungen, dass leistungsbezogene Ansätze, wie beispielsweise der »Performance-based approach« (KRAWINKLER und MIRANDA 2004), angewandt werden können, um ein Maß abzuleiten (BRUNEAU und REINHORN 2007). Methoden Risiko- und Verwundbarkeitsanalyse liefern Beiträge, um erwartete Verluste zu charakterisieren und die Effizienz einzelner Phasen der Resilienz zu bewerten (FISCHER et al. 2016).

KRÖGER und ZIO (KRÖGER und ZIO 2011) geben einen allgemeinen Überblick zur systematischen Verwundbarkeitsanalyse von kritischen Infrastrukturen mithilfe eines »All-Hazard«-Ansatzes. In ihrem Konzept werden die betrachteten Systeme in einzelne Ebenen hierarchisch unterteilt, wie es in

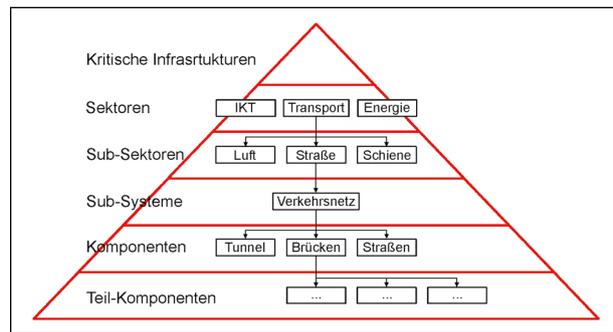


Bild 5.3: Hierarchische Gliederung von kritischer Infrastruktur (CI) von der Netzebene bis hin zur Objektebene und eine exemplarische Klassifizierung von Brückenbauwerken im gesamten System orientiert an KRÖGER und ZIO (2011)

Bild 5.3 dargestellt ist. Einzelne Komponenten sind durch physikalische oder logische Relationen verbunden. Dieser Ansatz erlaubt eine systematische Identifizierung von Schwachstellen.

Der quantitative Verwundbarkeitsansatz nach KRÖGER und ZIO (KRÖGER und ZIO 2011) liefert essentielle Beiträge zur Resilienz eines Systems und ist in einzelnen Schritten konzeptionalisiert:

1. System-Analyse und Identifizierung potenzieller Bedrohungen in Form von disruptiven Ereignissen
2. Quantifizierung von Verwundbarkeitsindikatoren
3. Identifizierung kritischer Komponenten
4. Anwendung von Schutzmaßnahmen

Neben der Beurteilung kritischer Infrastrukturen gibt es auch Gebiete, die in ähnlicher Systematik vorgehen. Der Ansatz von BALL (2007) präsentiert einen geschlossenen Ansatz zur Versagensbeurteilung von Flugzeugen in Abhängigkeit des Fluges. In diesem Konzept wird die »Survivability« über die Anfälligkeit und die Verwundbarkeit quantifiziert.

Ähnlich zu KRÖGER und ZIO (2011) wird im Ansatz nach BALL (2007) die Kritikalität des Gesamtsystems über die Verwundbarkeit einzelner Komponenten und deren Wichtigkeit beurteilt.

Eine ähnliche Vorgehensweise zur Identifizierung der Kritikalität wurde auch im Verbundprojekt SKRIBT (Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen) vorgenommen (VDI Technologiezentrum GmbH). Neben einer Bedrohungsanalyse wurden in diesem Projekt einzelne Objekte, wie Tunnel und Brücken, hinsichtlich ihrer Bauweise komponentenweise betrachtet, um die Kritikalität zu beurteilen.

5.7 Studien der Bundesverkehrswegeplanung

Um Studien aus dem deutschsprachigen Raum zu nennen, werden in diesem Kapitel noch kurz Arbeiten aus der Bundesverkehrswegeplanung aufgelistet, wobei nicht vertieft auf die Inhalte eingegangen wird.

In ihrem Schlussbericht für das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zum Projekt »Erfassung des Indikators Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung« beschreiben die Autoren die Hauptergebnisse ihrer Vorstudie (SIGNIFICANCE et al. 2012). Diese Vorstudie hat im Zusammenhang mit der Entwicklung eines neuen Bundesverkehrswegeplans (BVWP) die Zielsetzung, Möglichkeiten einer Aufnahme der Zuverlässigkeit von Transportzeiten in die Nutzen-Kosten-Analyse von Infrastrukturprojektanträgen zu untersuchen. Weiterhin stellt sie die Basis für das nachfolgend ausgeschriebene Forschungsvorhaben »Ermittlung des Einflusses der Infrastruktur auf die Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs für den Verkehrsträger Schiene« (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) 2015). Während die Vorstudie sich auf alle drei Verkehrsträger erstreckt, beschränkt sich das Forschungsvorhaben auf den Verkehrsträger Schiene, für den ein anwendbares Verfahren entwickelt werden soll.

GEISTEFELDT et al. ermitteln im Rahmen eines Forschungsauftrags des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur den Zusammenhang von Infrastruktur und Zuverlässigkeit für den Verkehrsträger Straße (GEISTEFELDT et al. 2014). Die Autoren entwickeln ein Modell zur Beschreibung der Standardabweichung der Reisezeit auf der Grundlage von makroskopischen Simulationen des Verkehrsablaufs im Sinne einer Ganzjahresanalyse. AXHAUSEN et al. erstellen ein Modell für modale Verlagerungen im Personenverkehr zur Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit für die Bundesverkehrswegeplanung und verfolgen hierfür einen Befragungsansatz (AXHAUSEN et al. 2015). Schwerpunkte dieses Schlussberichts sind zum einen die Modellschätzungen und zum anderen die daraus abgeleiteten Empfehlungen.

5.8 Zusammenfassung

Die im ersten Arbeitsschritt erstellte vertiefte Literaturstudie baut auf den bereits bekannten und im Angebot zum Forschungsvorhaben dargestellten Literaturangaben auf. Diese wurden deutlich erweitert und die vertiefte Literaturstudie enthält mehr als doppelt so viele Quellen. Die Berücksichtigung von Ansätzen aus dem Ausland wurde durch einen Fokus auf wissenschaftliche Publikationen in englischsprachigen Fachzeitschriften gewährleistet. Mit dem Ziel einer Bestandsaufnahme zu vorhandenen Verfahren und Modellen wurden mehrere Artikel herangezogen, die Literaturübersichten bereitstellen. Eine grundsätzliche Anwendbarkeit auf Verkehrsinfrastrukturen ist gegeben, da die vorgestellte Literatur fast ausschließlich aus dem Bereich der Verkehrsforschung stammt. Da umfangreiche relevante Literatur in diesem Forschungsbereich existiert, wurde es als zielführend erachtet, hier einen Fokus zu legen. Innerhalb der Verkehrsforschung wurde zudem ein Schwerpunkt auf den Straßenverkehr gelegt. Neben den Übersichtsartikeln bringen die vorgestellten Studien mit Anwendungsbeispielen den Aspekt der Praxistauglichkeit mit ein. Mit Hinblick auf einen ganzheitlichen Resilienzansatz stammt ein Großteil der aufgeführten Literatur aus Veröffentlichungen zur Resilienz von Verkehrsinfrastrukturen oder stellt Verbindungen zum Konzept der Resilienz her.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass umfangreiche Literatur zum Thema der Bestimmung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit in Form von Untersuchungen zur Reliabilität und Vulnerabilität von Verkehrsinfrastrukturen im Allgemeinen und Straßeninfrastrukturen im Speziellen vorhanden ist. In jüngerer Zeit gewinnt das Konzept der Resilienz von Verkehrsinfrastrukturen im Sinn einer ganzheitlichen Betrachtung aller Phasen vom Ausfall bis zur Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit zunehmend an Bedeutung und wird mit bereits bekannten Konzepten in Beziehung gebracht.

6 Begriffsdefinitionen und angewandte Methodik

Die Literaturstudie in Kapitel 5 hat gezeigt, welche Ansätze und Begriffe im Bereich des Resilience Engineering zur Anwendung kommen. Bedingt durch das breite interdisziplinäre Forschungsfeld kommt es zu Diversitäten bezüglich der Definition und Aus-

legung der angewandten Thematik. Speziell im Bereich Verwundbarkeit und Resilienz ist dieser Sachverhalt feststellbar (ADGER 2006), (CARPENTER et al. 2001).

Daher wird in diesem Kapitel vorgestellt, welche Begriffsdefinitionen in diesem Forschungsvorhaben die Basis für die vorliegende Thematik bilden (siehe Kapitel 6.1). Basierend auf diesen Arbeitsdefinitionen wird in Kapitel 6.2 die neu entwickelte Methodik zur Bewertung von Resilienz von Straßeninfrastruktur vorgestellt.

6.1 Begriffsdefinitionen

Mit den Erkenntnissen aus (EDWARDS 2009) und (Committee on Increasing National Resilience to Hazards and Disasters et al. 2012) wurde der Begriff Resilienz in (THOMA 2014) wie folgt definiert und für die vorliegende Arbeit aufgefasst:

»Resilienz ist die Fähigkeit, tatsächliche oder potenziell widrige Ereignisse abzuwehren, sich darauf vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie zu verkraften, sich davon zu erholen und sich ihnen immer erfolgreicher anzupassen. Widrige Ereignisse sind menschlich, technisch sowie natürlich verursachte Katastrophen oder Veränderungsprozesse, die katastrophale Folgen haben.«

Basierend auf dieser Definition kann der Begriff Resilienz mit einem Zyklus, bestehend auf fünf Phasen, dargestellt werden, wie es in Bild 6.1 dargestellt ist.

Verschiedene Eigenschaften beeinflussen die Resilienz eines Systems, welche nach (BRUNEAU et al. 2003) in vier Dimensionen (technische, organisatorische, gesellschaftliche ökonomische) kategorisiert

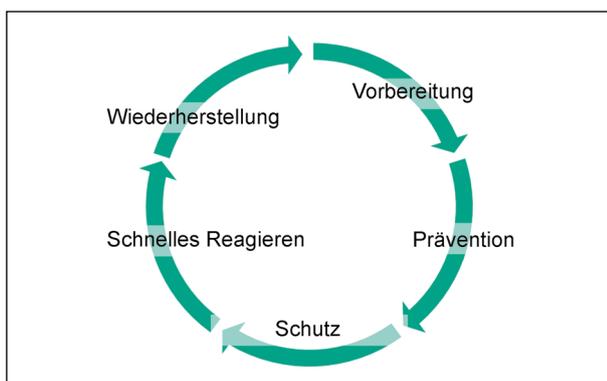


Bild 6.1: Fünf Phasen des Resilienzzyklus basierend auf (THOMA 2014)

werden können. Diese Dimensionen werden maßgebend durch folgende Indikatoren beeinflusst (BRUNEAU und REINHORN 2007):

- Robustheit: Reduzierung der erwarteten Verluste, wenn ein disruptives Ereignis eintritt,
- Schnelligkeit: Schnellstmögliche Reaktion zur Priorisierung, sodass der ursprüngliche Zustand erreicht wird,
- Ressourcen: Fähigkeit zur Bereitstellung von Möglichkeiten, welche die Zeit der Erholung oder Wiederherstellung minimieren,
- Redundanz: Substitution des betroffenen Systems.

Der Verlust eines Leistungskriteriums wird maßgebend durch die Verwundbarkeit eines Systems beeinflusst. Mit den Erkenntnissen aus (FISCHER et al. 2016) wird die physikalische Verwundbarkeit als negativer Begriff aufgefasst. Sie wird als bedingte Wahrscheinlichkeit ausgedrückt und den Schadenswirkungen eines potenziellen disruptiven Ereignisses zugeordnet. Somit beschreibt Verwundbarkeit das Vermögen des erwarteten Schadens oder die Anfälligkeit im Umgang mit Bedrohungen, unter der Bedingung, dass ein widriges Ereignis eintritt.

Die Kritikalität stellt eine mehrdimensionale Größe dar und verknüpft die Verwundbarkeit mit weiteren Leistungsmerkmalen, wie beispielsweise die Belastung eines Objekts und die Häufigkeit der Vorkommnis im System. Beispielsweise besitzt ein Element der Verkehrsinfrastruktur mit hoher Verwundbarkeit und geringer Verkehrsbelastung eine geringe Kritikalität.

6.2 Methodik zur Bewertung von Straßenverkehrsinfrastruktur

Kapitel 6.1 hat gezeigt, mit welchen Definitionen die verwendeten Begriffe im Rahmen dieses Forschungsvorhabens interpretiert werden. Basierend darauf wird in diesem Kapitel die Methodik zur Bewertung von Straßeninfrastruktur vorgestellt.

Ein zeitabhängiges Leistungskriterium, beispielsweise der Verkehrsfluss auf einer Straße, kann angewandt werden, um ein Maß für Resilienz abzuleiten. Bild 6.2 zeigt eine verallgemeinerte Darstellung. Das Eintreten eines disruptiven Ereignisses zum Zeitpunkt t_0 verursacht einen Verlust des Leistungskriteriums $Q(t)$. Erste Schritte nach einem Er-

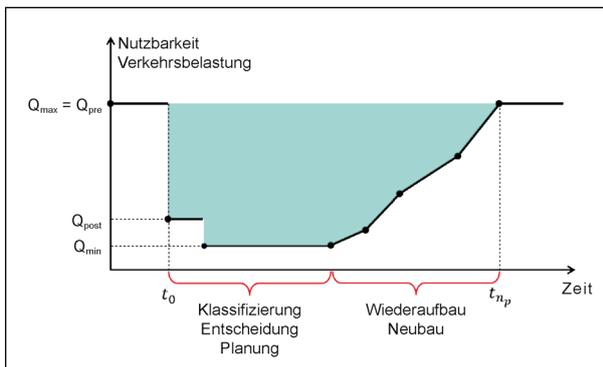


Bild 6.2: Verallgemeinertes Leistungs-Zeit Verhältnis als Grundlage zur Quantifizierung von Resilienz auf Objektebene in Anlehnung an FISCHER 2018

ereignis werden durch Klassifizierung der Schäden, Entscheidungen und Planungen dominiert. Ein optionaler Abriss kann den Funktionswert auf ein Minimum bringen. Der Neu- oder Wiederaufbau sorgt für einen Anstieg der Kurve.

Die Messung des Leistungsverlustes über die Zeit (grüne Fläche in Bild 6.2) wird angewandt um ein Maß für Resilienz abzuleiten. Somit ergibt sich

$$R_Q = \frac{1}{Q_{max} (t_{np} - t_0)^2} \int_{t_0}^{t_{np}} (Q_{max} - Q(t)) dt \quad (1)$$

Das Flächenmaß wird in Relation zum betrachteten Zeitintervall gesetzt, sodass eine schnellere Erholung zu einem resilienteren System führt.

Im Rahmen dieses Projekts wird dieses Konzept zur Bewertung von Straßeninfrastruktur angewandt. Es wird differenziert eine Bewertung von Netz- und Objektebene vorgenommen. Das Straßennetz wird abstrahiert als ein Knoten-Kanten Modell abgebildet und die Verkehrsfluss Verteilung bei Unterbrechung des Netzes analysiert. Auf Objektebene wird ein einzelnes Bauwerk als vereinfachtes statisches Ersatzmodell abgebildet und die Belastbarkeit unter Einfluss einer beliebigen Störung, wie beispielweise ein Extremwetterereignis untersucht. Die Reduzierung der Gebrauchstauglichkeit quantifiziert die Diskontinuität zum Zeitpunkt t_0 in Bild 6.2. Spezielles Augenmerk bei sowohl der Netz- als auch der Objektebene liegt auf einer plausiblen Vereinfachung der verwendeten Modelle, die zur Berechnung der Performanzparameter und Resilienzindikatoren herangezogen werden. Diese Vereinfachungen sollen es ermöglichen die große Anzahl an Elementen im Bundesfernstraßennetz zeiteffizient

zu bewerten. Dazu werden die Modelle auch besonders dahingehend aufgebaut, dass die erforderlichen Eingangsparameter auch vollständig zur Verfügung stehen bzw. ebenso effizient ermittelt werden können. Liegen ausreichend Informationen für das zu bewertende Objekt vor, kann mit dem Analyseschema ein beliebiges Bauwerk charakterisiert werden.

Die in Kapitel 6.1 genannten Indikatoren (Robustheit, Schnelligkeit, Ressourcen und Redundanz) wirken sich bei einem widrigen Ereignis auf die zu erwartende Form der Kurve nach Bild 6.2 aus. Robustheit führt zu einem geringeren Abfall des Leistungskriteriums unmittelbar nach dem Ereignis. Schnelligkeit verkürzt die Zeit zur Reaktion und zur Wiederherstellung des Ausgangsniveaus. Ressourcen minimieren ebenfalls die Zeit bis zur Wiederherstellung durch eine erhöhte Fähigkeit zur Bereitstellung von Gegenmaßnahmen. Bei Redundanzen im System kann die beeinträchtigte Funktion von anderen Teilen des Systems substituiert werden. Bei Vorliegen von Redundanzen in Form von mehreren parallel verlaufenden Verkehrsverbindungen kann auf Netzwerkebene beispielsweise der Ausfall einer dieser parallelen Verbindungen mit dem Ausfall einer Verbindung, die keine oder weniger entsprechend Parallelen besitzt, verglichen werden.

Die hier vorgestellte und im Weiteren ausgeführte und exemplarisch angewendete Methodik stellt somit einen abgewogenen Ansatz, zwischen erforderlicher und erreichbarer Prognosegüte und den zur Verfügung stehenden Daten und deren effizienter Auswertung, dar. Auf Netzebene wird, unabhängig des Szenarios, der Ausfall einzelner Komponenten und der daraus resultierende Verkehrsfluss analysiert. Im Bereich der Objektebene wird ein beliebiges Bauwerk idealisiert dargestellt und die Gebrauchstauglichkeit unter Einwirkung eines beliebigen Szenarios charakterisiert. Somit muss sich nicht, im Gegensatz zu bisherigen Methoden, auf einzelne Gefährdungsszenarien fokussiert werden. Im Rahmen dieses Projekts werden auf Objektebene beispielhaft zwei verschiedene Gefährdungsszenarien betrachtet, um die Methodik und die Bewertung beliebiger Szenarien zu demonstrieren.

7 Szenarien

Die Resilienzbewertung von Elementen der Straßeninfrastruktur erfolgt zunächst mit einer Netzanalyse um kritische Streckenabschnitte, Knotenpunkte und Objekte zu identifizieren. Daraus resultierend können kritische Streckenabschnitte, Knotenpunkte und Objekte identifiziert werden, welche dann auf Objektebene hinsichtlich der Sicherheit und Verfügbarkeit mithilfe von Resilienzindikatoren untersucht werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden Methoden zur Quantifizierung entwickelt und die Resultate einzelner Objekte durch Aggregation im Netz in einem ganzheitlichen Überblick wiedergegeben.

Für die Bestimmung solcher Indikatoren ist es entscheidend, die relevanten Szenarien und ihren Einfluss auf die Sicherheit und Verfügbarkeit zu kennen, da sich ein Teil der Indikatoren aus diesen Szenarien bzw. ihren Auswirkungen auf die Straßenverkehrsinfrastruktur ableiten lässt. Mithilfe des Szenarios Hochwasser lässt sich beispielsweise ableiten, dass die Höhenlage des betrachteten Elements sowie die Entfernung zu einem Fluss, aber auch bauliche Beschaffenheiten wie die Stabilität gegenüber anprallenden angeschwemmten Materialien Indikatoren zur Bewertung der Sicherheit und Verfügbarkeit sein können. Bei der Definition des Szenarios ist zu beachten, dass es oft einen direkten Zusammenhang zwischen der Art des Infrastrukturelements und den jeweils relevanten Szenarien gibt (KAUNDINYA et al. 2016). In ihrer Veröffentlichung dazu beschreiben KAUNDINYA et al. einen Ereignisablauf, der mit einem Initialereignis beginnt und sich lokal in unterschiedlichen Phänomenen oder Ausprägungen eines Phänomens äußern kann. Das lokal auftretende Phänomen hat dann Auswirkungen auf ein bestimmtes Element der Infrastruktur, wodurch wiederum Konsequenzen durch z. B. eine eingeschränkte Verfügbarkeit dieses Elements hervorgerufen werden. Diese lokalen Konsequenzen haben Auswirkungen auf das gesamte Netz. Betrachtet man beispielsweise ein regional auftretendes Unwetter, so kann sich dieses in lokal sehr unterschiedlichen Phänomenen äußern. Während an einem Ort Erdbeben ausgelöst werden, kann an anderer Stelle das zuvor bereits genannte Hochwasser auftreten. Auf unterschiedliche Elemente haben diese beiden Phänomene wiederum unterschiedliche Auswirkungen mit verschiedenen Konsequenzen lokal und auf Netzebene.

Die entwickelte Methodik kann für beliebige Bedrohungsarten angewandt werden. In Fallbeispielen soll die Durchführbarkeit demonstriert werden. Im ersten Schritt wird ein Realereignis herangezogen. Die real aufgetretenen Konsequenzen werden mit den Modellprognosen verglichen und charakterisieren so die Qualität der neu entwickelten Methodik. Dieses Bedrohungsszenario wird nachfolgend in Kapitel 7.1 dargestellt. Mit einem generischen Beispiel wird ein Hochwasserszenario an einem Brückenbauwerk untersucht. Die Definition der Bedrohung ist in Kapitel 7.1 vorgestellt. Weiterhin wird ein Realereignis herangezogen um die Qualität der Prognosen auf Netz- und Objektebene zu charakterisieren.

7.1 Brandbelastung in Anlehnung an ein Realereignis

Im Februar 2012 kam es durch eine Brandbelastung an einem Brückenbauwerk der Bundesautobahn 57 in der Nähe von Dormagen zu erheblichen Beeinträchtigungen. Lagernde Plastikrohre unterhalb der Brücke wurden von Unbekannten angezündet. Durch starke Rauchentwicklungen kam es zu Sichtbehinderungen was eine Massenkarambolage mit einem Todesopfer und 16 teilweise schwer Verletzten verursachte.

Durch den Brand kam es zu einer hohen Temperaturbelastung mit bis zu 1.000 °C am Bauwerk. Wegen Einsturzgefahr war ein Abriss der Brücke erforderlich. Zwei Monate nach der Katastrophe wurde eine Behelfsbrücke errichtet und im Anschluss wurde mit dem Neubau von zwei parallel liegenden, eigenständigen Brückenkörpern begonnen. Der erste Brückenkörper wurde im Februar 2017 fertiggestellt und die komplette Fertigstellung wird im Frühjahr 2018 erwartet.

In Anlehnung an die gesichtete Literatur in Kapitel 5.6 kann dieses Ereignis in einem Leistungs-Zeit-Diagramm abgebildet werden, um über den Verlust und die Wiederherstellung eines Leistungskriteriums, hier die Nutzbarkeit der Autobahn, ein Maß für Resilienz abzuleiten. Bild 7.1 zeigt skizzenhaft die Umsetzung. Auf der Abszisse sind die wesentlichen Zeitschritte und zugehörigen Ereignisse aufgetragen. Durch das Anbringen der Behelfsbrücke konnte die Nutzbarkeit annähernd wiederherstellen. Mit dem Neubau soll eine Erweiterung auf sechs Spuren erfolgen und somit würde dies in einer Erhöhung der Nutzbarkeit resultieren.

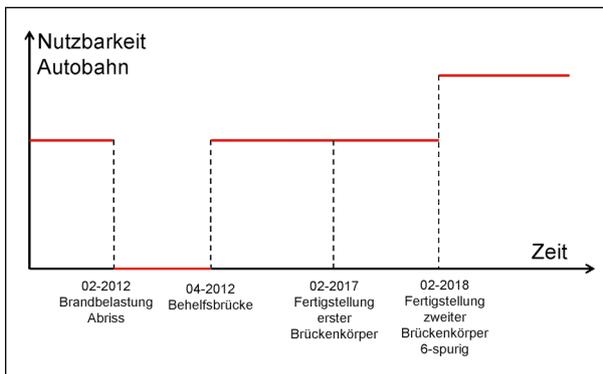


Bild 7.1: Chronologische Zusammenfassung des Realereignis und schematische Darstellung der Nutzbarkeit der Autobahn

Zum Nachweis der Validität wird mit der entwickelten Methodik, wie sie in Kapitel 6.2 vorgestellt ist, dieses Szenario nachgerechnet. Auf Netzebene wird der Bereich um den Schadensort nachgebildet und die Verkehrssituation vor, während und nach dem Brandereignis untersucht, siehe Kapitel 10.3.1. Auf Objektebene wird das Brückenbauwerk nachgebildet und unter Brandlast analysiert, ob es auch im Modell zu einem Ausfall kommt, siehe Kapitel 11.2.1.

7.2 Hochwasserbelastung

Mit dem zweiten Szenario wird ein generisches Bedrohungsszenario in Form von Hochwasserbelastung betrachtet. Auf Objektebene werden zwei verschiedene Belastungen analysiert. Eine Unterspülung der Gründung ruft ein ungleichmäßiges Senken der Stützen hervor und das Anspülen von Treibgut verursacht eine horizontale Belastung am Bauwerk. Simultan zum ersten Belastungsszenario soll mit diesem Beispiel die Analyse beliebiger Bedrohungen analysiert werden. Weiterhin liefern die Resultate eine quantitative Bewertung von Resilienzindikatoren.

Auf Netzebene zeichnet sich das Szenario Hochwasserbelastung dadurch aus, dass – im Gegensatz zur Betrachtung einer einzelnen Brücke – mehrere Verbindungen ausfallen können.

Somit sind durch die zwei Szenarien räumliche Gebiete verschiedener Größe abgedeckt: zum einen eine eher lokale Betrachtung bei Ausfall eines Brückenbauwerks und zum anderen eine regionale Betrachtung, die den Ausfall mehrere Verbindung mit sich zieht. Für beide Szenarien liegen Daten vor, wie beispielsweise Bauwerksdaten oder Hochwas-

sergefahrenkarten. Eine ausführlichere Beschreibung der Daten ist in den zwei folgenden Kapiteln 8 für die Netzebene und 9 für die Objektebene angegeben.

8 Daten zur Netzebene/ Geodaten

Dieses Kapitel beschreibt die im Projekt verwendeten Daten zur Netzebene bzw. Geodaten, denen über eine Georeferenz eine definierte räumliche Lage auf der Erdoberfläche zugewiesen werden kann. Zum einen werden Geobasisdaten in Form von Verwaltungsgebieten der Bundesrepublik Deutschland sowie Straßennetzdaten dargestellt. Zum anderen werden verschieden Geofachdaten beispielsweise zur Verkehrsstärke oder zu Zustandsnoten von Brückenbauwerken vorgestellt. Abschließend wird auf Daten aus Hochwassergefahrenkarten eingegangen.

Ziel dieses Kapitels ist es, zunächst die verfügbaren Daten, die später im Demonstrator darstellbar sind, aufzulisten. Die Auswertungen selbst erfolgen in den Kapiteln 10 (Verfahren und Modelle der Netzebene) und 12 (Demonstrator).

8.1 Verwaltungsgebiete

Das »Bundesamt für Kartografie und Geodäsie« (Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) 2017a) stellt durch das Dienstleistungszentrum des »Bundes für Geoinformation und Geodäsie (DLZ)« (Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) 2017b) Geodaten des Bundes zur Verfügung. Unter der Rubrik »Open Data« werden Digitale Landschaftsmodelle (DLM), Digitale Geländemodelle (DGM), Digitale Topografische Karten (DTK), Übersichtskarten (ÜK), Verwaltungsgebiete (VG) und Geografische Namen (GN) in verschiedenen Formaten angeboten und stehen kostenfrei zum Download und zur Online-Nutzung zur Verfügung.

Die Verwaltungsgebiete (VG) beschreiben als Vektordaten die Verwaltungseinheiten in ihrer Hierarchie vom Staat über Länder, Regierungsbezirke und Kreise bis zu Verwaltungsgemeinschaften und Gemeinden. Im konkreten Fall wird hier auf das Produkt »VG250-EW« eingegangen, welches in einem Maßstab von 1:250 000 vorliegt und zusätzlich Einwohnerzahlen (Stand 31.12.2015) beinhaltet.

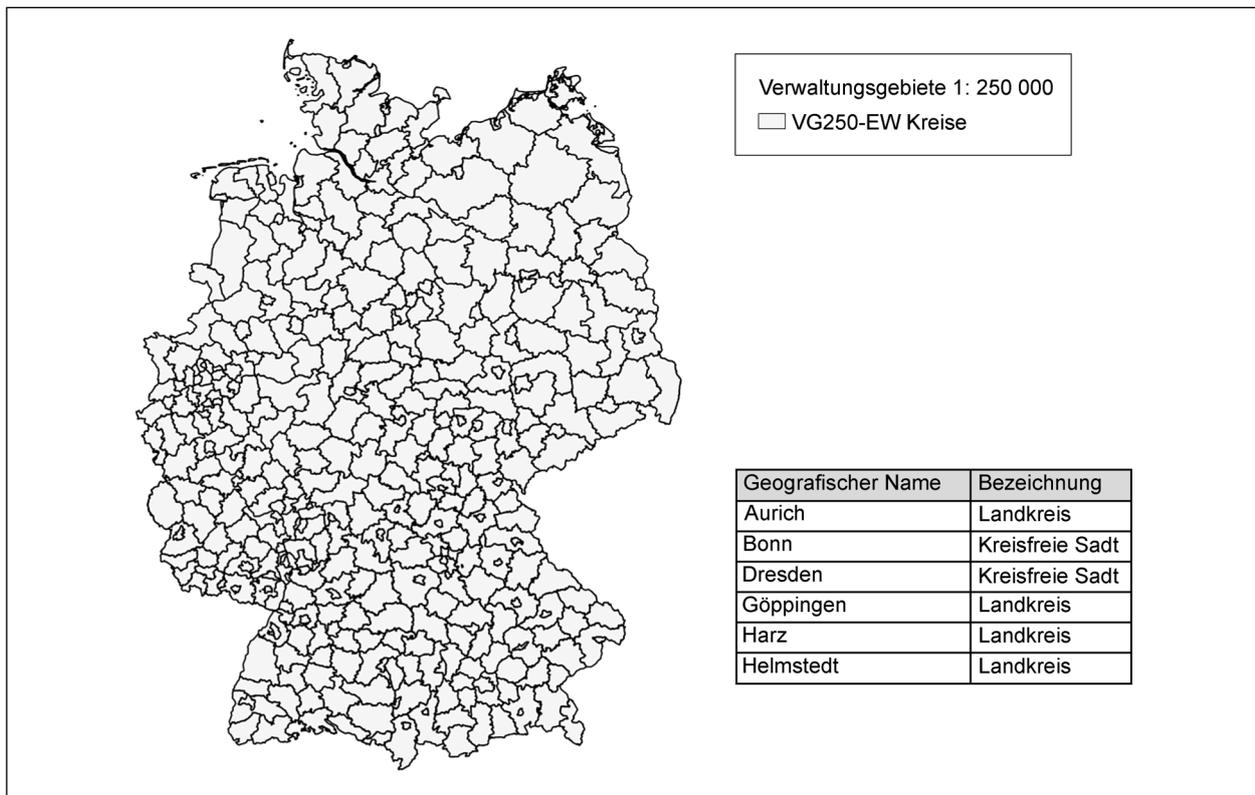


Bild 8.1: Verwaltungsgebiete: Kreise

Das hier verwendete Shapefile enthält die unterschiedlichen Verwaltungseinheiten als einzelne Ebenen und weist ein Datenvolumen von etwa 100 MB auf. Es werden verschiedene Georeferenzierungen bereitgestellt, wobei hier UTM32 zum Einsatz kommt. Bild 8.1 zeigt für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland die Verwaltungseinheit Kreise. Ein Ausschnitt aus der zugehörigen Tabelle mit Daten für den geografischen Namen und die Bezeichnung Landkreis oder kreisfreie Stadt ist ebenfalls angegeben. Eine Zeile in der Tabelle entspricht einem Kreis mit dem zugehörigen Feature als Polygon sowie weiteren Daten, wie beispielsweise den oben genannten Einwohnerzahlen.

Die Geobasisdaten zu den Verwaltungsgebieten werden im Projekt zum einen dazu verwendet, um in einer Kartendarstellung dem Betrachter eine Orientierung zu verschaffen, sodass ein Bezug zur Lage anderer Daten wie beispielsweise Straßendaten herstellbar ist. Zum anderen werden sie mittels Operationen der Geoverarbeitung (geoprocessing) dazu eingesetzt, umfangreiche andere Geodaten nur für bestimmte Gebiete zu betrachten.

8.2 Straßennetzdaten

Das Bundesinformationssystem Straße (BISStra) (Bundesanstalt für Straßenwesen 2015) ist ein geografisches Informationssystem, das aus einem Kernsystem und verschiedenen Fachsystemen besteht. Alphanumerische und geometrische Straßennetzdaten der Bundesfernstraßen werden im Kernsystem gespeichert.

Die BAST hat dem Fraunhofer EMI im Rahmen des Projekts einen Testdatensatz des Straßennetzes aus BISStra (Stand: 3. Quartal 2015) mit Fahrbahnen und Fahrstreifen (soweit vorhanden) zur Verfügung gestellt. Bild 8.2 zeigt den Ausgangsdatsatz für die Bundesfernstraßen, welcher aus knapp 90.000 einzelnen Features besteht.

In Bild 8.3 ist eine Kategorisierung in Autobahnen (Blau) und Bundesstraßen (Gelb) über den Anfangsbuchstaben (»A«, »B«) des Attributs »STR_KENNUG« in der Tabelle der Daten vorgenommen worden. Weiterhin wurden die Straßen anhand der Stellenzahl der Nummer in der Straßenkennung kategorisiert. Dabei wird in erster Näherung ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Stellen in der Nummer und der Bedeutung der jeweiligen Autobahn bzw. Bundesstraße angenommen (einstelli-

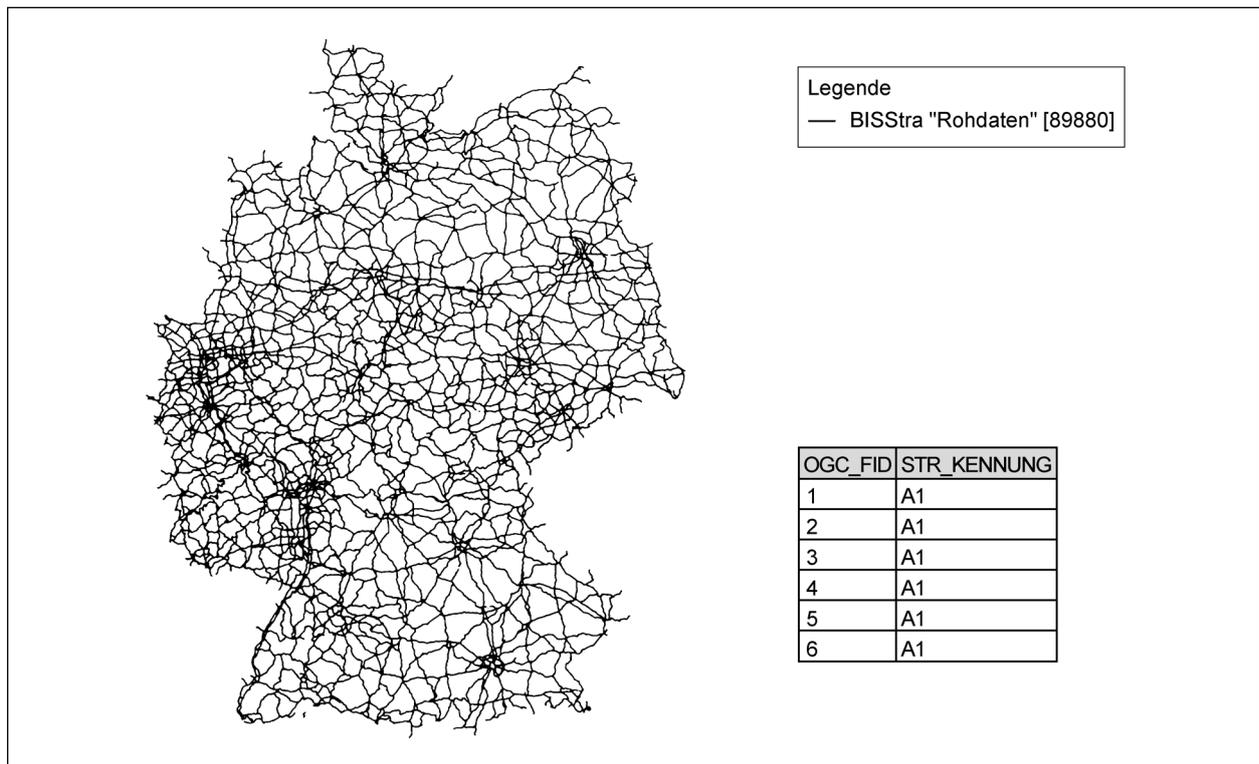


Bild 8.2: BISStra Ausgangsdaten

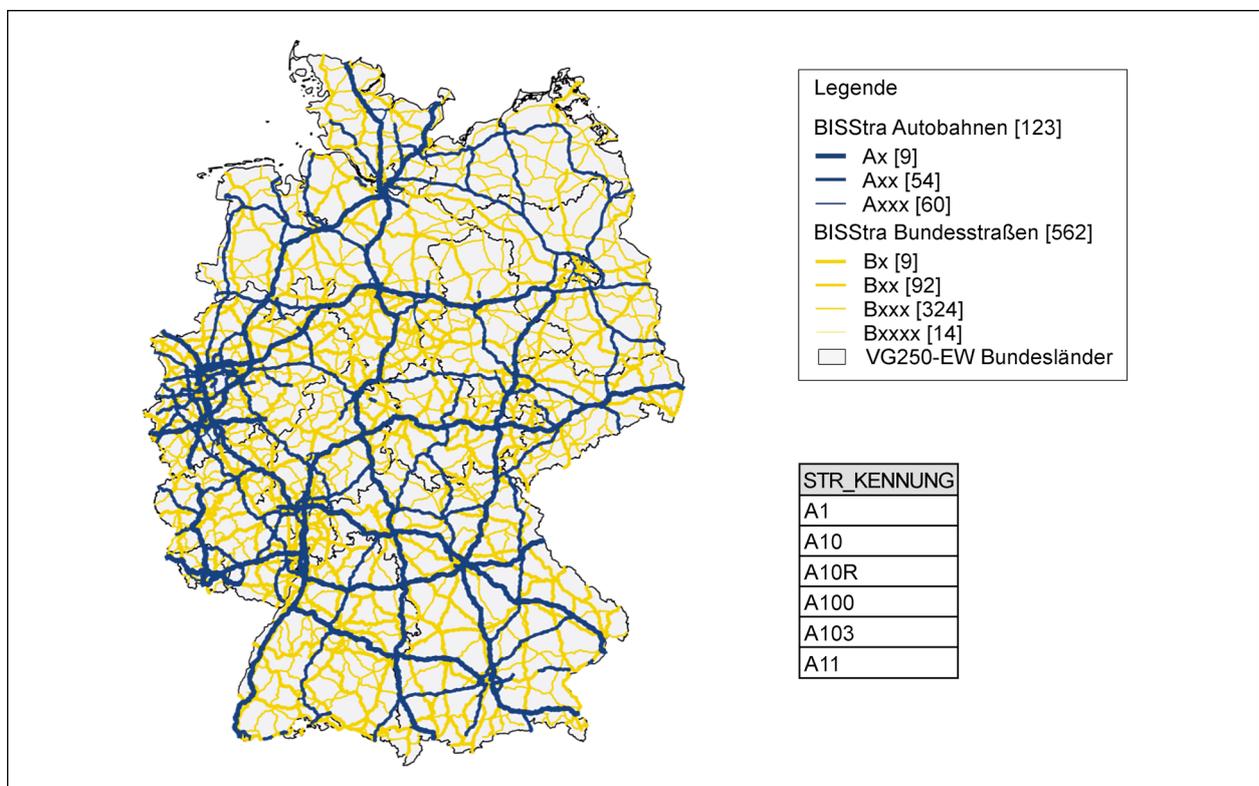


Bild 8.3: BISStra: Autobahnen und Bundesstraßen

ge Nummer: bundesweite oder grenzüberschreitende Bedeutung, zweistellige Nummer: übergeordnete regionale Bedeutung, dreistellige Nummer: regionale oder städtische Bedeutung).

In der Visualisierung wird die unterschiedliche Stellenzahl durch eine unterschiedliche Strichstärke zum Ausdruck gebracht, wobei die Strichstärke mit zunehmender Stellenzahl abnimmt. Als »Basis-Layer« dienen die Bundesländer aus den Daten zu den Verwaltungsgebieten des »Bundesamtes für Kartografie und Geodäsie (BKG)«.

An dieser Stelle sei noch auf die Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (kurz RIN) verwiesen, die die Verbindungsfunktion von Straßen in sechs Stufen unterteilt: kontinental, großräumig, überregional, regional, nahräumig und kleinräumig (GERLACH 2009). Beim Vorliegen derartiger Daten zur Einteilung ist eine entsprechende Visualisierung mit mehr Abstufungen ebenfalls möglich.

In dem von der BASt zur Verfügung gestelltem Testdatensatz sind, wie oben bereits erwähnt, teilweise Angaben zu der Anzahl der Fahrstreifen vorhanden. Es existieren die Attribute FS_GESAMT, FS_IN und FS_GEGEN für die Gesamtanzahl der Fahrstreifen, die Anzahl der Fahrstreifen in Fahrtrichtung sowie

die Anzahl der Fahrstreifen in der Gegenrichtung. Die für einzelne Features in den Daten enthaltenen Werte der Attribute wurden für die Darstellung anhand von zwei gleichzeitig zu erfüllenden Bedingungen gefiltert. Erstens sollte sichergestellt werden, dass die Gesamtanzahl der Fahrstreifen sich additiv aus den Fahrstreifen in Fahrtrichtung sowie in der Gegenrichtung zusammensetzt.

- „FS_GESAMT“ = „FS_IN“ + „FS_GEGEN“

Diese Bedingung kann allerdings auch erfüllt werden, wenn alle der drei beteiligten Attribute den Wert 0 aufweisen. Um das auszuschließen, wurde eine zweite Bedingung eingeführt.

- „FS_GESAMT“ != 0

Nach Verknüpfung dieser zwei Bedingungen durch logisches UND wurden die Daten aus dem Testdatensatz entsprechend gefiltert, d. h., alle Features, die die beiden Bedingungen nicht erfüllen, wurden von der Betrachtung ausgeschlossen. Das führte dazu, dass nur noch die Straßendaten von Nordrhein-Westfalen übrigblieben. In Bild 8.4 ist für Nordrhein-Westfalen das Straßennetz, bestehend aus Autobahnen und Bundesstraßen, dargestellt, wobei eine Einfärbung der Features nach Gesamt-

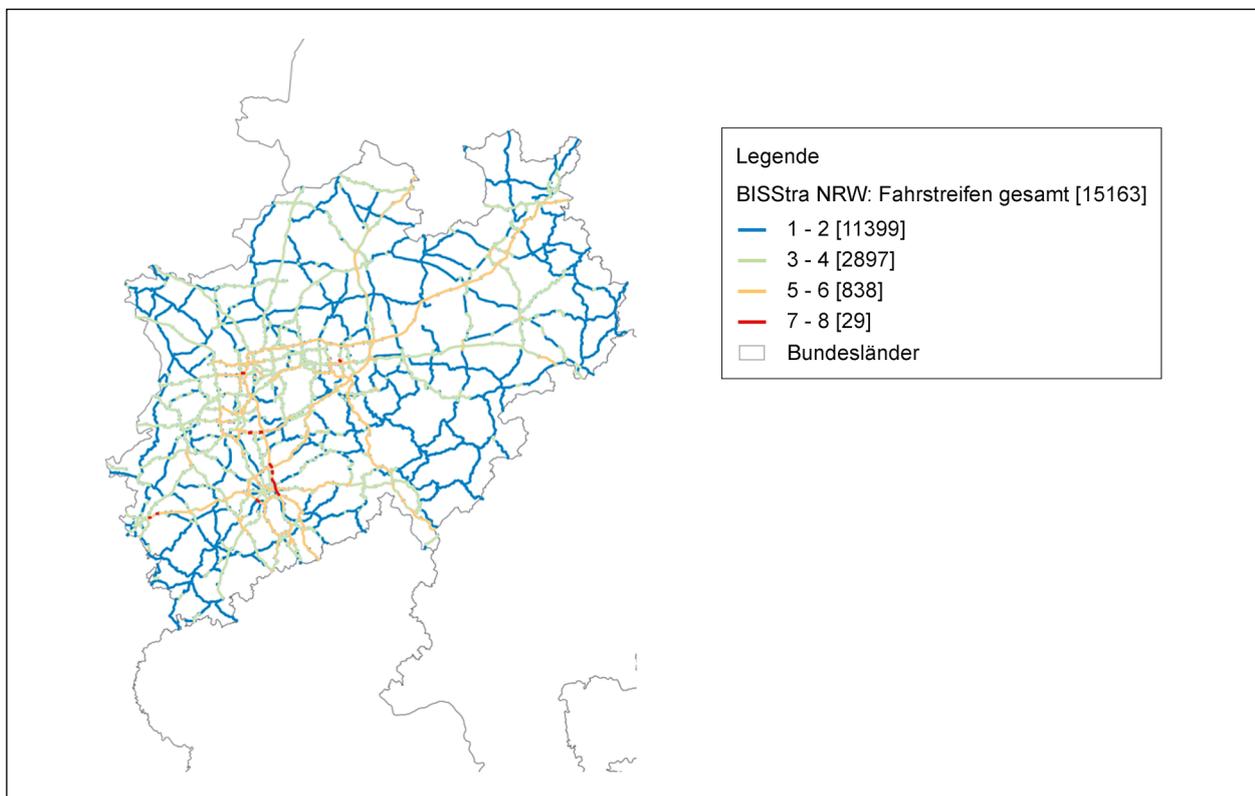


Bild 8.4: Straßennetz (Autobahnen und Bundesstraßen) von Nordrhein-Westfalen mit Einfärbung gemäß Gesamtanzahl der Fahrstreifen

anzahl der Fahrstreifen (FS_GESAMT) vorgenommen wurde. Zusätzlich ist die entsprechende Anzahl der Features in eckigen Klammern angegeben.

Die Straßennetzdaten dienen als Grundlage für die Erstellung einer abstrakten Netzwerkrepräsentation, bestehend aus Knoten und Kanten (siehe Kapitel 10.1).

8.3 Verkehrsstärke

Die Verkehrsstärke beschreibt den Fahrzeugdurchsatz je Zeiteinheit. Sie wird an einem bestimmten Querschnitt lokal durch die Erfassung der Anzahl der Verkehrselemente pro Zeiteinheit bestimmt. Die betrachteten Verkehrselemente sind üblicherweise die Kraftfahrzeuge insgesamt (Kfz) oder der Schwerverkehr (SV). Typische Zeiteinheiten sind eine Stunde für die maßgebende stündliche Verkehrsstärke (MSV) oder ein Tag für die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) sowie halbe Tage bei einer Unterscheidung zwischen Tag und Nacht. Zur Erfassung der Daten werden automatische Dauerzählstellen eingesetzt.

Der Bericht V 278 der »Bundesanstalt für Straßenwesen« zur Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014 gibt eine detaillierte Auswertung der automatischen Dauerzählstellen (FITSCHEN und NORDMANN 2016b). Die zugehörigen Daten in Form von Auswertergebnissen einzelner Zählstel-

len sowie deren Lage sind als Excel-Tabelle beim Carl-Schünemann-Verlag, Bremen, als kostenpflichtiger Download erhältlich (FITSCHEN und NORDMANN 2016a).

Nach Umwandlung der Excel-Datei in eine CSV-Datei ist ein Import der Daten in QGIS als ein Vektor-Layer über das Dialogfenster »Create a Layer from a Delimited Text File« möglich. In Bild 8.5 sind die erforderlichen Einstellungen gelb hervorgehoben wie beispielsweise die Angabe der Feldnamen für die Koordinaten.

Der Datensatz für 2014 enthält 1.681 Zählstellen, wobei sich davon 874 auf Bundesautobahnen und 807 auf außerörtlichen Bundesstraßen befinden. In Bild 8.6 sind die Lage der 1.681 Dauerzählstellen und – als Orientierungshilfe – die Bundesländer dargestellt.

Für einen geringen Teil der Dauerzählstellen liegen keine gültigen Werte für die Verkehrsstärke vor. Diese Werte werden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Da nur ein sehr geringer Teil aller vorliegenden Werte betroffen ist, ergeben sich keine Einschränkungen auf die Projektergebnisse. Bild 8.7 illustriert das an den Werten für die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der Kraftfahrzeuge (DTV-Kfz) als Querschnittswert für alle Tage eines Jahres und beide Fahrrichtungen zusammen. Falls für diese Größe ein ungültiger Wert auftritt (NULL), ist die entsprechende Zählstelle rot eingefärbt. Für die ver-

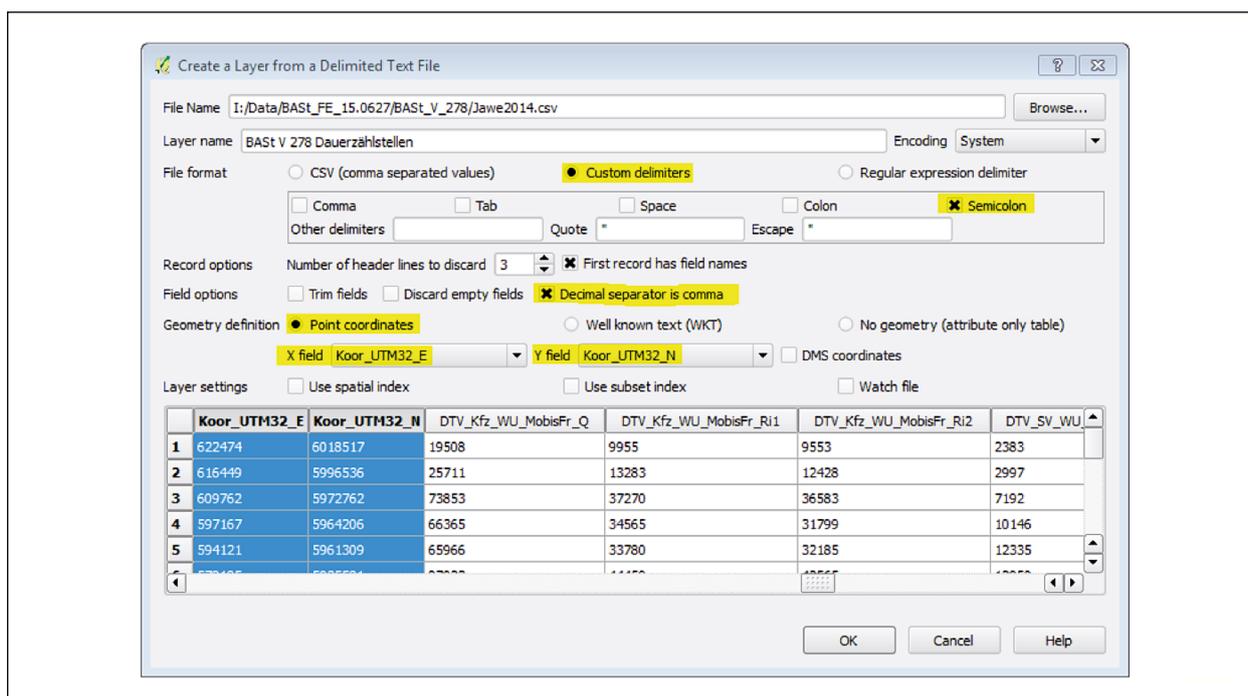


Bild 8.5: Dauerzählstellen: Import der CSV-Datei

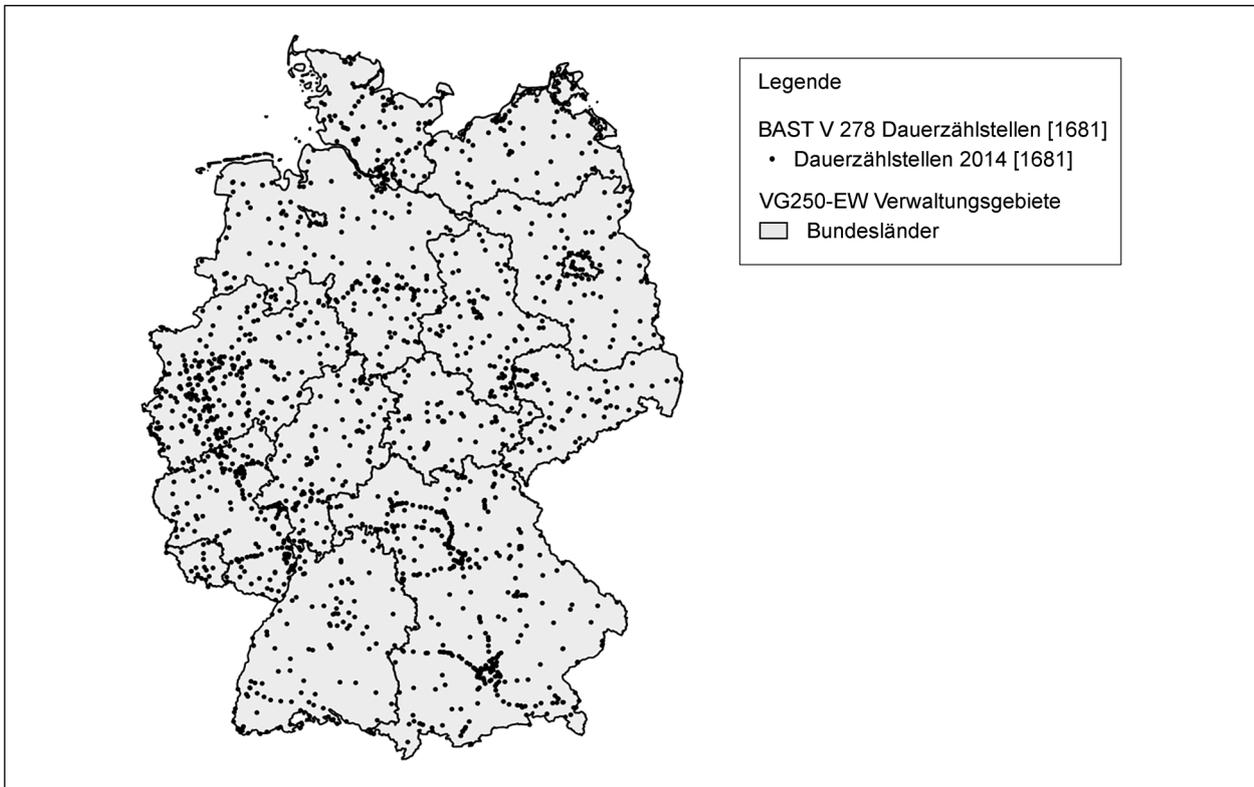


Bild 8.6: Lage der Dauerzählstellen (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

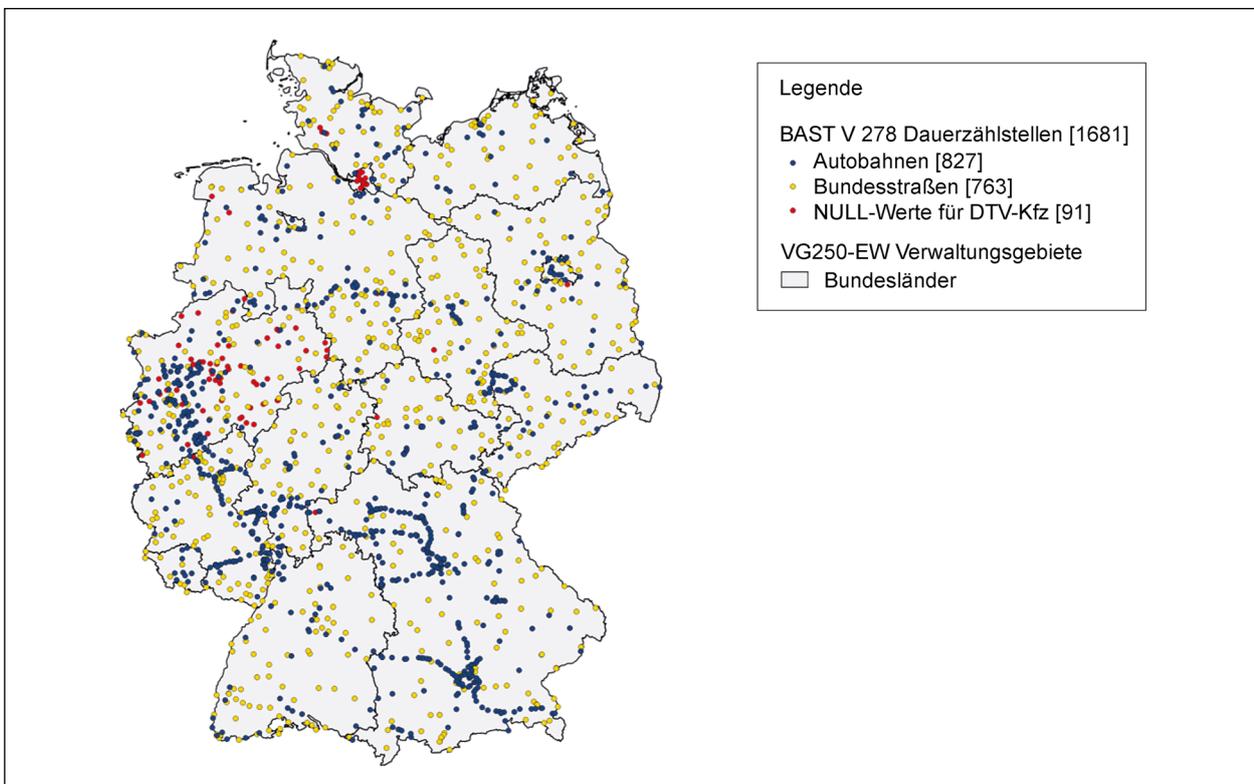


Bild 8.7: Klassifikation der Dauerzählstellen (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

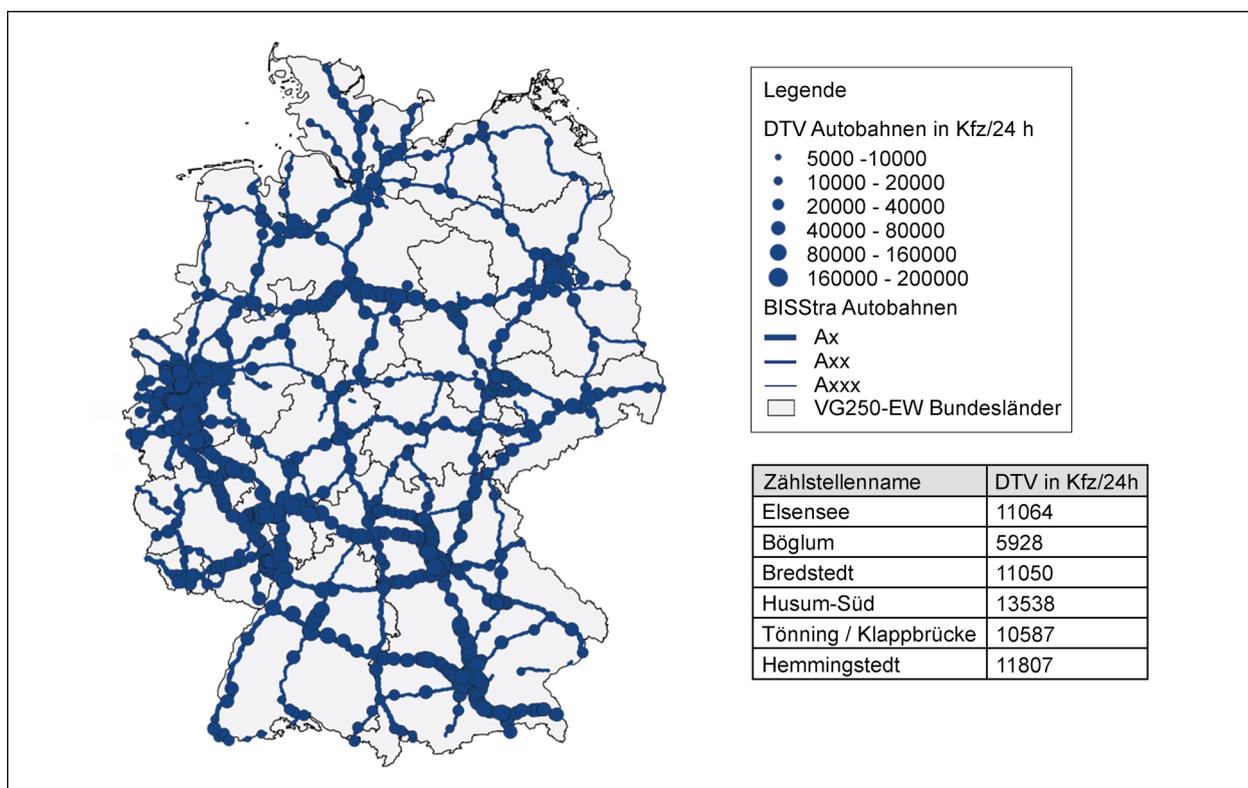


Bild 8.8: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV-Kfz) auf Autobahnen (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

bleibenden Zählstellen mit gültigen Werten ist eine Unterteilung nach Straßenklassen (Feld »Str_Kl« mit den beiden Werten »A« für Autobahnen und »B« für Bundesstraßen) vorgenommen. Somit verbleiben für die folgenden Darstellungen 827 Zählstellen auf Autobahnen und 763 Zählstellen auf Bundesstraßen – und damit insgesamt 1.590 Zählstellen. Das entspricht einer Abweichung von weniger als 6 Prozent und wird als nicht so relevant betrachtet.

Die bereits aufgeführte durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der Kraftfahrzeuge (DTV-Kfz) wird auch in den weiteren Abbildungen zur Illustration herangezogen. In Bild 8.8 sind das Autobahnnetz aus dem BISStra-Testdatensatz und die Werte der Zählstellen auf Autobahnen für die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in Kfz/24 h kombiniert dargestellt. Die Dauerzählstellen sind mit der geometrischen Figur »Kreis« symbolisiert, wobei der Durchmesser des Kreises mit dem Wert für die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke variiert. Hierfür sind die Werte in sechs unterschiedliche Bereiche eingeteilt.

Analog zu der Visualisierung für die Autobahnen zeigt Bild 8.9 die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der Kraftfahrzeuge (DTV-Kfz) auf den Bundesstraßen.

Bild 8.10 fasst die beiden vorherigen Abbildungen zusammen und stellt die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke für Autobahnen und für Bundesstraßen sowie die zugehörigen Straßennetze dar.

Neben der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV-Kfz), die als Verkehrselemente die Kraftfahrzeuge insgesamt erfasst, liegen auch differenziertere Daten beispielsweise zum Schwerverkehr vor. Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs (DTV-SV) ist für Autobahnen in Bild 8.11 dargestellt.

Darüber hinaus wird der Schwerverkehrsanteil (SV-Anteil) am gesamten Verkehrsaufkommen ermittelt und in den vorliegenden Daten zur Verkehrsstärke bereitgestellt, wie für Autobahnen und Bundesstraßen in Bild 8.12 gezeigt.

Neben den im vorangehenden Kapitel vorgestellten Jahreswerten werden auf der Webseite der BAST auch Stundenwerte der einzelnen Zählstellen bereitgestellt. Diese stellen die Datengrundlage zur Berechnung der Jahreswerte. Für eine genauere Untersuchung der gemessenen Verkehrsstärken vor und nach einem Ereignis bieten sich die Stundendaten an. Das wird am Beispiel der DB-Brücke »Nievenheim« bei Dormagen im Kapitel 10.3 ausgeführt.

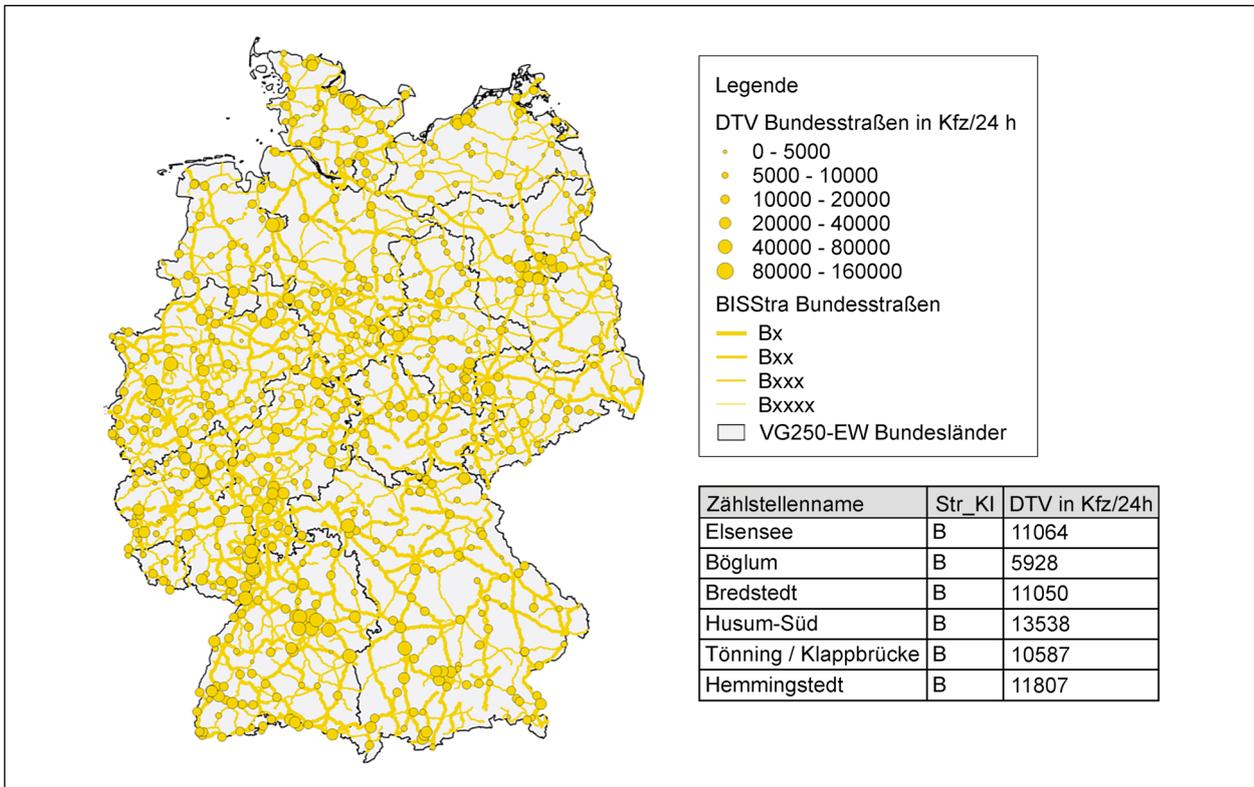


Bild 8.9: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV-Kfz) auf Bundesstraßen (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

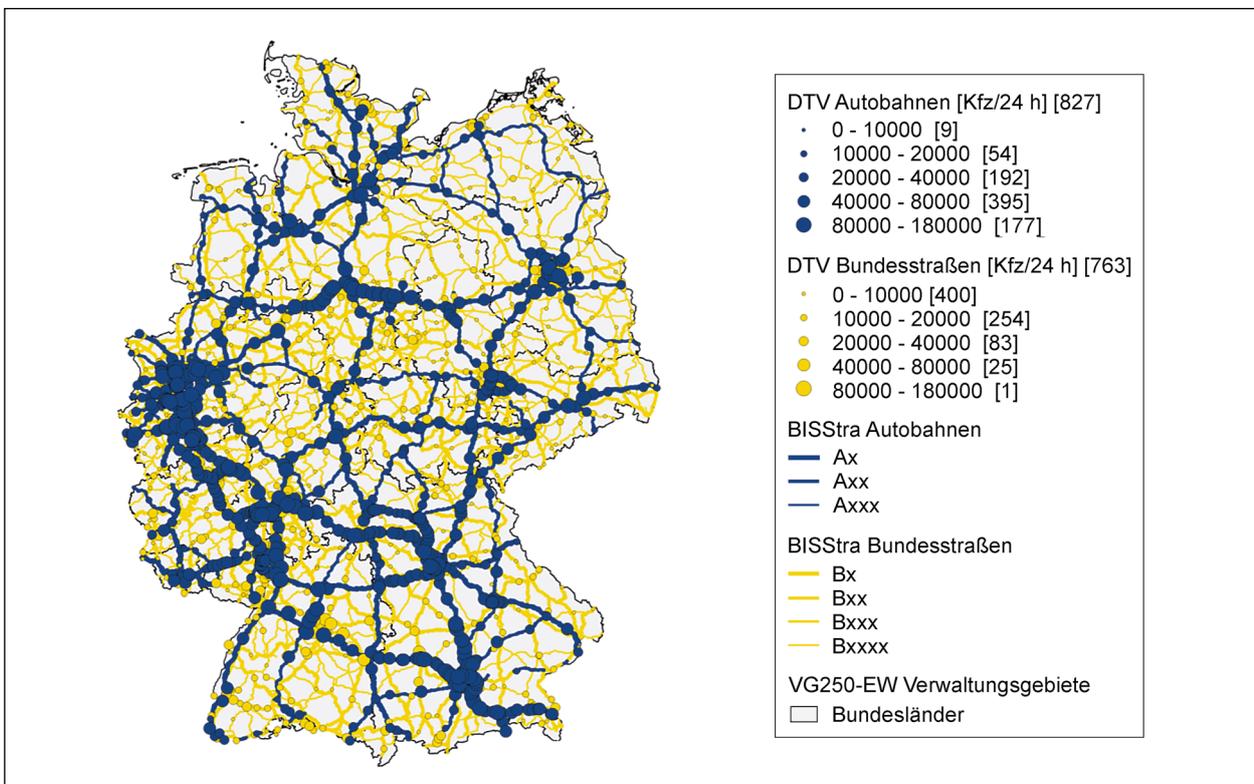


Bild 8.10: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV-Kfz) auf Autobahnen und Bundesstraßen (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

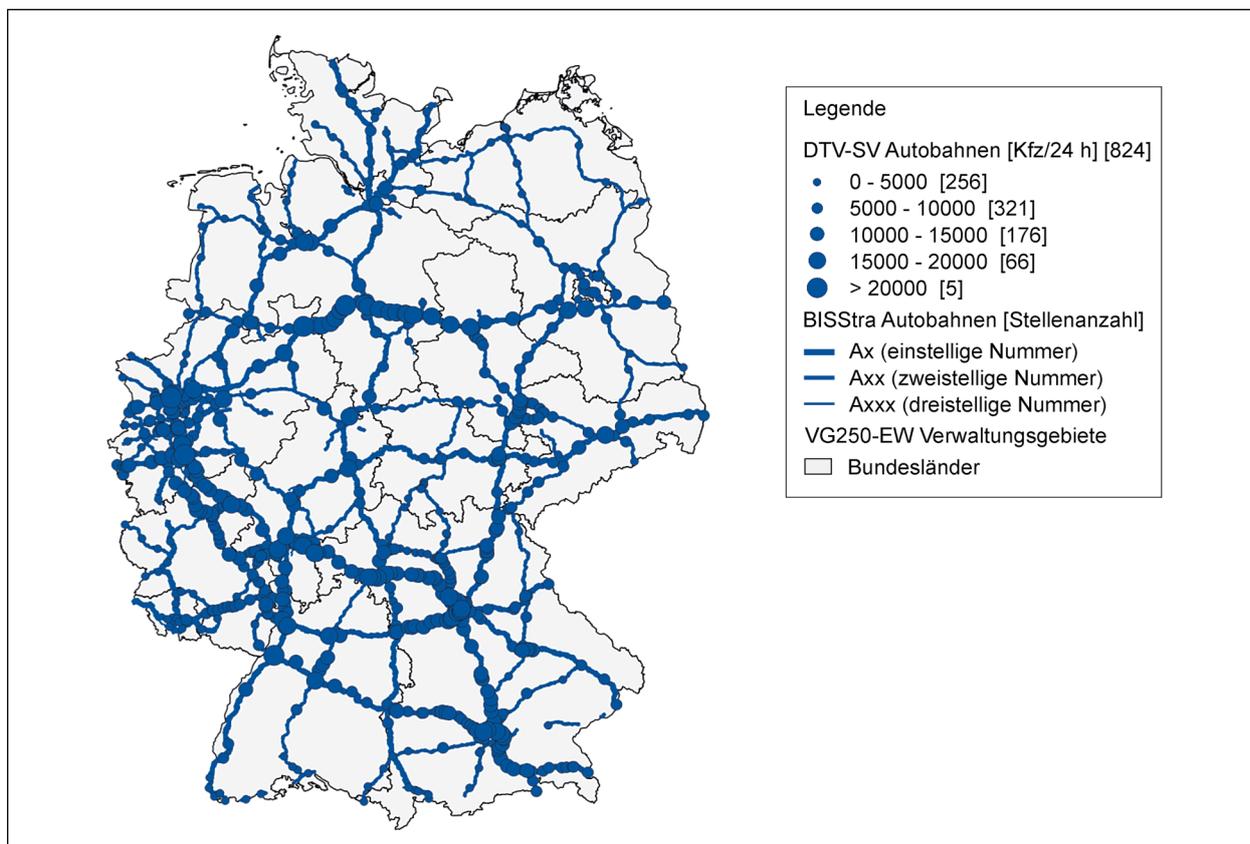


Bild 8.11: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs (DTV-SV) auf Autobahnen (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

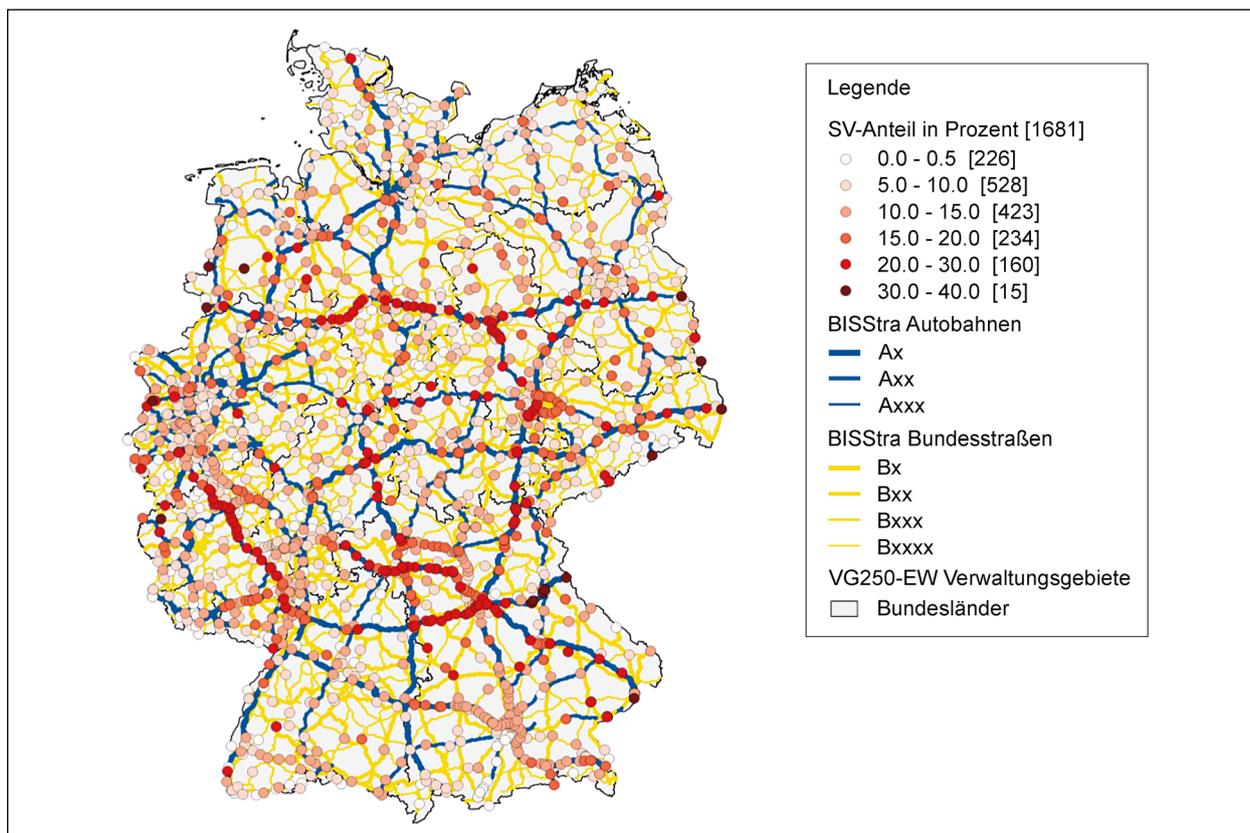


Bild 8.12: Schwerverkehrsanteil (SV-Anteil) an der Verkehrsstärke (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

8.4 Zustandsnote und Substanzkennzahl von Brückenbauwerken

Die BAST veröffentlicht auf ihrer Webseite Daten zu Brücken an Bundesfernstraßen. Die Zustandsnoten für Brückenbauwerke ergeben durch eine regelmäßig stattfindende Bauwerksprüfung nach DIN 1076. Sechs Zustandsnotenbereiche werden dabei unterschieden:

- 1,0 – 1,4 (sehr guter Zustand),
- 1,5 – 1,9 (guter Zustand),
- 2,0 – 2,4 (befriedigender Zustand),
- 2,5 – 2,9 (ausreichender Zustand),
- 3,0 – 3,4 (nicht ausreichender Zustand),
- 3,5 – 4,0 (ungenügender Zustand).

In weiteren Erläuterungen beschreibt die BAST, dass schlechte Zustandsnoten nicht zwangsläufig eine Nutzungseinschränkung bedeuten: (siehe: <http://www.bast.de/DE/Statistik/Bruecken/Zustandsnoten.pdf>).

Die verfügbaren Daten erhalten neben Informationen zur Lage auch Angaben zur Bauwerksnummer und zum Bauwerksnamen. Das ist hilfreich, um die Lage einer bestimmten Brücke auf einer Karte dar-

zustellen und Streckenabschnitte zu identifizieren, die bei einer Sperrung der Brücke betroffen sind. Das wird für das Anwendungsbeispiel zur DB-Brücke »Nievenheim« bei Dormagen im Kapitel 10.3.3 gezeigt.

Zusätzlich zu der Bewertung von Brückenbauwerken mittels Zustandsnote gibt die Substanzkennzahl Aufschluss über den Zustand einer Brücke. Da die Visualisierung auf einer Karte nach demselben Prinzip verläuft, begnügen wir uns in diesem Kapitel mit einer Abbildung zu den Zustandsnoten. Eine ausführlichere Auswertung von Zustandsnote und Substanzkennzahl ist im Kapitel 9.3 aufgeführt.

Die Zustandsbewertung eines einzelnen Schadens setzt sich dabei aus den Bewertungen der drei Kriterien »Standicherheit«, »Verkehrssicherheit« und »Dauerhaftigkeit« zusammen und wird algorithmisch zu einer Note zusammengeführt. Die Zustandsnoten (ZN) werden sowohl auf der Ebene der Bauteilgruppen (BTG), wie z. B. Überbau, Unterbau, Lager, Fahrbahnübergangskonstruktion und Belag, als auch für das gesamte Teilbauwerk gemäß dem Maximumprinzip ermittelt. Das bedeutet, dass die Bewertung desjenigen Schadens mit der höchsten Bewertung maßgeblich für die Zustandsnote der jeweiligen BTG bzw. des gesamten Teilbauwerkes ist. Für die Ermittlung der Substanz-

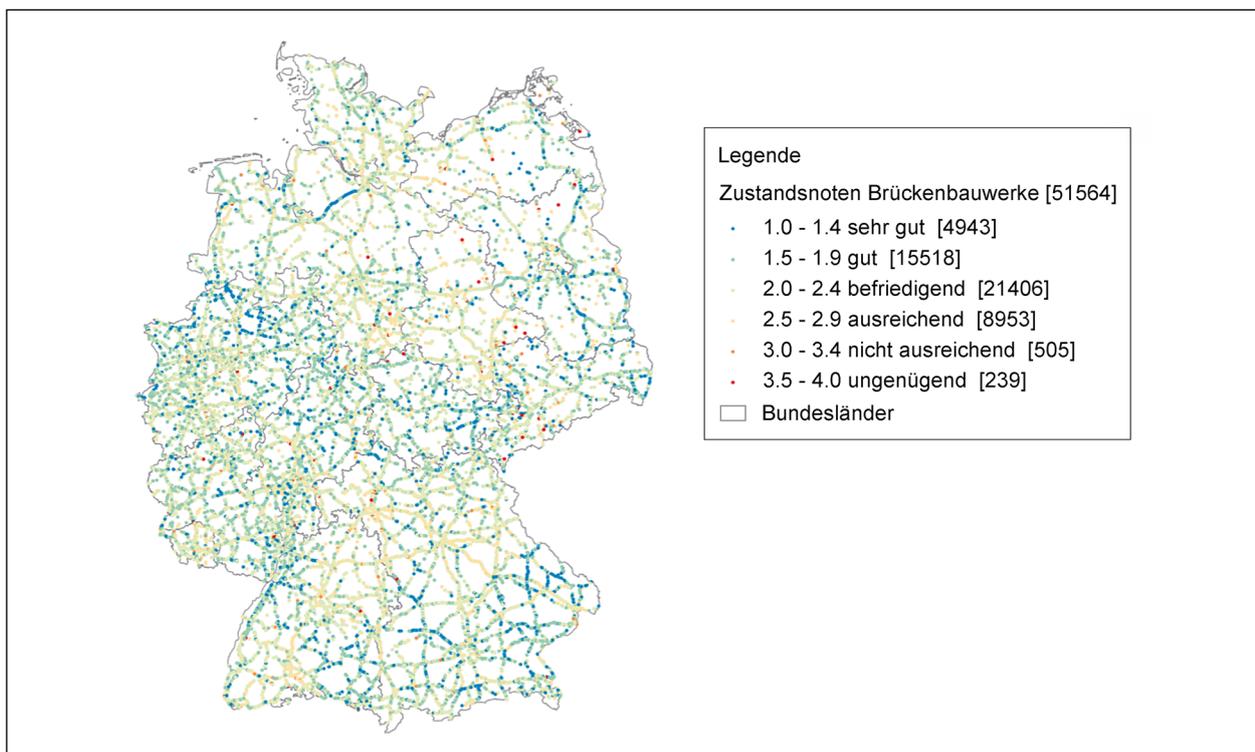


Bild 8.13: Lage und Zustandsnoten von Brückenbauwerken (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

kennzahl (SK) wird der Einfluss der Verkehrssicherheit herausgenommen, indem die Bewertung dieses Kriteriums auf 0 gesetzt wird. Somit haben diese beiden Kennzahlen einen direkten inhaltlichen Zusammenhang. Darüber hinaus gibt es noch Zu- und Abschläge, die den Schadensumfang, die Anzahl der Schäden sowie die Anzahl der geschädigten BTG berücksichtigen.

Für die Darstellung der Lage der Brückenbauwerke in einem geografischen Informationssystem sind Koordinaten im UTM32N-System angegeben. In Bild 8.13 ist jedes Brückenbauwerk durch einen Punkt dargestellt, wobei die Einfärbung sich nach den Zustandsnotenbereichen richtet. In der Legende ist die Anzahl der jeweiligen Features in eckigen Klammern angegeben. Da in dem Datensatz auch Teilbauwerke erfasst sind, fällt die Anzahl höher aus.

8.5 Hochwassergefahrenkarten

Hochwassergefahrenkarten dienen der Erfassung der Hochwassergefahr und werden in Deutschland

von den Bundesländern erstellt. Sie sind eingeschränkt öffentlich zugänglich, beispielsweise für einige Bundesländer als interaktive Web-Karte. In der Regel handelt es sich dabei um reine Kartenansichten, die kein Herunterladen der Daten erlauben. Eine Ausnahme stellt das Bundesland Thüringen dar. Nach der Auswahl eines bestimmten Gebietes in der zugehörigen Web-Karte sind Daten in Form von Shape-Files abrufbar und dadurch auf Anwenderseite in einem GIS darstellbar. In Bild 8.14 ist die Web-Karte der »Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie« für die Verwaltungsgemeinschaft Gera-Aue (bestehend aus den Gemeinden Andisleben, Gebesee, Ringleben, Walschleben) dargestellt. Die Einfärbungen mit unterschiedlichen Blautönen repräsentieren unterschiedliche Wassertiefen für HQ200. Die roten Linien geben die maximale Ausdehnung bei HQ-Extrem wieder.

In Bild 8.14 enthält die Legende zu den Wassertiefen HQ200 sowie zu der maximalen Ausdehnung bei HQ-Extrem zusätzlich Diskettensymbole, welche den Abruf der entsprechenden Shape-Files und damit die Einbindung in ein Desktop-GIS erlauben.

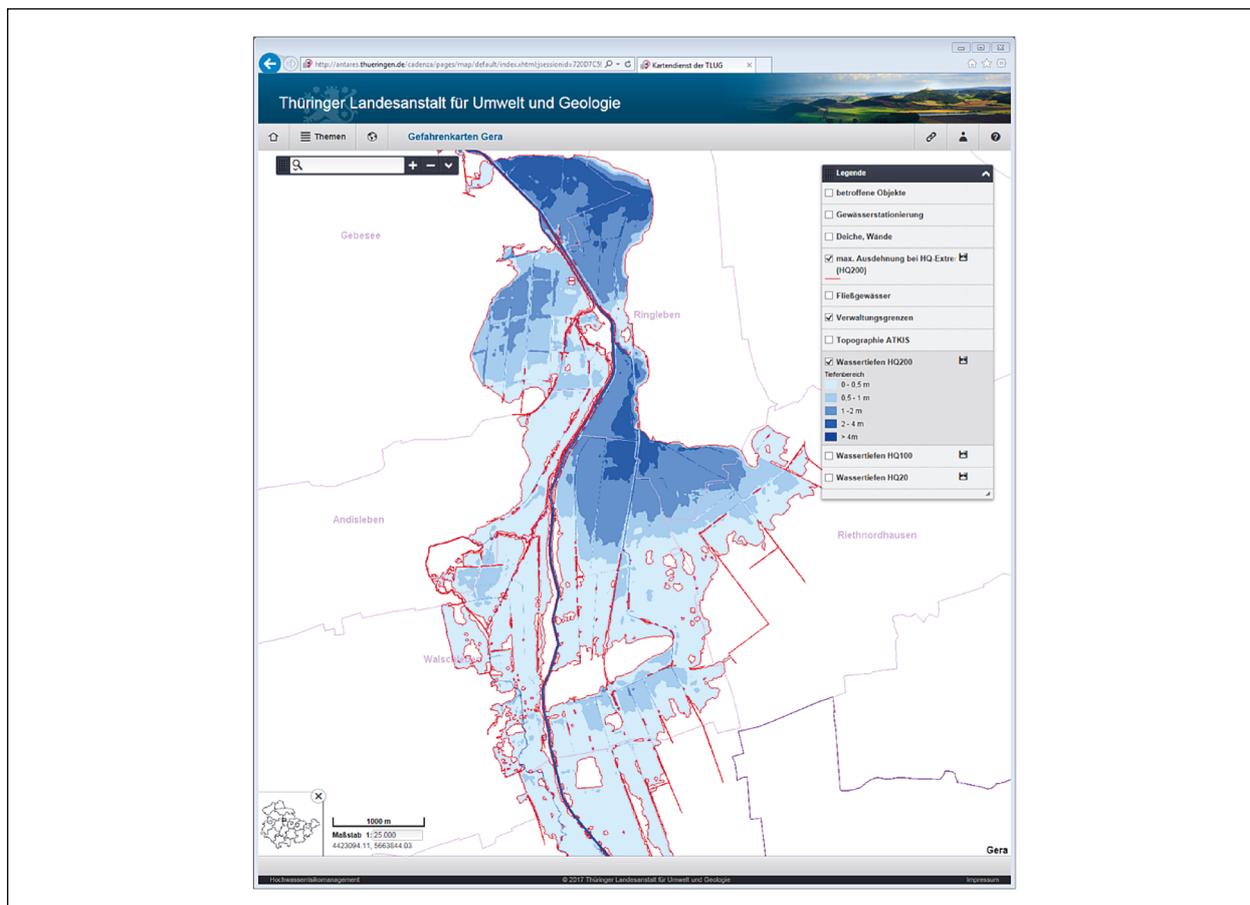


Bild 8.14: Hochwassergefahrenkarte der »Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie« für die Verwaltungsgemeinschaft Gera-Aue

Bild 8.15 zeigt das für die Wassertiefen HQ200 sowie für die maximale Ausdehnung bei HQ-Extrem aus dem obigen Beispiel der Verwaltungsgemeinschaft Gera-Aue nach Import der Shape-Files in QGIS. Die zusätzlich angezeigten Gemeindegrenzen stammen aus dem Produkt »VG250-EW« (hierarchische Verwaltungsebenen vom Staat bis zu den Gemeinden) des »Bundesamtes für Kartografie und Geodäsie«. Insgesamt wurde die Farbgebung in QGIS so eingestellt, dass sie der oben gezeigten Web-Karte entspricht.

Diese für das Bundesland Thüringen öffentlich verfügbaren Daten zur Hochwassergefahr werden für Berechnungen auf Netzebene verwendet. Wie im Kapitel 10.3.4 dargestellt, wird bei dem Szenario Hochwasser in Thüringen von einer großflächigeren Störung des Straßennetzes ausgegangen. Anhand der räumlichen Daten zur Ausdehnung bei HQ-Extrem lassen sich Streckenabschnitte identifizieren, die durch dieses Gebiet gehen.

9 Daten zur Objektebene

Die Erkenntnisse der Literaturrecherche haben gezeigt, dass eine systematische Betrachtung mit Ansätzen der Risiko- und Verwundbarkeitsanalyse zu vereinfachten Maßen der Resilienz auf Objektebene führen können. Im ersten Schritt muss hierzu eine Relation zwischen Bedrohungsintensität und zu erwartenden Schäden generiert werden. Schädenseffekte auf Objektebene hängen im Wesentlichen von dem Resilienzindikator Robustheit beziehungsweise der Beschaffenheit des betrachteten Bauwerks ab. Mit den Erkenntnissen der Literaturrecherche im Kapitel 5.6 empfiehlt sich eine systematische Analyse auf Objektebene durch eine Kategorisierung und hierarchische Zerlegung in die jeweiligen Teilkomponenten. Ziel ist die Bewertung der Kritikalität in Abhängigkeit der Bauweise und den entsprechenden Komponenten als Basis für eine Bewertung der Resilienz. Die angewandte Methodik kann für beliebige Objekte der Verkehrsinfra-

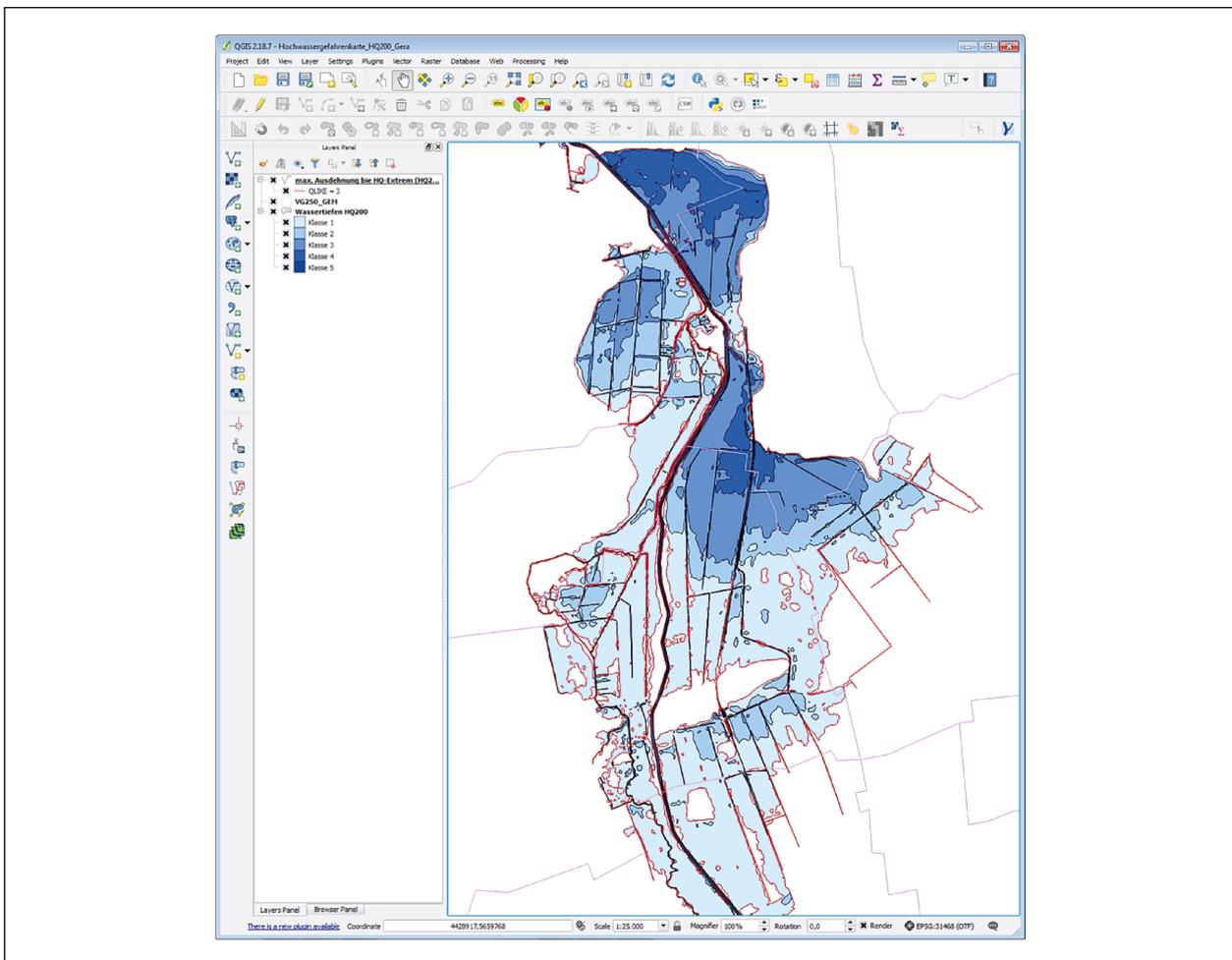


Bild 8.15: Wassertiefen HQ200 sowie maximale Ausdehnung bei HQ-Extrem als Import von Shape-Files in QGIS aus der Web-Anwendung der »Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie«

struktur angewandt werden, ist in diesem Forschungsvorhaben jedoch beispielhaft auf Brückenbauwerke fokussiert.

Die Ausführung eines Brückenbauwerks kann beispielsweise nach Konstruktionsart oder Spannweite stark variieren. Eine detaillierte Bild aller Brückenbauwerke des Straßennetzes in Deutschland kann nicht realisiert werden, da das den zeitlichen Umfang der Bearbeitung bei weitem übersteigen würde. Die Bewertung auf Objektebene soll mithilfe eines vereinfachten Stabwerksmodells erfolgen. Abmessungen und konstruktive Eigenschaften orientieren sich hierbei an realen Bauwerken. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wird geprüft, ob mit dieser effizienten Vorgehensweise hinreichende Genauigkeit erzielt werden kann. In diesem Forschungsprojekt wird eine statistische Auswertung vorgenommen, um die Häufigkeit des Vorkommens bestimmter Objekteigenschaften in den Analysen mit zu berücksichtigen. Beispielsweise kann bei Annahme einer bestimmten Spannweite die Auswertung der statistischen Daten belegen, wieviel Prozent des tatsächlichen Bestands abgedeckt sind.

Eine weitere wichtige Größe stellt die Verkehrsbelastung dar. Besitzt ein Bauwerk beispielsweise eine hohe Verwundbarkeit und eine geringe Ver-

kehrbelastung, würde somit die Kritikalität geringer eingestuft. Die erarbeitete Methodik auf Objektebene erlaubt eine Bewertung beliebiger Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur. Aufgrund der verfügbaren Datenbasis wird sich in diesem Projekt auf die Bewertung von Brückenbauwerke fokussiert.

9.1 Kategorisierung Brückenbauwerke nach »SKRIBT«

Im Rahmen des Projekts SKRIBT (VDI Technologiezentrum GmbH) ist am Fraunhofer EMI bereits eine Kategorisierung von Brückenbauwerken nach verschiedenen Kriterien vorgenommen worden. Hierbei spielte im Wesentlichen das jeweilige statische System des Brückenüberbaus eine Rolle. Des Weiteren wurde nach den grundtypischen geometrischen Konstruktionsweisen, wiederum der Überbauten sowie den überwiegenden materialspezifischen Bauweisen eingeteilt, siehe Tabelle 9.1. Zur weiteren kategorisierenden Einordnung sind die durchschnittlichen freien Spannweiten (15 bis 100 m) der einzelnen Brückenfelder angegeben.

Die Erkenntnisse des Projekts SKRIBT (VDI Technologiezentrum GmbH) geben einen ersten Überblick über eine mögliche Kategorisierung in Abhän-

| System |  Einfeldträger | | | | | |  Mehrfeldträger | | | | | |  Rahmen/Sprengwerk | | | |  Bogen | | | | | |
|-----------|---|------------|---------------|---------|------------|---------|--|--------------------------|---------------|---------|------------|-------|---|------------|---------------|---------------------------------|---|---------------------|---------------------|------------------|----|----|
| | Platte | | Plattenbalken | | Hohlkasten | | Platte | | Plattenbalken | | Hohlkasten | | Platte | | Plattenbalken | | Stahlbetonbogen | | | | | |
| Material | Stahlbeton | Spannbeton | Spannbeton | Verbund | Spannbeton | Verbund | Stahlbeton | Spannbeton | Spannbeton | Verbund | Spannbeton | Stahl | Verbund | Stahlbeton | Spannbeton | Spannbeton | Verbund | Stahlbeton-fahrbahn | Spannbeton-fahrbahn | Verbund-fahrbahn | | |
| | Spannweitenbereich | 10 – 15 m | 15 | | | | | Identisch wie bei Rahmen | | | | | | | 20 | Identisch wie bei Plattenbalken | | | | | | |
| 15 – 20 m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 – 25 m | | | 25 | 25 | | | | | 30 | 30 | 30 | | | | | | | 30 | | | | |
| 25 – 30 m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 – 35 m | | | | | 35 | 35 | | | | | | 35 | | | | | | | | | | |
| 35 – 40 m | | | 40 | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 – 45 m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 45 | 45 | 45 |
| 45 – 50 m | | | | | | | 50 | | | 50 | 50 | | | 50 | | | | | | | | |
| 50 – 55 m | | | | | | | | | | | | 55 | | | | | | | 55 | | | |

Tab. 9.1: Kategorisierung von Brückenbauwerken nach statischem System, Konstruktionsweise und Material. Angabe der durchschnittlichen Spannweiten (nach: VDI Technologiezentrum GmbH)

| System | Einfeldträger | | | | | | Mehrfeldträger | | | | | | Rahmen/ Sprengwerk | | Bogen | | | | | | | |
|-------------|--------------------|------------|---------------|---------|------------|---------|--------------------------|------------|---------------|---------|------------|-------|-----------------------|------------|---------------|------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|--|--|
| | Platte | | Plattenbalken | | Hohlkasten | | Platte | | Plattenbalken | | Hohlkasten | | Platte | | Plattenbalken | | Stahlbetonbogen | | | | | |
| Material | Stahlbeton | Spannbeton | Spannbeton | Verbund | Spannbeton | Verbund | Stahlbeton | Spannbeton | Spannbeton | Verbund | Spannbeton | Stahl | Verbund | Stahlbeton | Spannbeton | Spannbeton | Verbund | Stahlbetonfahrbahn | Spannbetonfahrbahn | Verbundfahrbahn | | |
| | Spannweitenbereich | 55 – 60 m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 60 – 75 m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 75 – 100 m | | | | | | | | | | | 100 | 100 | | | | | | | | | | |
| 100 – 125 m | | | | | | | Identisch wie bei Rahmen | | | | | | | | | | | | | | | |
| 125 – 150 m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 150 – 175 m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 175 – 200 m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 200 – 225 m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 225 – 250 m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tab. 9.1: Fortsetzung

gigkeit der Bauwerksart. Jedoch liegen mit diesen Informationen keine Aussagen über das Vorhandensein im deutschen Straßennetz vor.

Die »Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten« (ASB-ING) des »Bundesministeriums für Verkehr« ist die Grundlage für die Erfassung und Verwaltung von Bauwerksdaten (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung 2013). Sie dient zur einheitlichen Informationserfassung des Bauwerkbestandes und des gegenwärtigen Zustands der einzelnen Ingenieurbauwerke.

In der geltenden Fassung der ASB-ING von 2013 ist der Straßenbrückenbestand angegeben, wie folgt:

- 39.231 Brücken im Bereich von Bundesfernstraßen mit einer gesamten Straßenfläche von 30,18 km² im Überbau und
- 26.335 Brücken im Bereich von Landes-/Staatsstraßen mit einer gesamten Straßenfläche von 5,54 km² im Überbau

Über eine Bauwerksnummer erfolgt eine eindeutige Zuordnung und detaillierte Informationen können extrahiert werden. Einzelne Bauwerke werden über verschiedene Attribute charakterisiert und folgende

wurden für die Auswertung in diesem Forschungsvorhaben ausgewertet:

- Bauwerksart
 - Konstruktion,
 - statisches System (längs, quer),
 - Baustoffklasse, Baustoff Überbau.
- Länge, Stützweite,
- Baujahr, Altersklasse,
- Kennzahlen zu Zustand und Substanz,
- Position, Name, Ort.

Die Datenbestände werden systematisch ausgewertet, um Aussagen zur Häufigkeit, der Verteilung und Korrelation einzelner Merkmalsausprägungen zu analysieren.

9.2 Angewandte statistische Methoden

Die Auswertung des Datenbestands erfolgt mit bestimmten statistische Methoden, welche in diesem Kapitel kurz vorgestellt sind.

Die einfachste Methode, die Anwendung findet, ist das Aufsummieren bestimmter Attribute, wie Altersklasse, Substanzkennzahl oder Bauwerksart. Diese Attribute können in Mengen zusammengefasst werden und in Häufigkeitsdiagrammen verglichen werden.

Weiterhin wird in der Analyse die statistische Abhängigkeit zwischen verschiedenen Merkmalen gemessen. Ziel dieser Analyse ist die Auswertung bestimmter Zusammenhänge, ob beispielsweise das Auftreten der Zustandsnotenklasse und des Baujahrs bestimmten Regeln folgt. Falls eine Hypothese der statistischen Abhängigkeit nachgewiesen wird, kann diese Information angewandt werden, um Rückschlüsse über einzelne Indikatoren eines Bauwerks zu ziehen. Beispielsweise könnte das Vorkommen einer gewissen Konstruktionsart immer einem bestimmten Zustand zugewiesen werden und somit Aussagen des Resilienzindikators Robustheit abgeleitet werden. Ebenfalls könnten mit dieser Information Redundanzen auf Netzebene geschaffen werden, falls das betrachtete Objekt einem kritischen Zustandswert zugewiesen wäre. Der Vergleich zweier nominal skalierten Merkmale erfolgt in einer Kontingenztabelle, siehe Gleichung (2). Die Anzahl der Spalten n und Zeilen m hängt von den Ausprägungsmöglichkeiten des jeweiligen Merkmals ab. Tabelle 9.2 zeigt beispielhaft eine Kontingenztabelle für die Merkmale »Zustandsnote« und »Baustoff«.

$$N = n_{ij} \in \mathbb{N}_0^{n \times m} \quad (2)$$

Über Summation können die Randverteilung, die Gesamtanzahl und bedingte Verteilungen abgeleitet werden.

$$\begin{aligned} n_{i \cdot} &= \sum_j n_{ij}, n_{\cdot j} = \sum_i n_{ij} \\ n &= \sum_i \sum_j n_{ij} \\ n_i | n_j &= \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}}, n_j | n_i = \frac{n_{ij}}{\sum_i n_{ij}} \end{aligned} \quad (3)$$

Per Definition liegt statistische Unabhängigkeit vor, wenn einzelne Einträge der Kontingenztabelle den gleichen Wert wie die erwartete Häufigkeit besitzen, welche sich aus dem Produkt der jeweiligen Zeilen- und Spaltensumme in Relation zur Gesamtanzahl der Einträge bildet.

$$n_{ij} = \frac{n_{i \cdot} \cdot n_{\cdot j}}{n} \quad (4)$$

Basierend auf dieser Bedingung, wird die quadratische Kontingenz χ^2 , d. h. die Abweichung zur erwarteten Häufigkeit berechnet. Dieser Wert bildet die Grundlage für den korrigierten Kontingenzkoeffizienten C_{korr} , welcher eine Aussage zur statistischen Abhängigkeit liefert.

$$\begin{aligned} \chi^2 &= \sum_i \sum_j \frac{(n_{ij} - n_{ij}^*)^2}{n_{ij}^*}, n_{ij}^* = \frac{n_{i \cdot} \cdot n_{\cdot j}}{n} \\ C_{korr} &= \sqrt{\frac{k}{k-1} \cdot \frac{\chi^2}{\chi^2 + n}} \in [0,1] \end{aligned} \quad (5)$$

Besteht ein starker linearer Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen, tendiert der Kontingenzkoeffizient gegen 1, bei statistischer Unabhängigkeit liegt er im Bereich um 0.

| Zustandsnote | | Baustoff | | | | | | | Σ |
|----------------------|-----------|----------------------|-----------------|-------------------|------------------------|-------|------|-----------------------|----------|
| | | Beton/ Stahlbeton | Spann- beton | Stahl- verbund | Stahl/ Leichtmetall | Stein | Holz | Sonstiger Baustoff | |
| Sehr gut | 1.0 – 1.4 | 2.841 | 940 | 57 | 530 | 28 | 8 | 5 | 4.409 |
| Gut | 1.5 – 1.9 | 5.497 | 2.413 | 201 | 530 | 82 | 23 | 0 | 8.746 |
| Befriedigend | 2.0 – 2.4 | 11.474 | 10.231 | 653 | 894 | 336 | 64 | 1 | 23.653 |
| Ausreichend | 2.5 – 2.9 | 5.133 | 6.052 | 389 | 482 | 208 | 29 | 1 | 12.294 |
| Nicht ausreichend | 3.0 – 3.4 | 665 | 1.268 | 108 | 98 | 63 | 20 | 1 | 2.223 |
| Ungenügend | 3.5 – 4.0 | 76 | 95 | 17 | 35 | 14 | 2 | 0 | 239 |
| Σ | | 25.686 | 20.999 | 1.425 | 2.569 | 731 | 146 | 8 | 51.564 |

Tab. 9.2: Beispielhafte Auswertung des Datenbestands über eine Kontingenztabelle mit den Merkmalen »Zustandsnote« und »Baustoff«

9.3 Auswertung des Datenbestands nach verschiedenen Merkmalen

In diesem Kapitel wird der Datenbestand der Brückenbauwerke nach Bauwerksart, Baustoff, geometrischen Eigenschaften, Alter und Zustand ausgewertet. Die Resultate quantifizieren Häufigkeiten zur Vorkommnis eines entsprechenden Bauwerks.

Im ersten Schritt werden empirische Daten nach Zustandsnote und Substanzkennzahl ausgewertet. Die Zustandsnote eines Bauwerks setzt sich aus den Kriterien Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit und Standsicherheit zusammen. Die Substanzkennzahl beinhaltet Informationen bezüglich der Dauerhaftigkeit und Standsicherheit. Diese Kennzahlen können ein erstes Indiz bezüglich der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur liefern. Bild 9.1 zeigt die Verteilung der Brückenbauwerke nach Zustandsnote im linken und Substanzkennzahl im rechten Diagramm. Mit etwa 46 Prozent (Zustandsnote) und 35 Prozent (Substanzkennzahl) sind die meisten Bauwerke der Notenklasse »befriedigend« zuzuordnen. Bezüglich der Substanzkennzahl ist ein größerer Anteil den Notenklassen »sehr gut« und »gut« zugehörig. Im Mittel besitzen alle Bauwerke eine Zustandsnote von 2,18 und eine Substanzkennzahl von 2,07.

Die Verteilung nach Altersklassen ist in Bild 9.2 dargestellt. Mit etwa 24 Prozent sind der Altersklasse »1970 – 1979« die meisten Bauwerke zuzuordnen. Weitere 60 Prozent verteilen sich mit jeweils etwa 15 Prozent auf die Altersklassen »1960 – 1969«, »1980 – 1989«, »1990 – 1999« und »2000 – 2009«.

Die nominalen Merkmale Zustand und Alter werden nachfolgend kombiniert ausgewertet. In Artikeln wie

beispielsweise in (NAGEL et al. 2016), wird postuliert, dass »das Alter einer Brücke einen der größten Risikofaktoren für ihre Stand- und Verkehrssicherheit darstellt« und ausschließlich ältere Bauwerke ins hintere Drittel der Notenskala fallen.

Bild 9.3 zeigt die bedingte Verteilung bei gegebener Altersklasse. Unter der Bedingung, dass ein Bauwerk der Altersklasse »2010 – 2019« zuzuordnen ist, befindet sich die meisten Brücken in einem sehr guten bis guten Zustand und fallender Tendenz zu schlechteren Notenklassen, wie es mit den gelben Balken im Diagramm Bild 9.3 ersichtlich wird. Die Altersklasse »1960 – 1969« weist im Vergleich eine gegenläufige Tendenz zu schlechteren Zuständen auf. Allerdings folgt die Altersklasse »2000 – 2009« nicht diesem Trend.

Die bedingte Verteilung bei gegebener Zustandsnote beziehungsweise Substanzkennzahl zeigt ähnliche Auswertungen, siehe Bild 9.4. Die größten Anteile für einen sehr guten Zustand befinden sich bei

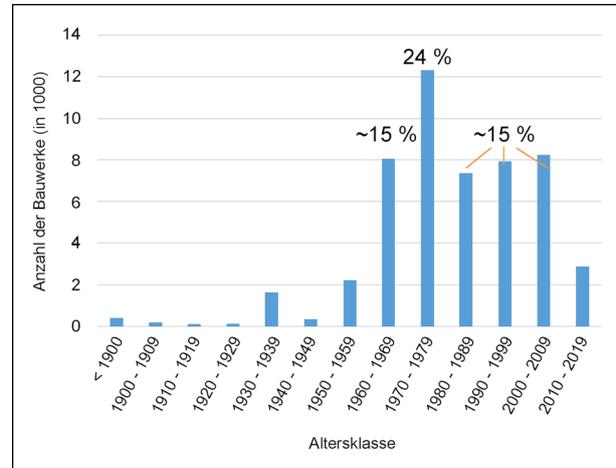


Bild 9.2: Verteilung der Brückenbauwerke nach Altersklasse

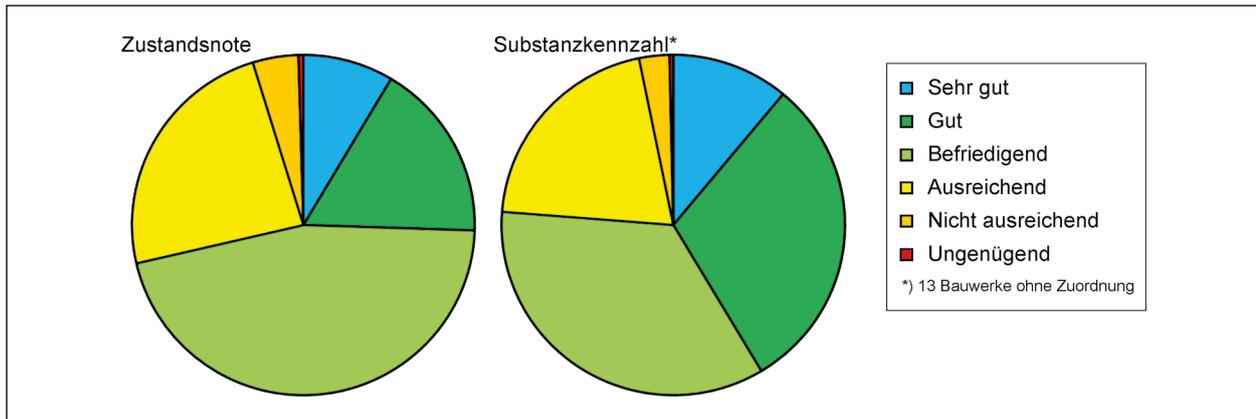


Bild 9.1: Verteilung der 51.564 Brückenbauwerke nach Zustandsnote (links) und Substanzkennzahl (rechts)

jüngeren Bauwerken (Altersklassen »2000 – 2009« und »2010 – 2019«). Brücken der Altersklasse »1960 – 1969« sowie der Altersklasse »1970 – 1979« besitzen die größten Anteile mit mangelhafter Zustandsnote.

Die Hypothese, dass ältere Bauwerke einem schlechteren Zustand zuzuordnen sind, wird mittels quadratischer Kontingenz und dem korrigierten Kontingenzkoeffizienten C_{korr} nach PEARSON, in der die Definition der statistischen Abhängigkeit (Gleichung (4) und (5)) mit einfließt, gemessen. Auf den betrachteten Datensatz angewandt, resultiert dieser Wert in

- $C_{korr} = 0,35$ für Altersklasse und Zustandsnote und
- $C_{korr} = 0,33$ für Altersklasse und Substanzkennzahl.

Somit kann ein schwacher bis mittlerer Zusammenhang für diese Merkmale festgestellt werden. Diese Information widerlegt die Hypothese des Zusammenhangs zwischen Alter und Zustand in Teilen.

Ein Grund für diese Resultate liegt in der Verteilung der Altersklasse, da etwa 9 Prozent der Bauwerke auf die Altersklassen 1900 bis 1959 fallen und jüngere Bauwerke größere Anteile besitzen, wie auch die Verteilung in Bild 9.2 zeigt. Das Ziel, die Zuverlässigkeit und die Sicherheit von Infrastrukturelementen zu gewährleisten, könnte mit der Fokussierung auf ältere Bauwerke erfüllt werden, würde ein stärkerer statistischer Zusammenhang vorliegen. Diese Hypothese wurde jedoch mit der Berechnung der Korrelationskoeffizienten widerlegt. Zustandsnote und Substanzkennzahl können somit nicht ausschließlich als Resilienzindikator herangezogen werden.

Im nächsten Schritt wird der gesichtete Datenbestand nach Bauwerksart und Baustoff in Kombination mit Zustand und Alter ausgewertet. Bild 9.5 zeigt im linken Diagramm die Verteilung nach verwendetem Baustoff. Etwa 90 Prozent aller Bauwerke entfallen auf Stahlbeton und Spannbeton. Da die meisten Bauwerke mit diesen Baustoffen ausgeführt sind, sind die Bewertungen auf Objektebene auf diese Materialien fokussiert.

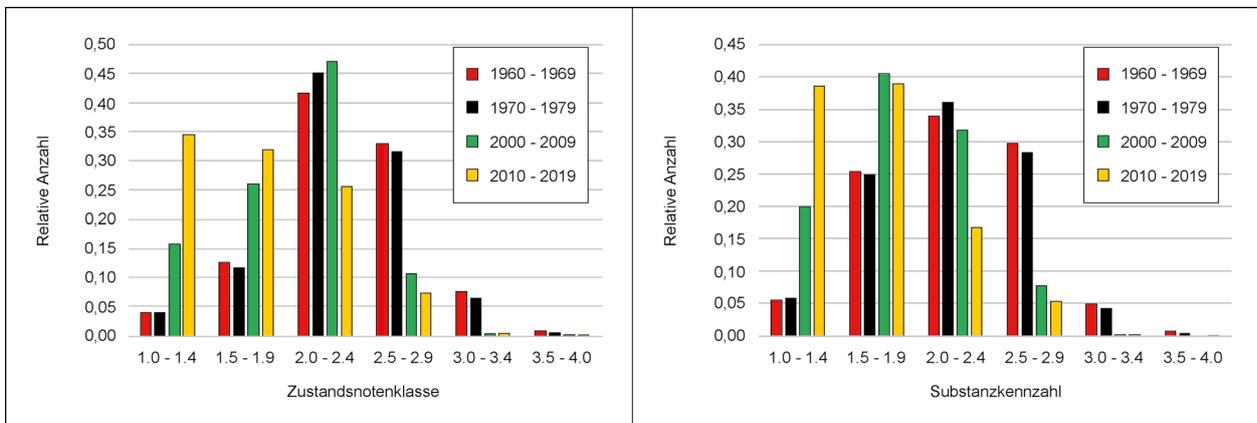


Bild 9.3: Bedingte Verteilung der Zustandsnote (links) und der Substanzkennzahl (rechts) bei gegebener Altersklasse

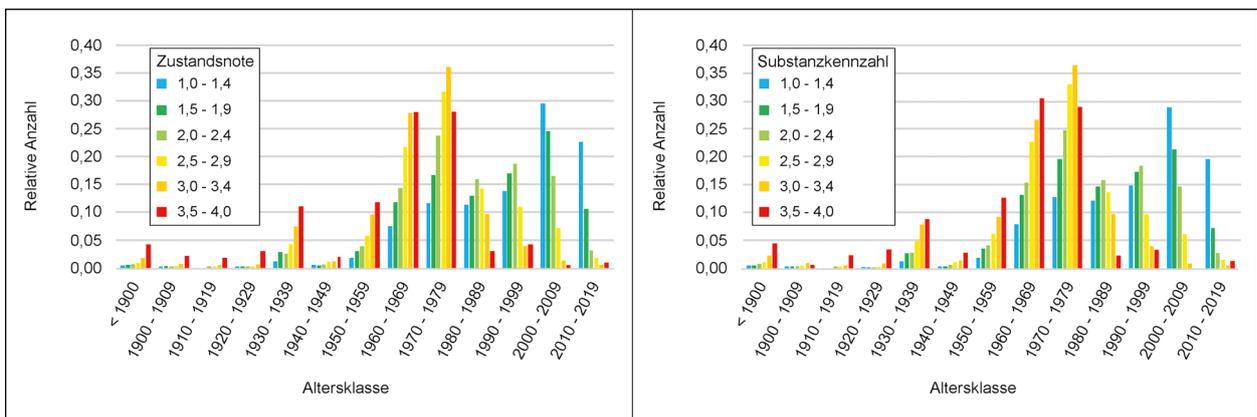


Bild 9.4: Bedingte Verteilung der Altersklasse bei gegebener Zustandsnote (links) und Substanzkennzahl (rechts)

Das rechte Diagramm in Bild 9.5 zeigt die Verteilung der Bauwerke in Abhängigkeit ihrer Konstruktionsart. Über 60 Prozent sind als Balken- oder Plattenbrücke ausgeführt und weitere 20 Prozent sind einer Rahmenbrücke zuzuordnen.

In der Presse finden sich regelmäßig Aussagen, dass insbesondere Bauwerke aus Spannbeton in einem schlechten Zustand seien, wie beispielhaft in einem Artikel der Zeit (STRASSMANN, 2007). Daher ist das Zusammenhangsmaß zwischen den Merkmalen Baustoff und Zustand bzw. Substanzkennzahl ausgewertet.

Bild 9.6 zeigt die Verteilung der Substanzkennzahl und der Zustandsnote unter der Bedingung, dass der Baustoffe Spannbeton (20.999 Bauwerke) oder Stahlbeton (25.676 Bauwerke) verwendet wurde. Bei beiden Baustoffen liegen die Maximalwerte in der jeweils gleichen Notenklasse vor, wobei die Zustandsnote leicht schlechtere Werte aufzeigt. Bei nicht ausreichendem oder ungenügendem Zustand

sind mehr Bauwerke dem Baustoff Spannbeton zuzuordnen. Die Messung der Korrelation resultiert in folgenden Koeffizienten:

- $C_{korr} = 0,24$ für Baustoff und Substanzkennzahl und
- $C_{korr} = 0,34$ für Baustoff und Zustandsnote.

Somit liegt für die Zustandsnote eine leicht höhere Abhängigkeit vor, jedoch ist für beide Bewertungsmerkmale der statistische Zusammenhang zum verwendeten Baustoff als schwach einzustufen. Daraus folgt, dass die Aussage des schlechten Zustands für Brücken aus Spannbeton, basierend auf dem vorliegenden Datenbestand, nicht belegt werden kann.

Bild 9.7 zeigt die bedingte Verteilung von Substanzkennzahl (rechts) und Zustandsnote (rechts) bei gegebener Bauwerksart für die häufigsten Vorkommen:

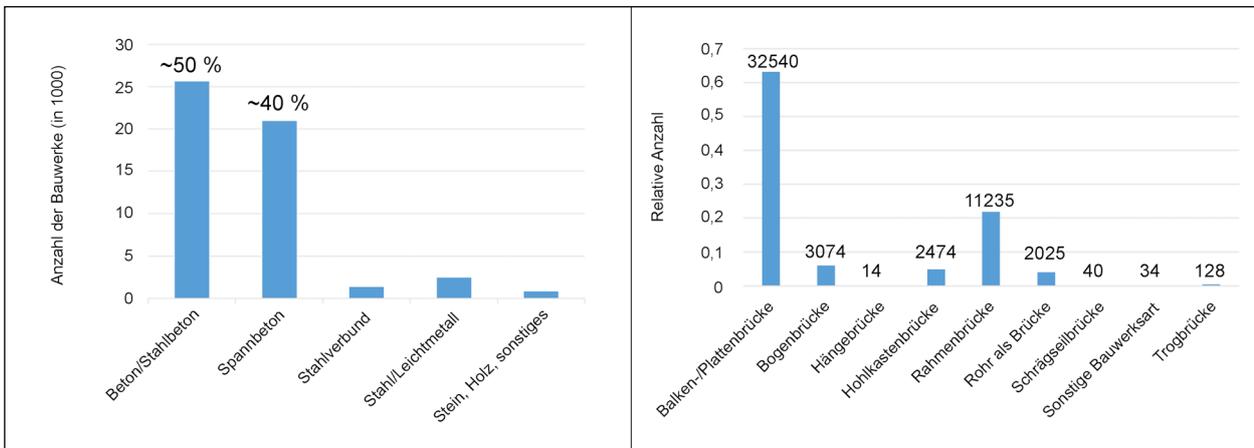


Bild 9.5: Verteilung von Brückenbauwerken nach verwendetem Baustoff (links) und der Bauwerksart (rechts)

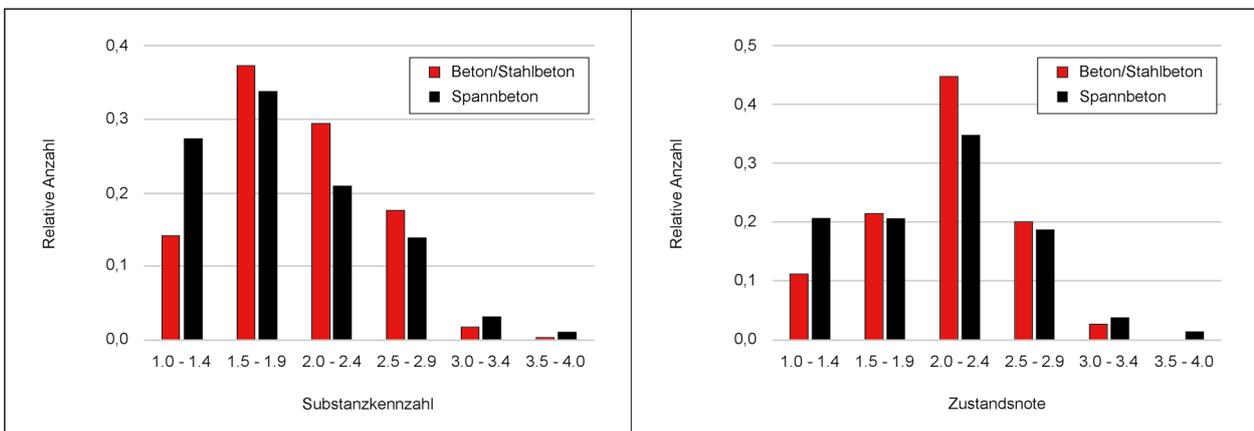


Bild 9.6: Bedingte Verteilung der Substanzkennzahl (links) und Zustandsnote (rechts) bei gegebenem Baustoff am Beispiel Stahl- und Spannbeton

- Balken-/Plattenbrücke (32.635 Bauwerke),
- Hohlkastenbrücke (2.474 Bauwerke),
- Rahmenbrücke (11.229 Bauwerke),
- Bogenbrücke (3.072 Bauwerke).

Unter der Bedingung, dass eine Hohlkastenbrücke vorliegt, werden die meisten Vorkommnisse für Zustandsnote und Substanzkennzahl den Notenklassen befriedigend bis ausreichend zugeordnet. Für die Bauwerksart Rahmenbrücke befinden sich über 40 Prozent der Bauwerke in einem guten Zustand bezüglich der Substanzkennzahl. Generell lassen sich jedoch keine eindeutigen Abhängigkeiten aus dieser Darstellung ableiten, was auch in entsprechenden Korrelationskoeffizienten resultiert:

- $C_{korr} = 0,29$ für Bauwerk und Substanzkennzahl und
- $C_{korr} = 0,26$ für Baustoff und Zustandsnote.

Weitere Bewertungen von Zusammenhangsmaßen sind in Bild 9.8 zusammengefasst. Das linke Diagramm zeigt die bedingte Verteilung des Baustoffes bei gegebener Bauwerksart und es lassen sich eindeutige Tendenzen feststellen. So sind Hohlkastenbrücken überwiegend mit dem Baustoff Spannbeton errichtet, Bogenbrücken anteilig in Stahlbeton bzw. Stein und Rahmenbrücken in Stahlbeton.

Das rechte Diagramm in Bild 9.8 zeigt die bedingte Verteilung der Altersklassen bei gegebener Bauwerksart. Es wird ersichtlich, dass Hohlkastenbrücken vermehrt in den 1960er- und 1970er-Jahren errichtet wurden. Rahmenbrücken sind vermehrt zur Jahrtausendwende errichtet worden, was auch für die erhöhten Anteile in einer guten Substanzkennzahl (Bild 9.7 links) resultiert. Diese Erkenntnisse spiegeln sich auch in den entsprechenden Maßzahlen wider:

- $C_{korr} = 0,67$ für Bauwerk und Baustoff und
- $C_{korr} = 0,44$ für Bauwerke und Altersklasse.

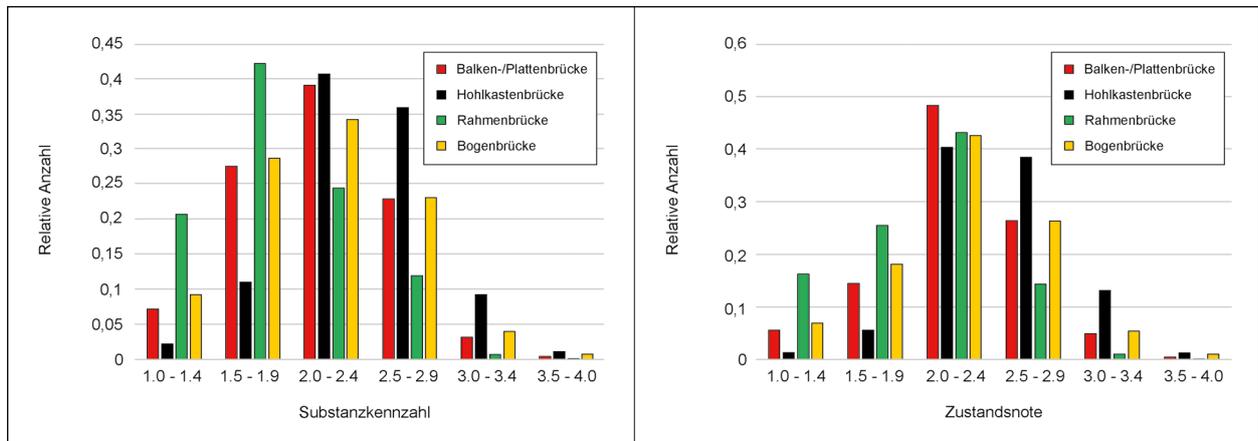


Bild 9.7: Bedingte Verteilung der Substanzkennzahl (links) und Zustandsnote (rechts) bei gegebener Bauwerksart

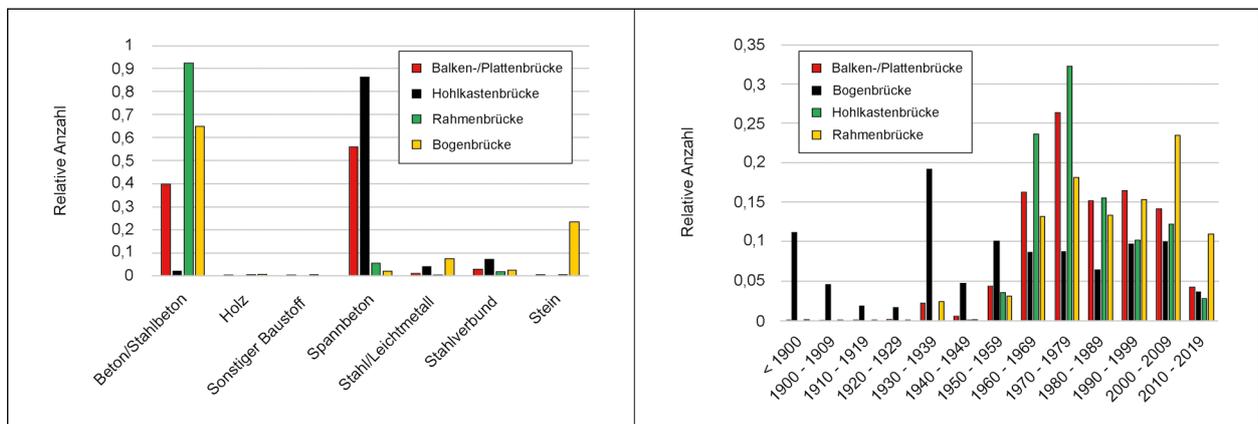


Bild 9.8: Bedingte Verteilung des Baustoffes (links) und der Altersklasse bei gegebener Bauwerksart

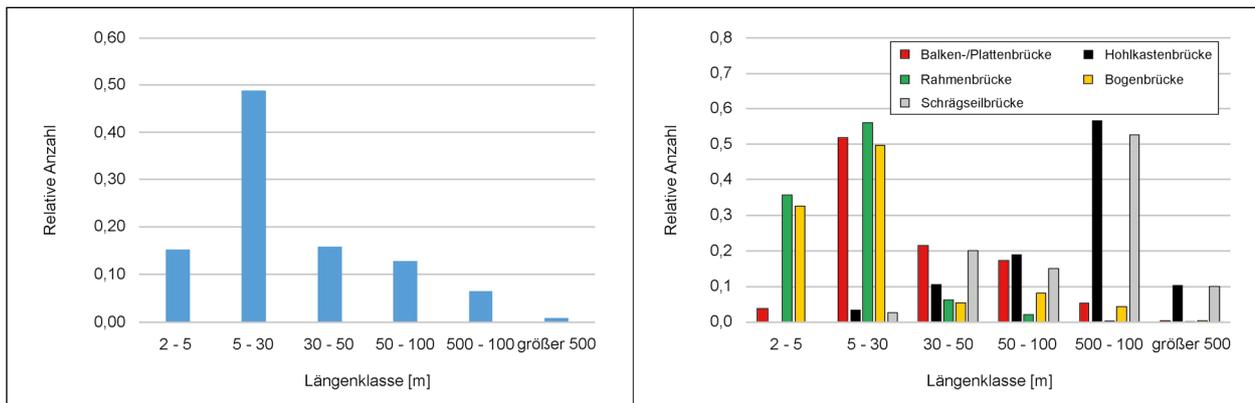


Bild 9.9: Verteilung der Brückenbauwerke auf Längensklassen (links) und die bedingte Verteilung der Längensklasse bei gegebener Bauwerksart (rechts)

Die Analyse nach der Längensklasse ist im linken Diagramm von Bild 9.9 dargestellt. Mit annähernd 50 Prozent sind die meisten Bauwerke der Längensklasse »5 – 30 m« zuzuordnen. Geringste Anteile befinden sich in sehr großen Längensklassen. Das rechte Diagramm in Bild 9.9 zeigt die bedingte Verteilung der Längensklasse bei gegebener Bauwerksart. Auch hier lassen sich gewisse Tendenzen erkennen, die auch schon durch die Konstruktionsart vorgegeben sind. Große Spannweiten werden mit einer Rahmen- oder Schrägseilbrücke realisiert und kurze Spannweiten mit Rahmen, Balken- oder Bogenbrücken. Der zugehörige Korrelationskoeffizient für Länge und Bauwerk resultiert in $C_{\text{korrr}} = 0,67$.

9.4 Zusammenfassende Übersicht zur statistischen Auswertung des Datenbestands

Im Kapitel 9.3 wurden die Daten der Bauwerksdatenbank »SIB-Bauwerke« mit einem aktuellen Bestand von 51.564 Brücken ausgewertet. Neben der Verteilung wurden bedingte Häufigkeiten und Zusammenhangsmaße analysiert.

Bezüglich der Verteilung einzelner Attribute sind folgende Eigenschaften festgestellt:

- Bauwerksart
 - Häufigstes Vorkommen besitzt die Balken- oder Plattenbrücke (63 %).
 - Eine Rahmenbrücke besitzt das zweithäufigste Vorkommen (21 %).
- Baustoff
 - Stahlbeton (50 %) und Spannbeton (40 %) sind die am meisten verwendeten Baustoffe.

- Geometrische Eigenschaften
 - 50 % aller Bauwerke sind der Längensklasse »5 – 30 m« zugeordnet.
 - Jeweils etwa 15 % sind auf die Längensklassen »2 – 5 m«, »30 – 50 m« und »50 – 100 m« verteilt.
 - Im Mittel besitzt ein Brückenbauwerk eine Länge von 41 m, eine Stützweite von 18 m und eine Breite von 16 m.
- Alter
 - 9 % aller Bauwerke wurden vor 1960 errichtet.
 - Der größte Anteil (24 %) ist dem Zeitraum 1970 – 1979 zuzuordnen.
 - Jeweils 15 % sind auf die Dekaden 1960 – 1969, 1980 – 1989, 1990 – 1999 und 2000 – 2009 verteilt.
- Zustandsnote und Substanzkennzahl
 - Die meisten Bauwerke sind der Zustandsnote (46 %) und Substanzkennzahl (35 %) der Note »befriedigend« zugeordnet.
 - Im Bereich »sehr gut« und »gut« besitzt die Substanzkennzahl (11 % und 30 %) größere Anteile als die Zustandsnote (9 % und 17 %).

Die Messung von Korrelationen liefert Informationen des Zusammenhangsmaßes verschiedener Merkmale. Da mit den aufgeführten Attributen weitestgehend nominal skalierte Merkmale vorliegen, wurde der korrigierte Korrelationskoeffizient nach PEARSON berechnet, welcher Werte zwischen 0

| | Zustand | Substanzkennzahl | Alter | Baustoff | Bauwerk |
|------------------|---------|------------------|-------|----------|---------|
| Zustand | - | - | 0,35 | 0,34 | 0,26 |
| Substanzkennzahl | - | - | 0,33 | 0,24 | 0,29 |
| Alter | 0,35 | 0,33 | - | - | 0,44 |
| Baustoff | 0,34 | 0,24 | - | - | 0,67 |
| Bauwerk | 0,26 | 0,29 | 0,44 | 0,67 | - |

Tab. 9.3: Berechnete Kontingenzkoeffizienten zweier Merkmale eines Brückenbauwerks

(keine Abhängigkeit) und 1 (Abhängigkeit) annimmt. Eine zusammenfassende Übersicht ist in Tabelle 9.3 gegeben. Die Werte zeigen, dass ein mäßiger bis schwacher Zusammenhang für Alter, Baustoff und Bauwerk zu Zustand und Substanzkennzahl besteht. Allgemeine Aussagen, dass beispielsweise Brücken aus Spannbeton immer in einem schlechten Zustand seien, sind somit widerlegt. Weiterhin lässt sich z. T. die Tendenz feststellen, dass ältere Brücken in einem schlechteren und neuere Brücken in einem besseren Zustand sind, dieses jedoch nicht allgemeine Gültigkeit besitzt.

Mithilfe bedingter Verteilungen konnten im Rahmen der Auswertung gewisse Charakteristiken herausgearbeitet werden. Beispielsweise wurde unter der Verwendung von Spannbeton in den 1960er- und 1970er-Jahren eine Vielzahl der Hohlkastenbrücken mit größeren Spannweiten errichtet. Bauwerke aus diesem Zeitraum befinden sich zu 30 Prozent nur in einem ausreichenden Zustand. Diese und weitere Erkenntnisse werden in die Analysen auf Objektebene mit einbezogen.

Die empirischen kumulierten Geometrieigenschaften sind in Bild 9.10 zusammengefasst und geben die Information für typische Längen und Breiten, wie sie in Deutschland vorkommen. Somit liegen beispielsweise in 90 Prozent aller Fälle die Spannweiten in einem Bereich von 2 bis 30 Metern. Wird ein einzelnes Bauwerk auf Objektebene analysiert, kann im Vergleich zu den abgeleiteten Verteilungsfunktionen bewertet werden, wie häufig entsprechende Bauwerksabmessungen im deutschen Straßenverkehr vorkommen und liefern somit einen Beitrag zur Allgemeingültigkeit der Resilienzbewertung.

Weitere empirische Informationen, wie beispielsweise Zustand oder Alter, aus den Datenbeständen können für die Analyse von Einzelobjekten herangezogen werden. Allerdings wurde in diesem Kapitel festgestellt, dass keine eindeutigen statistischen

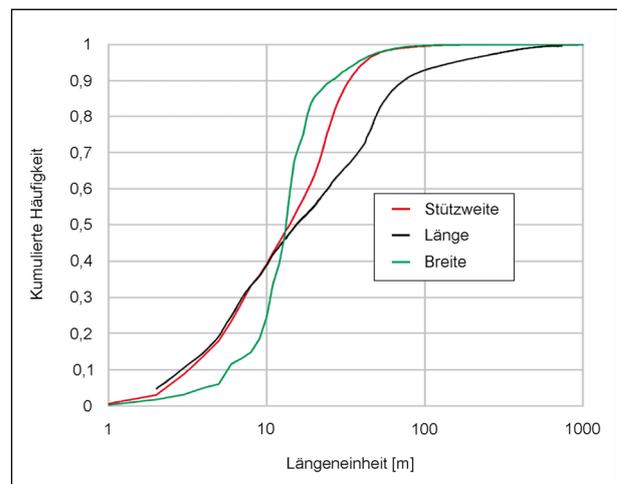


Bild 9.10: Empirisch kumulierte Verteilungsfunktion für geometrische Eigenschaften eines Brückenbauwerks in Deutschland

Zusammenhänge vorliegen und somit auch keine allgemeingültige Zuordnung zu Resilienzindikatoren vorgenommen werden kann.

Würde ein stärkerer statistischer Zusammenhang vorliegen, könnten in Abhängigkeit des Alters oder der Bauweise, unabhängig vom betrachteten Objekt, direkt Rückschlüsse über Zustand oder Substanz geschlossen werden und folglich Schwachstellen auf Netzebene identifiziert werden. Diese Information könnte beispielsweise zusätzlich Beiträge leisten, um Redundanzen im Straßennetz zu schaffen. Andererseits könnte man mit diesen Informationen gezielt auch die Robustheit einzelner Bauwerke ohne vorhergehende detaillierter Bewertung erhöhen. Bedingt durch den schwachen Zusammenhang, empfiehlt sich allerdings eine objektspezifische Ermittlung der Resilienzindikatoren mithilfe der ASB-Ing-Eingangsdaten des betrachteten Objekts und, darauf aufbauend, mit vereinfachten numerischen Methoden.

10 Entwicklung/Weiterentwicklung von Verfahren und Modellen der Netzebene

In diesem Kapitel werden die Entwicklung und Weiterentwicklung von Verfahren und Modellen der Netzebene beschrieben. Zunächst wird das prinzipielle Netzwerkmodell erläutert und dargestellt, wie Straßendaten durch eine abstrakte Netzwerkrepräsentation, bestehend aus Knoten und Kanten, abgebildet werden. Diese abstrakte Repräsentation ist notwendig, um in nächsten Schritt Verfahren zur Analyse aus der Graphentheorie bzw. Netzwerkforschung anwenden zu können. Zunächst werden drei gängige Maße vorgestellt und anhand eines einfachen Netzwerks illustriert. Anschließend wird in Anwendungsbeispielen, die auf den im Kapitel 7 beschriebenen Szenarien beruhen, gezeigt, wie die Verfahren eingesetzt werden. Im Abschluss werden Weiterentwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.

10.1 Netzwerkmodell

Bevor eine Netzwerkanalyse durchgeführt werden kann, muss als erster notwendiger Schritt ein Netzwerk (Graph) erstellt werden. Diese abstrakte Struktur repräsentiert eine Menge von Objekten als Kno-

ten und die Verbindungen zwischen den Objekten als Kanten. Für die Erstellung eines Netzwerks (Graphen) wird zunächst festgelegt, welche Objekte durch Knoten repräsentiert werden. Für das Beispiel Straßennetz ist die Repräsentation von Kreuzungen als Knoten und die Repräsentation der Verbindungen zwischen den Kreuzungen als Kanten eine übliche Zuordnung.

Im konkreten Fall müssen die vorliegenden Straßendaten in ein Netzwerk überführt werden. Zur Erläuterung des Ausgangspunkts dieses Prozesses sind in Bild 10.1 die Autobahnen mit einstelliger Nummer aus dem BISStra-Testdatensatz dargestellt. Jede der neun Autobahnen weist eine unterschiedliche Farbe auf. In der Legende sind in Klammern die Anzahl der Features (geometrische Teilstücke) pro Autobahn angegeben. Jede der Autobahnen besteht aus etwa 1.000 bis 1.700 Features. Die Beschränkung auf das Straßennetz der Autobahnen mit einstelliger Nummer erfolgte aus Gründen einer übersichtlichen und nachvollziehbaren Illustration des Prozesses. Für aussagekräftige Berechnungen werden später komplexere Netzwerke, die auf umfangreicheren Straßendaten beruhen, erstellt.

Zur Illustration der Umwandlung von Straßendaten in ein Netzwerk wurde auf der Grundlage des Stra-

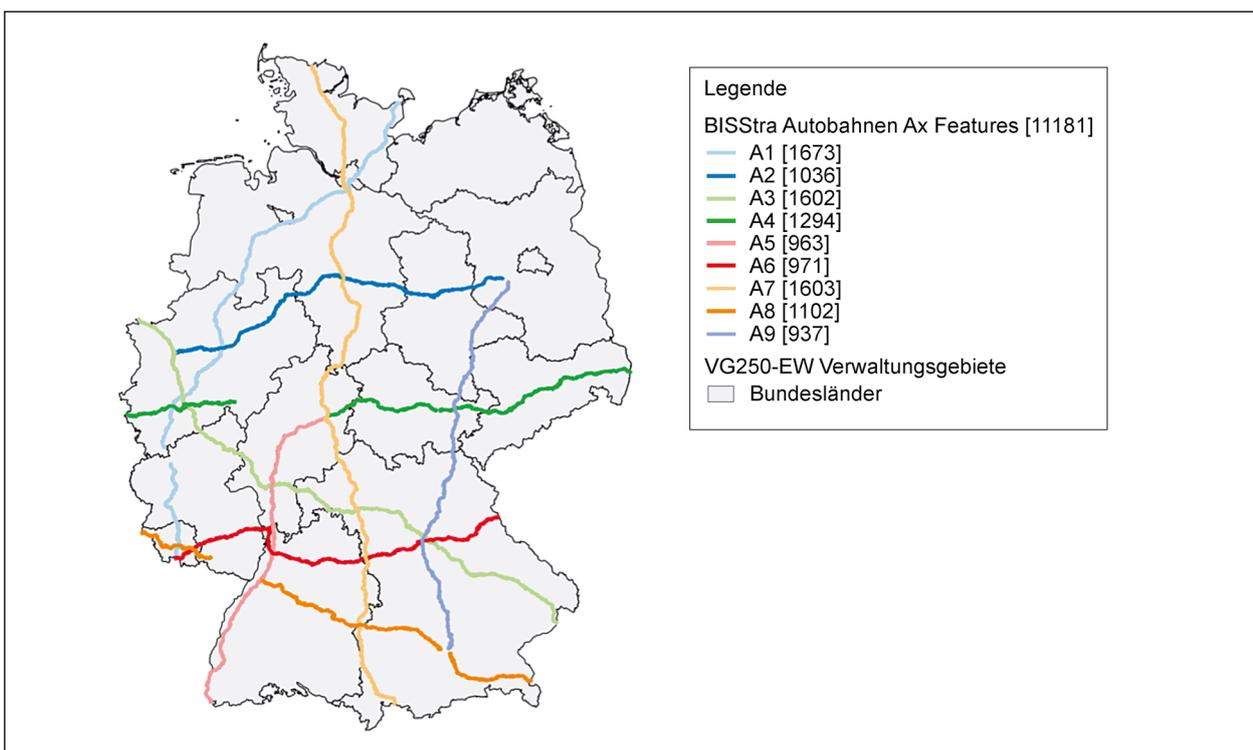


Bild 10.1: BISStra-Autobahnen mit einstelliger Nummer (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

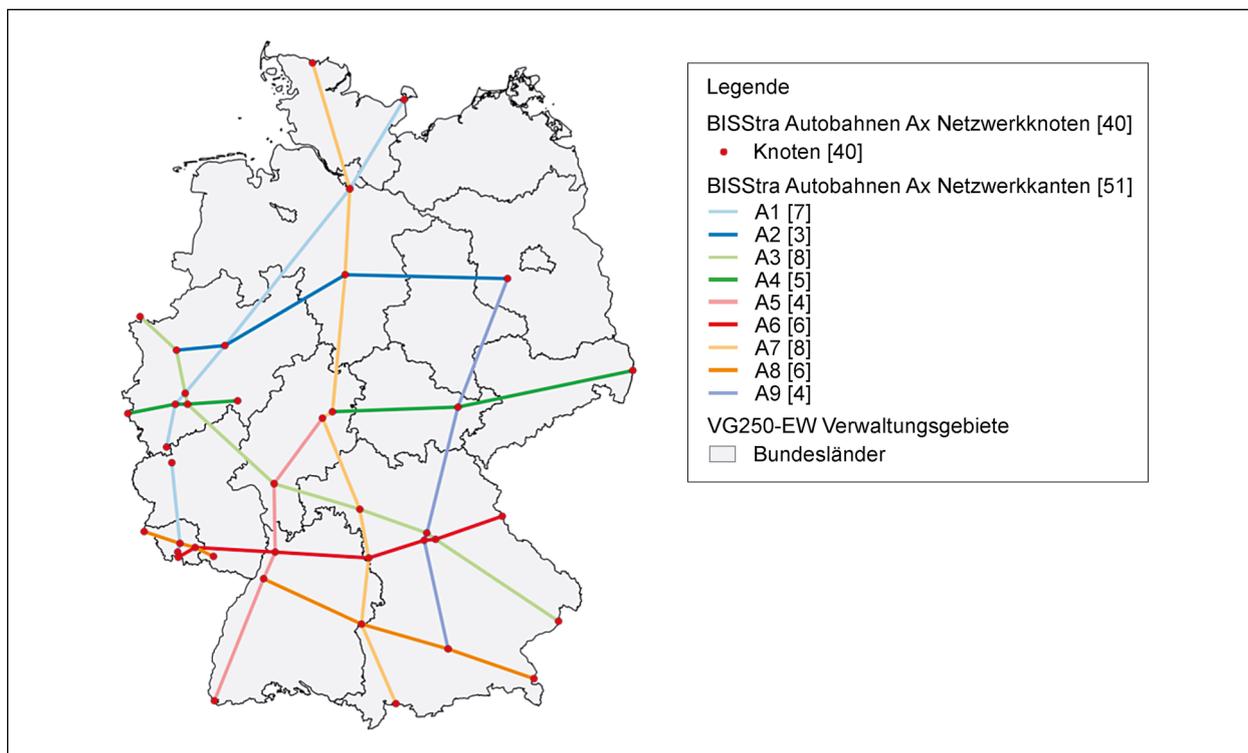


Bild 10.2: BISStra-Autobahnen: Netzwerkanten (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

ßennetzes der Autobahnen mit einstelliger Nummer in QGIS manuell ein Netzwerk erstellt. In Bild 10.2 ist das Netzwerk, welches aus 40 Knoten und 51 Kanten besteht, dargestellt. Zur Erleichterung der Herstellung eines visuellen Bezugs zwischen den Abbildungen wurde für die Kanten dieselbe Farbgebung verwendet wie in der vorhergehenden Bild für die entsprechenden Straßendaten. Ebenfalls angegeben ist die Anzahl der Features, die hier der Anzahl der Kanten entspricht. Ein Vergleich der Anzahl der Features beider Abbildungen verdeutlicht die Reduktion der Daten und die Abstraktion des Modells. Ziel ist es, diesen Prozess der Konversion von Straßendaten zum Netzwerk (Graphen) weitgehend zu automatisieren.

10.2 Verfahren zur Netzwerkanalyse

Als Einführung in die Netzwerkanalyse unter Verwendung des obigen Beispielnetzwerks werden hier zunächst drei einfache Maßzahlen bzw. Analyseverfahren vorgestellt: Verfahren zur Berechnung der Zentralität (centrality) haben das Ziel, die wichtigsten Elemente in einem Netzwerk zu identifizieren. Nach Definition der drei hier vorgestellten Maßzahlen wird darauf eingegangen, inwieweit sich Rückschlüsse anhand der Zentralitätswerte einzelner Knoten im Verhältnis zu den Werten der ande-

ren Knoten auf die Rolle und Wichtigkeit dieser Knoten im Netzwerk ziehen lassen. In diese Überlegungen fließt auch ein, welche Auswirkungen der Ausfall bestimmter Knoten im Vergleich zu anderen auf das Netz haben könnte.

Der Grad (degree) eines Knotens ist definiert als die Anzahl der Kanten, die diesen Knoten mit anderen Knoten verbinden. Für dieses Maß werden also nur die unmittelbaren Nachbarn eines Knoten berücksichtigt. In Bild 10.3 ist der Grad der Knoten aus dem Beispielnetzwerk durch die Größe der Knoten hervorgehoben. Der Knotengrad variiert in diesem Fall zwischen Eins und Vier. Die Anzahl der Knoten mit einem bestimmten Grad ist in eckigen Klammern hinter der jeweiligen Auflistung des Knotengrades angegeben.

Die Nähe (closeness centrality) ist ein Maß, welches nicht nur die unmittelbaren Nachbarn eines Knoten berücksichtigt, sondern auf der Entfernung eines Knotens zu allen anderen Knoten basiert. Das dient zur Identifikation von Knoten, die sozusagen im »Zentrum« des Netzwerks stehen. Häufig wird der Kehrwert der Summe der Distanzen zu allen anderen Knoten verwendet, um sicherzustellen, dass die Knoten im Zentrum des Netzwerks einen hohen Wert für Nähe aufweisen. Bild 10.4 verdeutlicht die Nähe (closeness centrality) der Knoten aus

dem Beispielnetzwerk durch eine Einteilung in fünf Stufen von hohen bis niedrigen Werten für Nähe und entsprechender Einfärbung in der Darstellung.

Zwischenzentralität (betweenness centrality) als ein Knotenmaß für die Anzahl, wie oft ein Knoten als Zwischenglied auf einem kürzesten Pfad zwischen

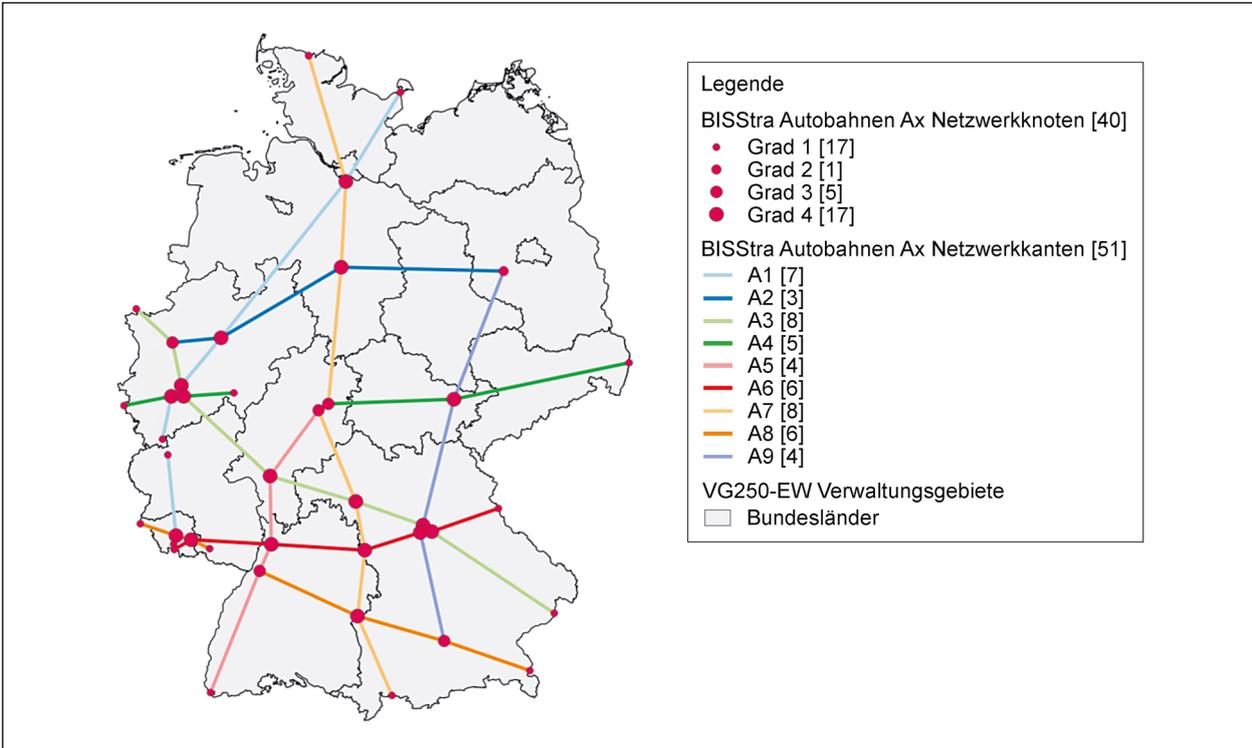


Bild 10.3: Netzwerkknoten: Grad (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

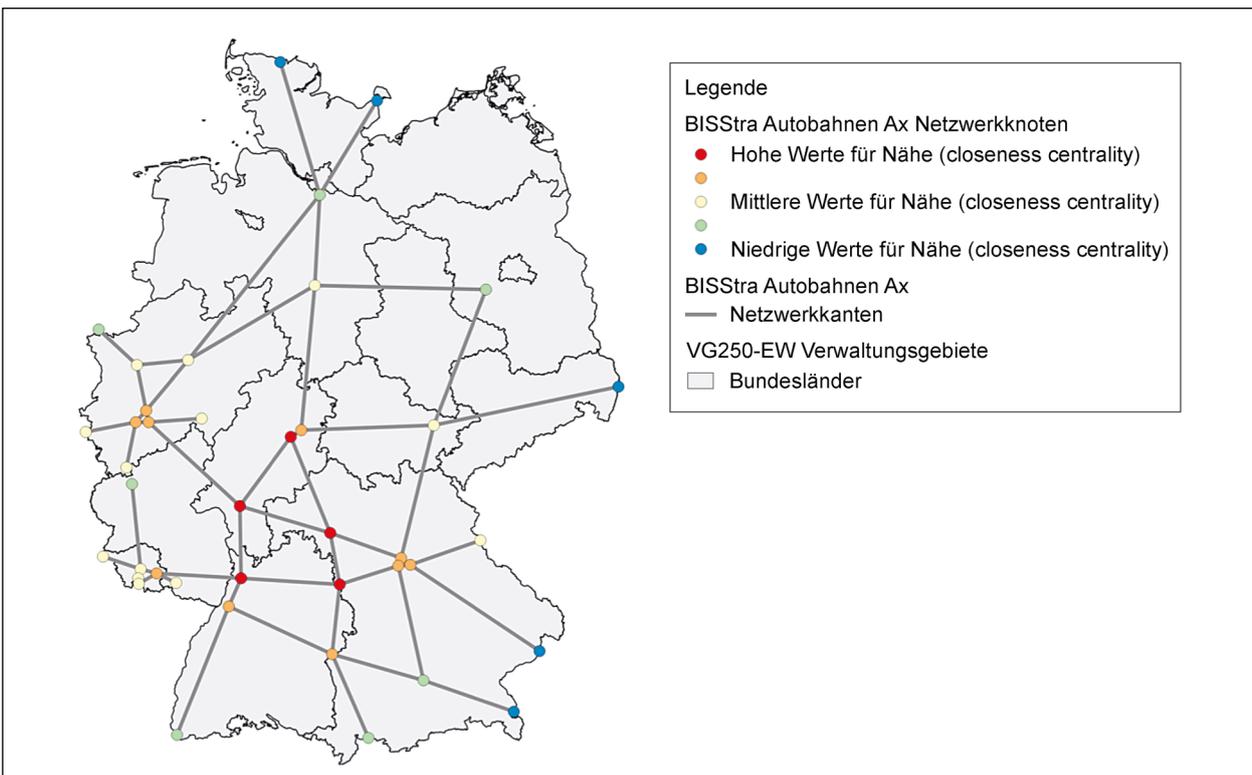


Bild 10.4: Netzwerkknoten: Nähe (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

zwei anderen Knoten fungiert. Zur Berechnung der Zwischenzentralität für einen Knoten v werden für alle Knotenpaare (s, t) mit $v \neq s \neq t$ die kürzesten Pfade zwischen den Knoten s und t ermittelt. Danach wird der Anteil dieser kürzesten Pfade, die über den Knoten v verlaufen, bestimmt. Diese Anteile werden dann aufsummiert. Die Zwischenzentralität für das obige Beispielnetzwerk ist in Bild 10.5 dargestellt.

Die Zwischenzentralität hängt mit der Konnektivität eines Netzwerks insofern zusammen, dass Ausfälle von Knoten mit hoher Zwischenzentralität eher das Potenzial haben, ein zusammenhängendes Netzwerk in nicht mehr zusammenhängende Teilnetzwerke zerfallen zu lassen.

In Bild 10.6 sind die drei oben vorgestellten Zentralitätsmaße zum Vergleich nochmals nebeneinander dargestellt. Diese und die obigen Darstellungen die-

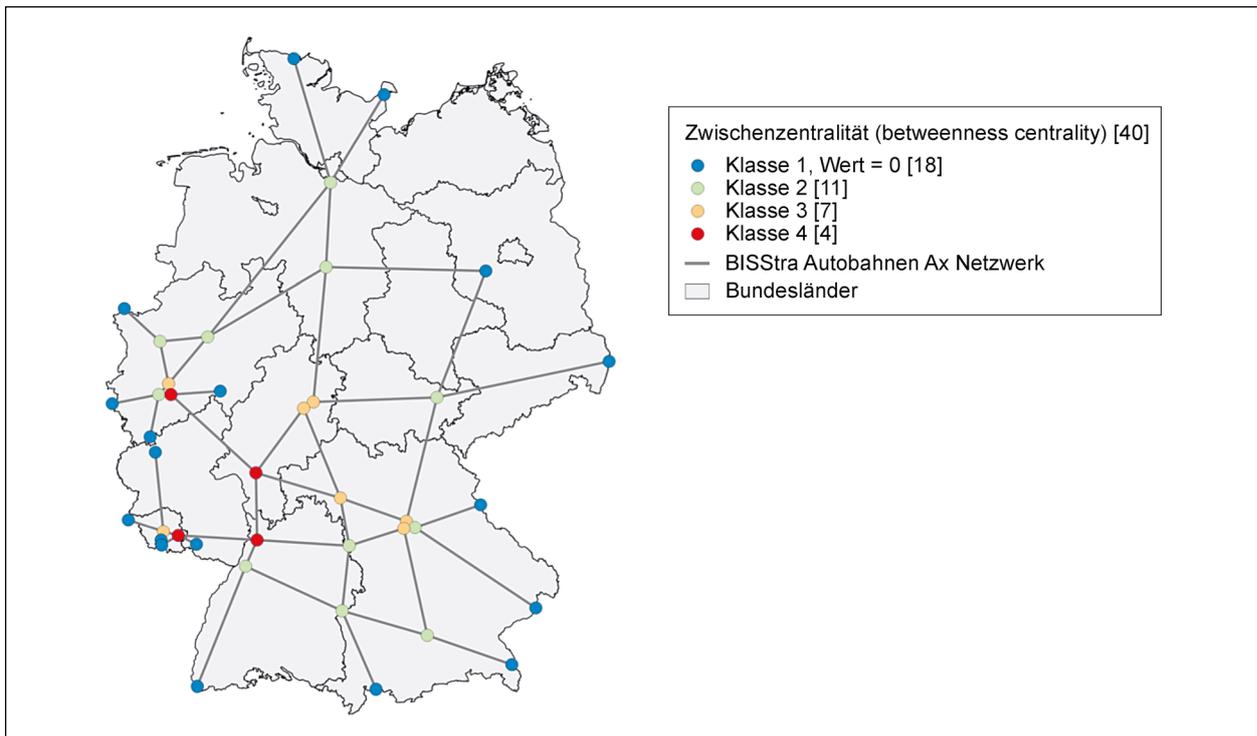


Bild 10.5: Zwischenzentralität (betweenness centrality) (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2016)

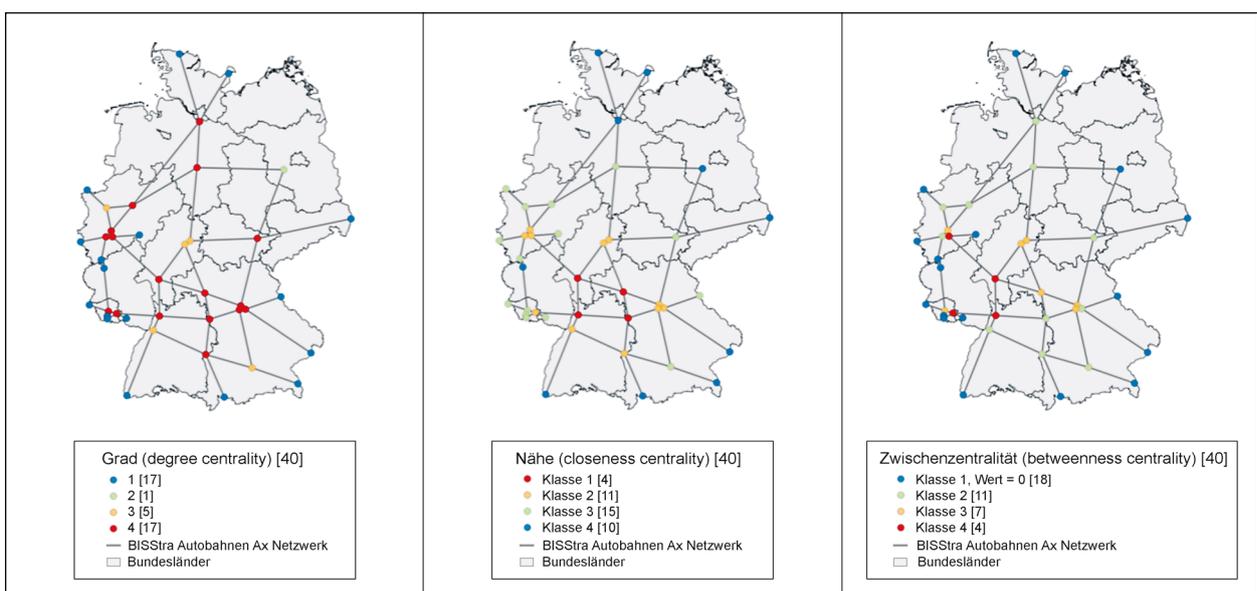


Bild 10.6: Zentralitätsmaße: Grad, Nähe und Zwischenzentralität (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2016)

nen lediglich zur Illustration der vorgestellten Zentralitätsmaße anhand eines simplen Beispielnetzwerks in Deutschland. Für eine detaillierte Betrachtung der Bedeutung von Knoten im Verkehrsnetz wäre es unter Umständen sinnvoll, angrenzende Straßennetze im Ausland ebenfalls zu berücksichtigen.

Zusammenfassend wird an dieser Stelle auf die Bedeutung der vorgestellten Zentralitätsmaße zur Bestimmung von wichtigen Knoten im Netzwerk eingegangen. Je höher der Grad eines Knotens (degree centrality), desto mehr Verbindungen mit anderen Knoten weist er auf. Daher wären beispielsweise vom Ausfall eines Knotens mit einem hohen Knotengrad mehr Verbindungen betroffen als bei dem Ausfall eines Knotens mit niedrigem Grad. Knoten mit einem hohen Wert für Nähe (closeness centrality) liegen »im Zentrum« des Netzwerks und sind daher von höherer Bedeutung als Knoten in den Randbereichen mit niedrigen Werten für Nähe. In Bezug auf die Gesamtheit aller möglichen Verbindungen zwischen zwei beliebigen Knoten in einem Netzwerk spielen Knoten mit einer hohen Zwischenzentralität (betweenness centrality) eine wichtigere Rolle als Knoten mit geringer Zwischenzentralität, da über sie ein Großteil der kürzesten Verbindungen läuft. Bei Ausfall eines Knotens mit hoher Zwischenzentralität sind mehr der kürzeste Wege zwischen zwei Knoten betroffen, sodass nach Ausfall mehr Umwege erforderlich sind als bei Ausfall eines Knotens mit geringer Zwischenzentralität.

Im Folgenden werden noch einige Beispiele genannt, wie Zentralitätsmaße zur Netzwerkanalyse eingesetzt werden, wobei ein Schwerpunkt auf Zwischenzentralität liegt. FREEMAN setzte Zentralitätsmaße zur Analyse sozialer Netzwerke ein (FREEMAN 1978). DERRIBLE vergleicht in U-Bahn-Netzwerke verschiedener Städte und hebt die Bedeutung von Zwischenzentralität für seine Analysen hervor (DERRIBLE 2012). Eine Arbeit von KERMANSHAH et al. untersucht die Resilienz von Straßennetzen gegenüber extremen Ereignissen unter Verwendung von Ansätzen aus GIS und der Netzwerkforschung (KERMANSHAH et al. 2014). Die Autoren setzen Zwischenzentralität als einen Stellvertreterwert für den Fluss ein und messen den Einfluss von Netzwerkstörungen wie beispielsweise Überflutungen durch die Änderung der Werte für Zwischenzentralität an den einzelnen Straßensegmenten vor und nach einem Ereignis. Dieses Vorgehen ist den in diesem Forschungsprojekt angewandten Verfahren und Modellen sehr ähnlich. Bei-

spielsweise wird im Kapitel 10.3.3 die Zwischenzentralität an den Knoten des Netzwerkmodells anhand des Szenarios Ausfalls der DB-Brücke »Nievenheim« ebenfalls vor und nach dem Ereignis verglichen.

10.3 Anwendungsbeispiele

10.3.1 Szenario Brand unter Autobahnbrücke bei Dormagen-Nievenheim

In diesem Kapitel wird eine Analyse auf Netzwerkebene am Beispiel des ausgewählten Szenarios »Brand unter der Autobahnbrücke an der A 57 bei Dormagen-Nievenheim« durchgeführt. Dabei wird das Zentralitätsmaß Zwischenzentralität der Knoten im Netzwerk im ungestörten sowie gestörten Zustand (Ausfall einer Kante) bestimmt und miteinander verglichen. Weiterhin werden Daten von für das Beispiel relevanten automatischen Dauerkontrollstellen ausgewertet und zur Validierung der Ergebnisse der Netzwerkanalyse herangezogen.

Die Autobahnbrücke an der A 57 bei Dormagen-Nievenheim liegt auf einer der Hauptverbindungen der beiden Großräume Düsseldorf und Köln. Entsprechend hoch ist das Verkehrsaufkommen. Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke an Werktagen liegt bei etwa 90.000 Fahrzeugen.

Am 14. Februar 2012 kam es zu einem Brand unter der Brücke, wobei diese so stark beschädigt wurde, dass sie abgerissen wurde. Die Stichpunkte geben einen Überblick zu dem zeitlichen Ablauf der Ereignisse:

- 14.2.2012: Brand,
- 26.2.2012: Abriss
 - Vollsperrung zwischen Dormagen und Neuss-Süd,
- 4.4.2012: Behelfsbrücke,
- 3/2014: Weitere Behelfsbrücke als Bypass,
- 11.2.2017: Fertigstellung erster Brückenkörper
 - zwei verengte Fahrstreifen in beide Fahrrichtungen,
- 3/2018: Fertigstellung zweiter Brückenkörper.

In den nächsten zwei Kapiteln werden zunächst die Stundendaten von automatischen Dauerkontrollstellen

behandelt und anschließend wird eine Analyse des Netzwerks in der Umgebung der Autobahnbrücke an der A 57 bei Dormagen-Nievenheim vorgestellt.

10.3.2 Stundendaten der automatischen Dauerzählstellen

Zur Darstellung in einem geografischen Informationssystem wurde ein Gebiet um die Brücke Dormagen ausgewählt, das sich aus folgenden Kreisen zusammensetzt (Kfz-Kennzeichen in Klammern):

- Rhein-Erft-Kreis (BM),
- Düsseldorf (D),
- Köln (K),
- Leverkusen: (LEV, OP),
- Mettmann: (ME),
- Rhein-Kreis Neuss: (NE, GV).

Bild 10.7 zeigt die Autobahnen und Bundesstraßen aus dem BISStra-Testdatensatz für dieses aus den sechs oben genannten Kreisen bestehende Gebiet. Die betrachtete DB-Brücke Nievenheim auf der A 57 bei Dormagen ist als blauer Punkt eingezeichnet.

Weiterhin sind vier automatische Dauerzählstellen als grüne Punkte dargestellt und gekennzeichnet mit ihrer Dauerzählstellen-Nummer (DZ_Nr) sowie der Nummer der Straße, auf der sie sich befinden. Diese befinden sich auf der A 57 selbst sowie auf dazu parallel laufenden benachbarten Straßen der Nord-Süd-Verbindung. Die beiden Bundesstraßen B 477 und B 9 verlaufen westlich bzw. östlich der A 57. Die A 59 ist die nächstgelegene parallele Autobahn östlich der A 57. In der in Bild 10.7 aufgeführten Tabelle sind die Informationen zu den Dauerzählstellen zusammengefasst.

In den Diagrammen (Bild 10.8 und 10.9) werden die Daten der oben genannten vier automatischen Dauerzählstellen visualisiert. Ziel der Darstellung ist es, einen Vergleich der Verkehrsstärke zu verschiedenen Zeitpunkten in Bezug auf die oben genannte Reihenfolge der Ereignisse zu ermöglichen. Von besonderem Interesse sind hier der 14. Februar 2012 als Tag des Brandes sowie der 4. April 2012 als Inbetriebnahme der Behelfsbrücke. Im Sinn einer Resilienzkurve wird dabei die Zeit auf der Abszissenachse aufgetragen und die Verkehrsmenge auf der Ordinatenachse. Da die Verkehrsmenge mit der Tageszeit und dem Wochentag stark variiert, wurden diese für einen Vergleich konstant gehalten. Somit

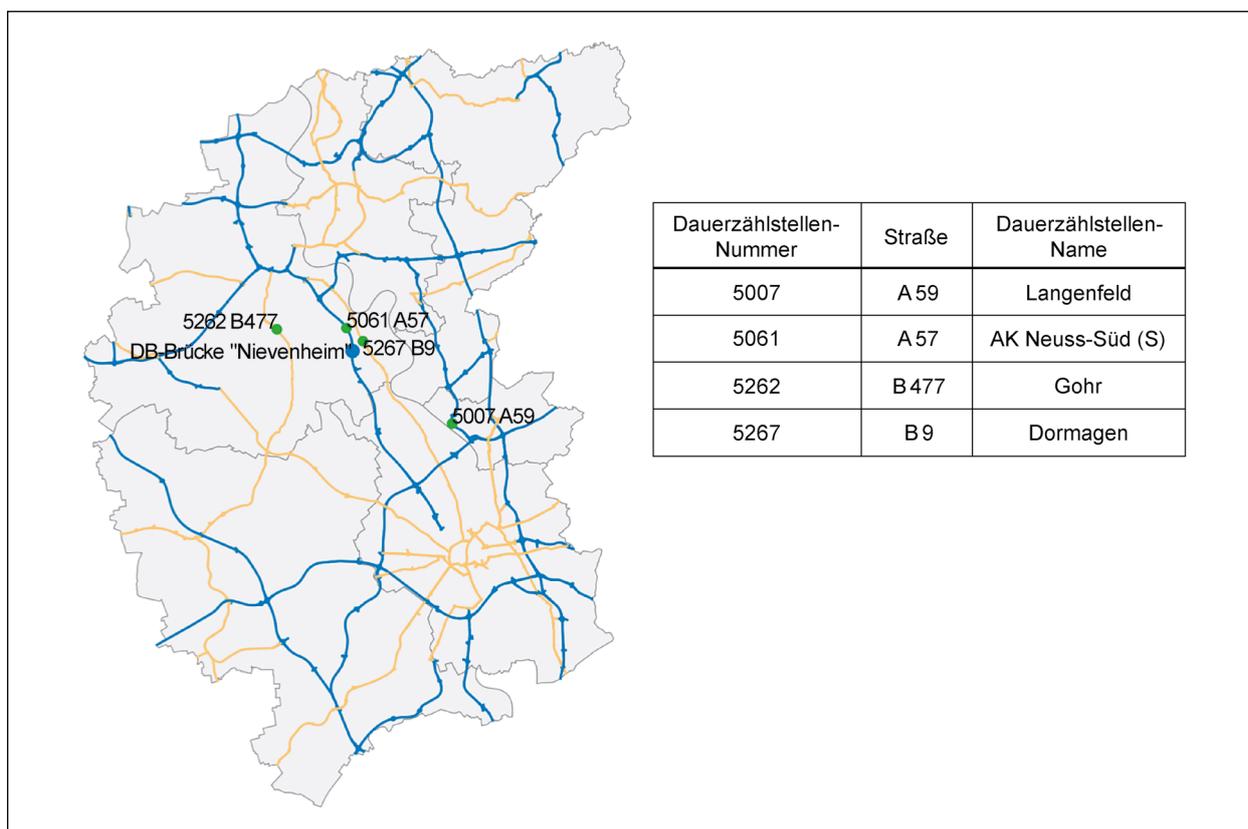


Bild 10.7: Gebiet um die DB-Brücke »Nievenheim« auf der A 57 bei Dormagen (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG)

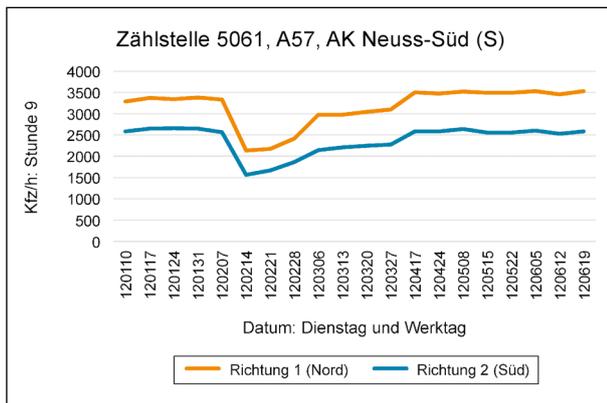


Bild 10.8: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der A 57 an der Zählstelle 5061 »AK Neuss-Süd (S)« an Dienstagen zur Stunde 9

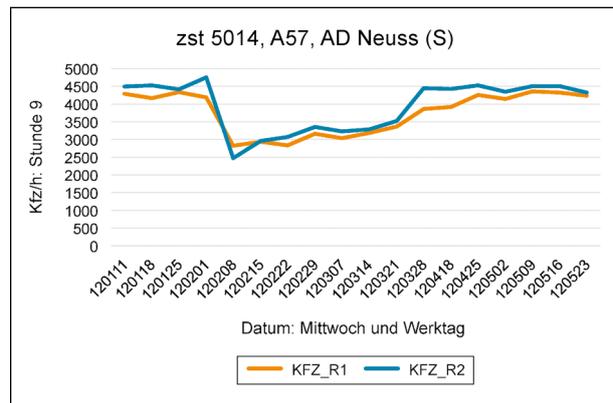


Bild 10.9: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der A 57 an der Zählstelle 5014 »AD Neuss (S)« jeweils am Mittwoch zur Stunde 9

wird die Verkehrsstärke an aufeinanderfolgenden Wochen am selben Wochentag (beispielsweise Dienstag), zur selben Stunde (beispielsweise Stunde 9) herangezogen. Zusätzlich werden nur Werktage berücksichtigt. Bild 10.8 stellt die Verkehrsmenge auf der A 57 an der Zählstelle 5061 an Dienstagen zur Stunde 9 dar. Hierbei werden die beiden Fahrrichtungen Nord und Süd unterschieden.

- KFZ_R1: Verkehrsmenge alle Kfz Richtung 1,
- KFZ_R2: Verkehrsmenge alle Kfz Richtung 2.

In Sinn einer Resilienzmessung sieht man beim Verlauf der Kurven zunächst einen steilen Abfall der Performanz nach Eintritt des Ereignisses und dann eine allmähliche Erholung bis zur Wiederherstellung der vollen Funktionalität.

Die nahezu identische Form der Kurven für die Nord- und Südrichtung auf der A 57 in Bild 10.8 lässt vermuten, dass es sich hier um Schätzwerte handelt. Um dieser Vermutung nachzugehen, wird nachfolgend eine genauere Betrachtung der Daten bezüglich der Spalten für ein entsprechendes Prüfkennzeichen durchgeführt. Weiterhin geben benachbarte Zählstellen auf der betrachteten Autobahn Aufschluss über den prinzipiellen Verlauf der Kurven vom steilen Abfall bis zur allmählichen Erholung.

Folgende Spalten in der Datentabelle beinhalten Angaben zu Prüfkennzeichen:

- K_KFZ_R1: Prüfkennzeichen zur Verkehrsmenge alle Kfz Richtung 1,
- K_KFZ_R2: Prüfkennzeichen zur Verkehrsmenge alle Kfz Richtung 2.

In beiden Spalten liegt im Jahr 2012 durchgängig die Eintragung »s« vor, was laut Datensatzbeschreibung für richtungsbezogene Verkehrsmengen für »Schätzwert wegen eines fehlenden Wertes« steht. Es ist zu klären, ob zur Zählstelle 5061 noch unbearbeitete Originaldaten beschafft werden können. Für diese würde man bei der veranlassenen Vollsperrung eine Verkehrsmenge von Null oder nahezu Null erwarten.

Die nächstgelegene automatische Dauerzählstelle auf der A 57, für die laut Prüfkennzeichen »-« korrekte, regelmäßige Werte vorliegen, hat die Nummer 5014 und befindet sich nördlich bei dem Autobahndreieck Neuss. Die Verkehrsmenge auf der A 57 an der Zählstelle 5014 jeweils am Mittwoch zur Stunde 9 ist in Bild 10.9 visualisiert. Diese Kurve weist ebenfalls den typischen Verlauf einer Resilienzkurve auf.

Die drei Abbildungen (Bild 10.10 bis 10.12) geben die Verkehrsmenge an, die an den übrigen oben genannten automatischen Zählstellen gemessen wurden. Wobei dieselbe Aufteilung der Achsen gewählt wurde.

- Bild 10.10: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der A 59 an der Zählstelle 5007 »Langenfeld« an Dienstagen zur Stunde 9,
- Bild 10.11: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der B 477 an der Zählstelle 5262 »Gohr« an Dienstagen zur Stunde 9,
- Bild 10.12: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der B 9 an der Zählstelle 5267 »Dormagen« an Dienstagen zur Stunde 9.

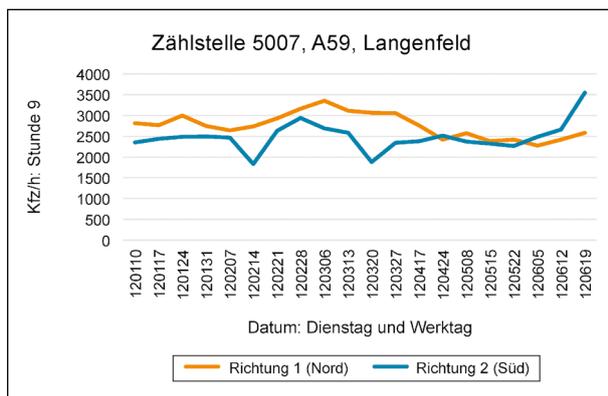


Bild 10.10: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der A 59 an der Zählstelle 5007 »Langenfeld« an Dienstagen zur Stunde 9

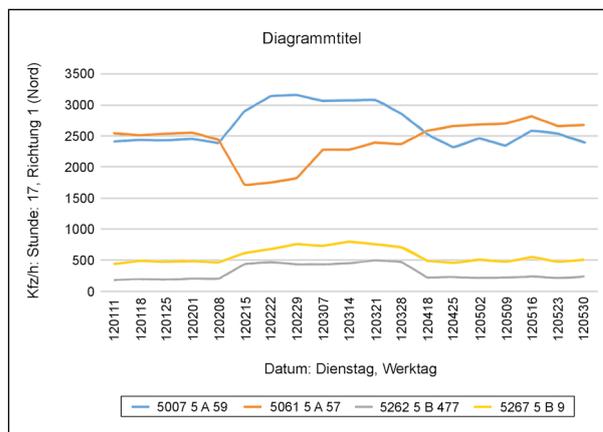


Bild 10.13: Verkehrsmenge an Dienstagen zur Stunde 17 an den vier Zählstellen 5007, 5061, 5262 und 5267

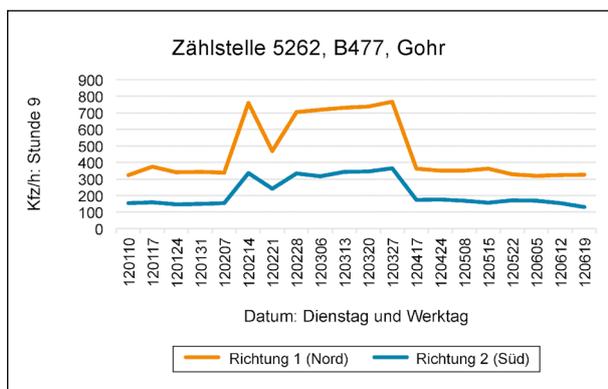


Bild 10.11: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der B 477 an der Zählstelle 5262 »Gohr« an Dienstagen zur Stunde 9

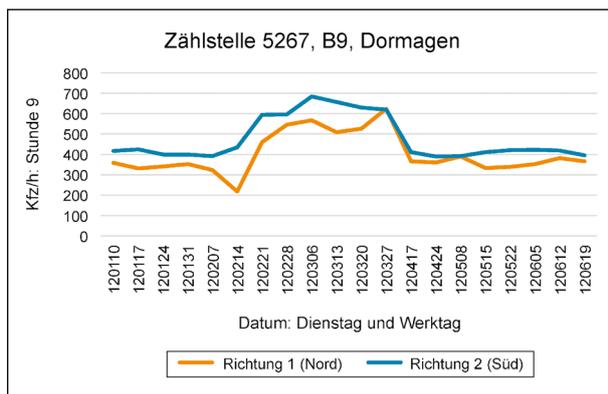


Bild 10.12: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der B 9 an der Zählstelle 5267 »Dormagen« an Dienstagen zur Stunde 9

In Bild 10.13 werden die Verkehrsmengen für die vier oben genannten automatischen Dauerzählstellen an Dienstagen zur Stunde 17 in Richtung 1 (Nord) kombiniert dargestellt. Hier ist eine zeitweise Umlagerung der Verkehrsmenge von der A 47 auf die benachbarten, parallel verlaufenden A 49 sowie B 477 und B 9 zu erkennen.

Die in den Abbildungen sichtbaren Veränderungen in den Verkehrsmengen geben einen Rahmen für einen Vergleich mit den Ergebnissen einer Analyse auf Netzwerkebene mit Methoden der Graphentheorie bzw. Netzwerkforschung. Das wird im nächsten Kapitel behandelt.

10.3.3 Netzwerkanalyse um die DB-Brücke »Nievenheim« bei Dormagen mittels Graphentheorie

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, verändert sich die Verkehrsmenge an den betrachteten automatischen Dauerzählstellen aufgrund des Ausfalls einer Verbindung im Verkehrsnetz. Im Szenario Brand unter der DB-Brücke »Nievenheim« bei Dormagen bedingt die Vollsperrung zwischen Dormagen und Neuss-Süd den Ausfall einer bestimmten Verbindung im Netzwerk bzw. Kante im Graphen. Von besonderem Interesse sind die Zeitabschnitte zum einen vor dem Ereignis, d. h. Normalbetrieb mit nahezu gleichbleibenden Verkehrsmengen an definierten Messzeiten wie beispielsweise werktags an festgelegtem Wochentag zu festgelegter Uhrzeit. Zum anderen stellt die Zeit nach dem Ereignis, bevor eine Wiederherstellung einsetzt, einen markanten Abschnitt dar.

Bei der Analyse auf Netzwerkebene wird der ungestörte Zustand vor dem Ereignis durch einen Netzwerkgraphen, der alle Verbindungen des zugrundeliegenden Straßennetzes enthält, modelliert. Der gestörte Zustand wird im Modell durch das Entfernen von bestimmten Verbindungen repräsentiert.

Zur Analyse auf Netzwerkebene wird das Straßennetz, bestehend aus Autobahnen und Bundesstraßen des BISStra-Testdatensatzes, durch einen

Netzwerkgraphen modelliert, wobei Kreuzungen durch Knoten und die Verbindungen zwischen diesen durch Kanten repräsentiert werden. Weiterhin sind die vier im vorigen Kapitel betrachteten Dauerzählstellen mit den Nummern 5262, 5061, 5267 und 5007 als zusätzliche Knoten in den Graphen aufgenommen. Dadurch lassen sich die für die Knoten im Graphen berechneten Maßzahlen direkt für die Dauerzählstellen ablesen.

Die Zählstelle 5061, welche der DB-Brücke »Nievenheim« bei Dormagen am nächsten ist, diente als Ausgangspunkt, um einen Teilbereich des gesamten Netzwerks für die Analyse auszuwählen. Dabei wurden über Berechnung von Isolinien im Netzwerk diejenigen Knoten und Kanten aufgenommen, welche über Wege im Netzwerk mit einer maximalen Länge von 30 km, ausgehend von dem Knoten der Zählstelle 5061, erreichbar sind. Wenn die 30 km innerhalb einer Kante erreicht sind, wird dort ein »Endknoten« (Knotengrad 1) eingefügt.

In Bild 10.14 ist das Gebiet der DB-Brücke »Nievenheim« in den umgebenden Kreisen und die sich dort befindenden Autobahnen (Blau) und Bundesstraßen (Gelb) zu sehen. Der betrachtete Ausschnitt aus dem Knoten- und Kanten-Modell ist in Grau dargestellt, wobei die vier automatischen Zählstellen mit ihrer Nummer und der Straße, auf der sie sich befinden, beschriftet sind. Die DB-Brücke »Nievenheim« liegt auf dem Autobahnstück nördlich der Zählstelle 5061.

Für die Knoten des ungestörten Netzwerks wird die Zwischenzentralität (engl.: betweenness centrality) berechnet. Diese ist in Bild 10.15 dargestellt, wobei ein spektraler Farbverlauf (Blau, Türkis, Grün, Gelb, Orange, Rot) für die Visualisierung gewählt wurde. Danach wird der Ausfall einer Teilstrecke der A 57, auf der sich die DB-Brücke »Nievenheim« befindet, durch das Entfernen der entsprechenden Kante im Netzwerk modelliert. Anschließend wird die Zwischenzentralität erneut für alle Knoten des Netzes berechnet, wobei derselbe Farbverlauf in Darstellung zum Einsatz kommt (siehe Bild 10.16).

Der prozentuale Unterschied zwischen den Werten für die »betweenness centrality« bei ungestörtem Netz und bei dem Netz mit entfernter Kante ist in Bild 10.17 verdeutlicht. Es wird eine Farbskala von Dunkelrot über Hellrot nach Weiß als Mittelwert und anschließend über Hellblau und Dunkelblau verwendet. Weiß steht dabei für keine Veränderung. Blautöne visualisieren einen Zuwachs des Wertes und Rottöne eine Abnahme des Wertes, wobei dunklere Töne für größere Änderungen stehen. In der Legende zu Bild 10.17 ist die Zuordnung der Farbtöne zu Werten der prozentualen Veränderung angegeben.

Die Berechnung der Zwischenzentralität basiert auf kürzesten Pfaden zwischen Knotenpaaren. Zur Bestimmung dieser kürzesten Pfade, die aus mehreren Netzwerkkanten bestehen können, ist es erforderlich, ein Maß für die Länge der Kanten anzugeben.

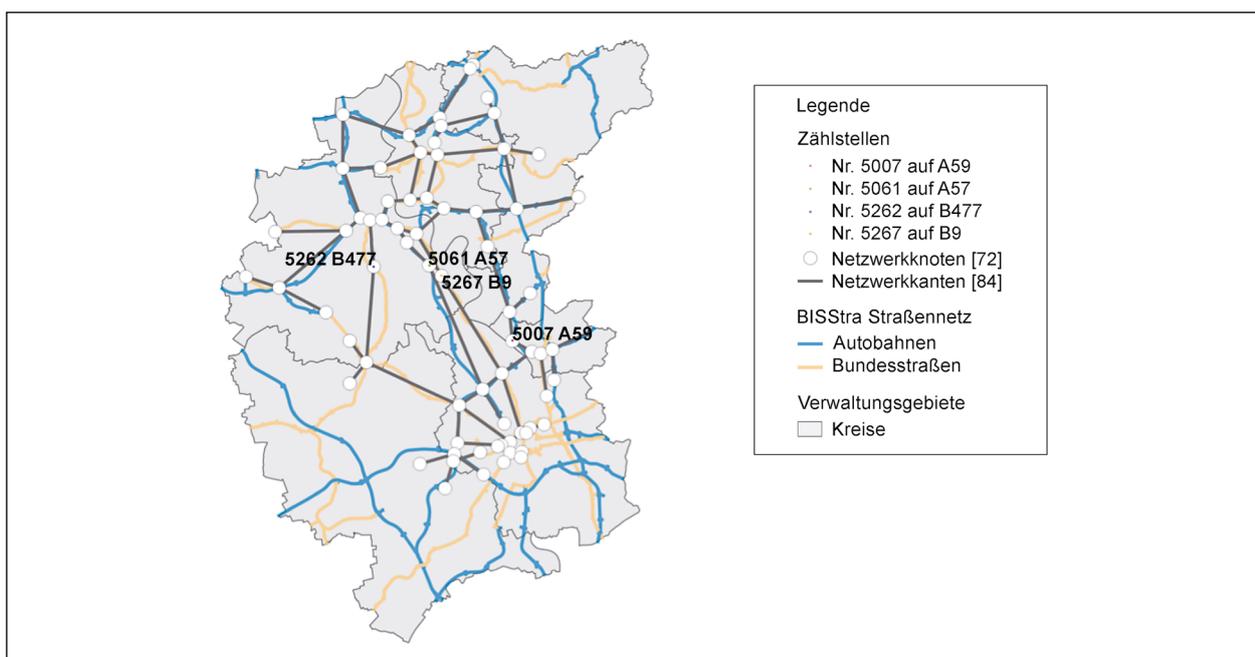


Bild 10.14: Netzwerkmodell der Autobahnen und Bundesstraßen um die DB-Brücke »Nievenheim« bei Dormagen. Längster Weg ab Zählstelle 5061 beträgt 30 km (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2018)

ben. Das denkbar einfachste Netzwerkmodell basiert auf einer rein topologischen Betrachtung und weist allen Kanten jeweils die Einheitslänge Eins zu.

Ausgehend von diesem einfachen Modell, ergibt sich noch eine geringe Übereinstimmung der Vorhersagen des Modells bei dem simulierten Ausfall einer Kante mit den gemessenen Veränderungen

der Verkehrsstärke an den Zählstellen. Auf eine Darstellung dieser noch ungenauen Ergebnisse wird hier verzichtet und stattdessen werden direkt die Ergebnisse unter Verwendung des realistischeren Modells, welches die Länge der Kanten berücksichtigt, aufgeführt.

Das hier verwendete und abgebildete Netzwerkmodell unter Berücksichtigung der Kantenlänge zeigt

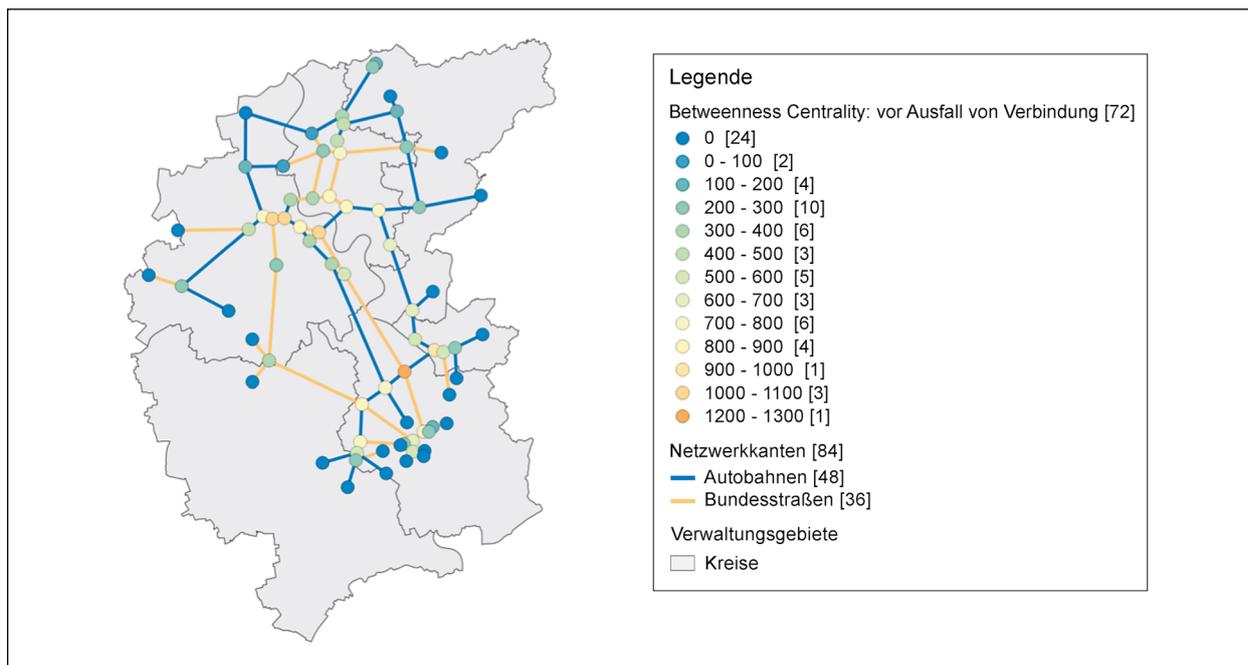


Bild 10.15: Zwischenzentralität (betweenness centrality) des ungestörten Netzes (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2018)

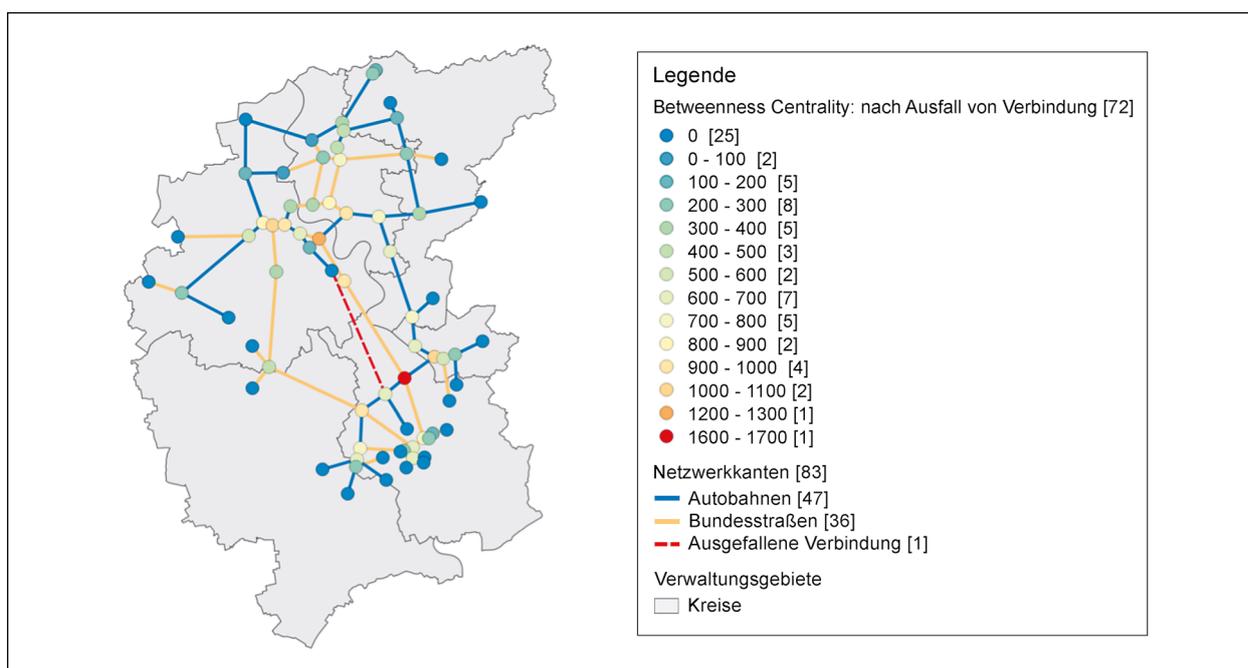


Bild 10.16: Zwischenzentralität (betweenness centrality) des gestörten Netzes (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2018)

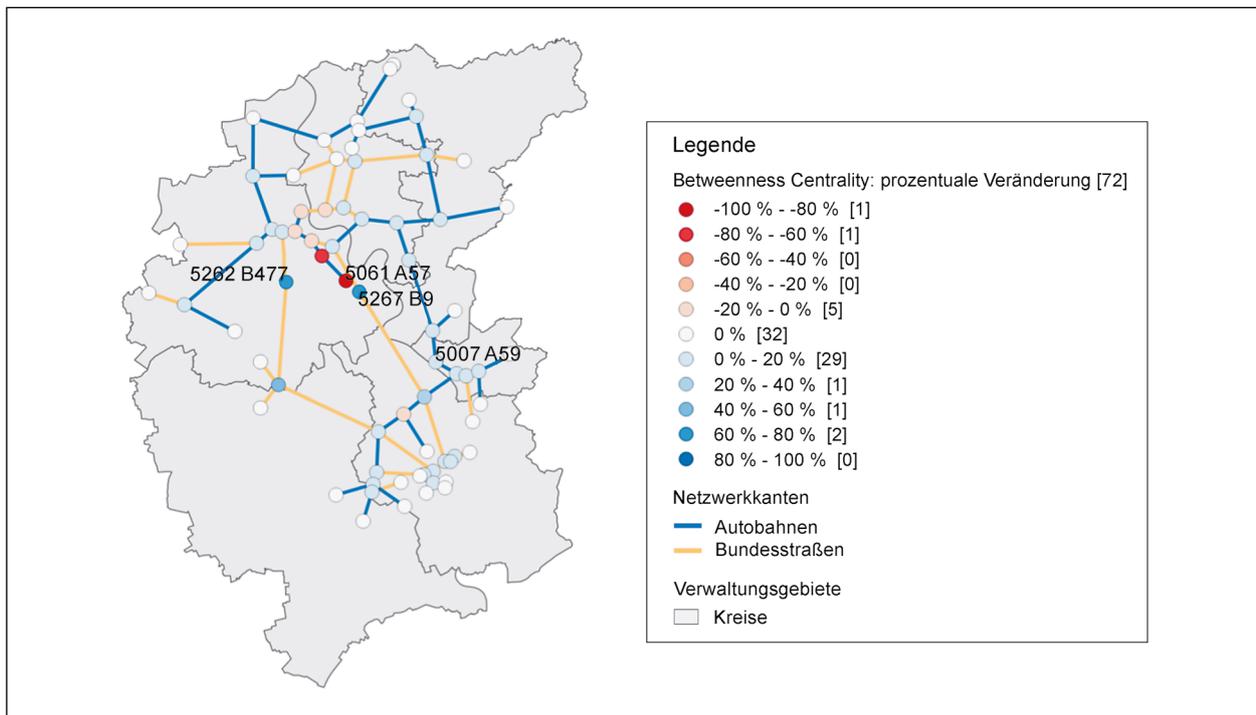


Bild 10.17: Prozentuale Veränderung der Werte für die Zwischenzentralität (betweenness centrality) bei Vergleich des ungestörten mit dem gestörten Netzzustand (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

| Zählstelle | Prozentuale Veränderung Betweenness Centrality | 07.02.2012 Stunde 9, R1 [Kfz/h] | 28.02.2012 Stunde 9, R1 [Kfz/h] | Prozentuale Veränderung Verkehrsstärke |
|------------|--|---------------------------------|---------------------------------|--|
| 5061 A 57 | -100 % | 3.335 (Schätzwert) | 2.420 (Schätzwert) | -27 % |
| 5262 B 477 | 79 % | 337 | 704 | 109 % |
| 5267 B 9 | 62 % | 322 | 545 | 69 % |
| 5007 A 59 | 7 % | 2.644 | 3.161 | 16 % |

Tab. 10.1: Vergleich der prozentualen Veränderung der „betweenness centrality“ und der gemessenen Verkehrsstärke

eine größere Übereinstimmung mit den an den Zählstellen gemessenen Veränderungen. Wie im Kapitel 10.3.2 gezeigt, nimmt die Verkehrsstärke auf der betroffenen A 57 ab und auf den parallel verlaufenden Bundesstraßen B 477 und B 9 sowie auf der parallelen Autobahn A 59 zu. Für einen ersten Vergleich der prozentualen Veränderung der »betweenness centrality« und der prozentualen Veränderung der gemessenen Verkehrsstärke: siehe Tabelle 10.1. Zur Ermittlung der prozentualen Veränderung der Verkehrsstärke wurden zwei Daten herangezogen: 07.02.2017 (vor dem Ereignis) sowie 28.02.2012 (nach dem Ereignis).

Abschließend wird in diesem Kapitel eine weitere Auswertungsmöglichkeit auf der Basis des Flächenmaßes der Resilienzkurven – wie im Kapitel 6.2 ge-

zeigt – vorgestellt. Ausgangspunkt für die Illustration sind die Daten der Dauerschleife 5061 »AK Neuss-Süd (S)« auf der Autobahn A 57 zu den Kraftfahrzeugen in Richtung 1 und 2 zur Stunde 9 an Dienstagen, die Werktage sind. Um den Zusammenhang zu den darauffolgenden Abbildungen für den Leser besser herstellen zu können, wird als Referenz Bild 10.8 an dieser Stelle noch einmal als Bild 10.18 eingefügt.

Für die beiden Kurven bezüglich der beiden Richtungen aus Bild 10.18 wird eine Flächenberechnung durchgeführt. Zur Vergleichbarkeit der Einbußen nach dem Ereignis wird die Verkehrsstärke in Prozentwerten angegeben, wobei die Werte zum Messzeitpunkt vor dem Ereignis (120207: 7. Februar 2012) auf 100 Prozent gesetzt werden. Dieser

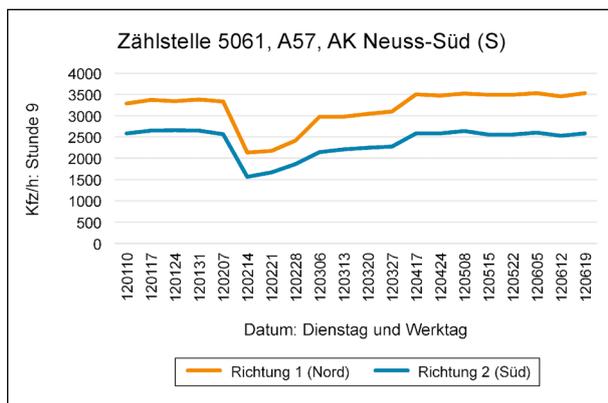


Bild 10.18: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der A 57 an der Zählstelle 5061 »AK Neuss-Süd (S)« an Dienstagen zur Stunde 9

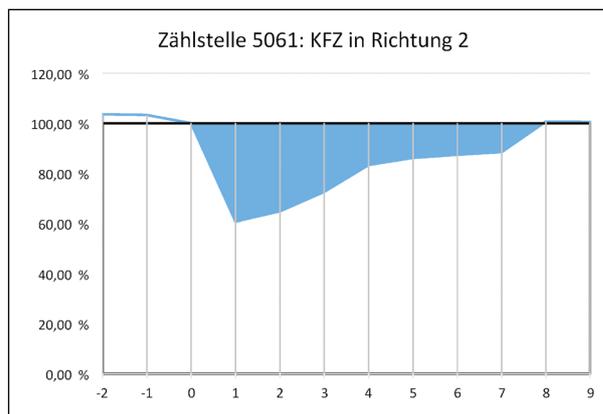


Bild 10.20: Flächenberechnung für Resilienzkurve: Kfz in Richtung 2 bei Dauerzählstelle 5061 → Flächenmaß: 1,56

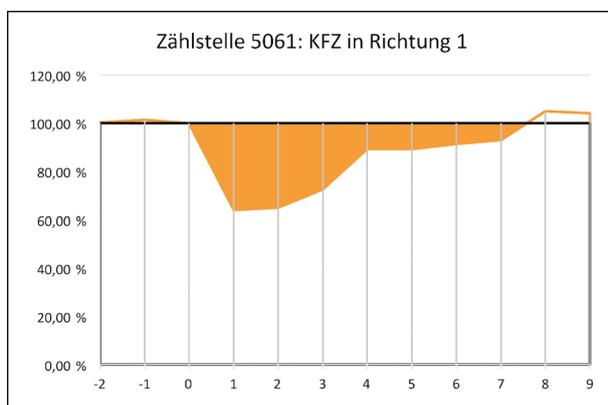


Bild 10.19: Flächenberechnung für Resilienzkurve: Kfz in Richtung 1 bei Dauerzählstelle 5061 → Flächenmaß: 1,34

Messzeitpunkt wird mit dem Index Null versehen. Die nachfolgenden Messzeitpunkte sind aufsteigend durchnummeriert. Die Bestimmung der Fläche unter der Kurve erfolgt unter Anwendung der Trapezregel, welche ein mathematisches Verfahren zur numerischen Annäherung eines Integrals beschreibt. Bild 10.19 und Bild 10.20 zeigen die Kurven für den Verlauf der Verkehrsstärke in Richtung 1 und in Richtung 2 sowie die Fläche unterhalb der 100-Prozent-Linie. Bei Normierung der Abstände zwischen den Messzeitpunkten auf Eins ergibt sich im gezeigten Beispiel ein Flächeninhalt von 1,34 für Richtung 1 und von 1,56 für Richtung 2. Über den Flächeninhalt wird zusätzlich die zeitliche Dimension berücksichtigt und macht entsprechende Vergleiche zwischen den beiden erfassten Richtungen möglich. Der tatsächliche Wert für einen bestimmten Flächeninhalt ist abhängig von der Skalierung der Werte auf der Zeitachse und somit weniger aussagekräftig als ein Vergleich der Flächeninhalte zweier Kurven. Die gesamte prozentuale Abwei-

chung für den Zeitraum der Beeinträchtigung des Verkehrs von den Messzeitpunkten 0 bis 8 ist für Richtung 2 somit größer als für Richtung 1, obwohl die Absolutwerte für die Verkehrsstärke in Richtung 2 geringer sind.

10.3.4 Szenario Hochwasser in Thüringen

Das in Kapitel 10.3.3 betrachtete Szenario zeichnet sich dadurch aus, dass die Sperrung der Autobahnbrücke zum Ausfall einer einzelnen Verbindung im Netzwerk führt. Um auch den Ausfall mehrerer Verbindungen zu untersuchen, wird in diesem Kapitel das Szenario Hochwasser in Thüringen betrachtet.

Trotz des Ausfalls einer einzelnen Verbindung sind im Beispiel der gesperrten Autobahnbrücke immer noch alle Knoten – wenn auch teilweise über Umwege – erreichbar. Das Netzwerk bleibt eine zusammenhängende Komponente. Durch den Ausfall mehrere Verbindungen kann ein Netzwerk in einzelne Komponenten zerfallen. Die Größe der größten zusammenhängenden Komponente ist ein Maß aus der Graphen- bzw. Netzwerktheorie. Beispielsweise verwenden THADAKAMAILA et al. dieses Maß zur Bestimmung der Robustheit eines Versorgungsnetzwerks (2004).

In Bild 10.21 ist die abstrakte Netzwerkrepräsentation des Straßennetzes von Thüringen dargestellt. Aus den öffentlich zugänglichen Hochwassergefahrenkarten wurden für ein Beispiel der Überflutung der Saale die betroffenen Gebiete extrahiert. Zur Illustration des Ausfalls mehrerer Verbindungen wurden die Netzwerkkanten, welche im Überflutungsgebiet liegen, entfernt. Eine anschließende Berechnung der im Netzwerk vorkommenden Kom-

ponenten zeigt den Zerfall des ursprünglichen Netzwerks in zwei Komponenten. Diese sind in Bild 10.21 durch unterschiedliche Farben (blau und grün) gekennzeichnet. Durch die Hinzunahme weiterer Überflutungsgebiete lässt sich darstellen, wie weitere Komponenten entstehen und die Größe der größten zusammenhängenden Komponente immer weiter abnimmt.

In der regionalen Betrachtung des Szenarios Hochwasser stellt die größte zusammenhängende Komponente ein zeitabhängiges Leistungskriterium im Sinn von Kapitel 6.2 dar und kann somit herangezogen

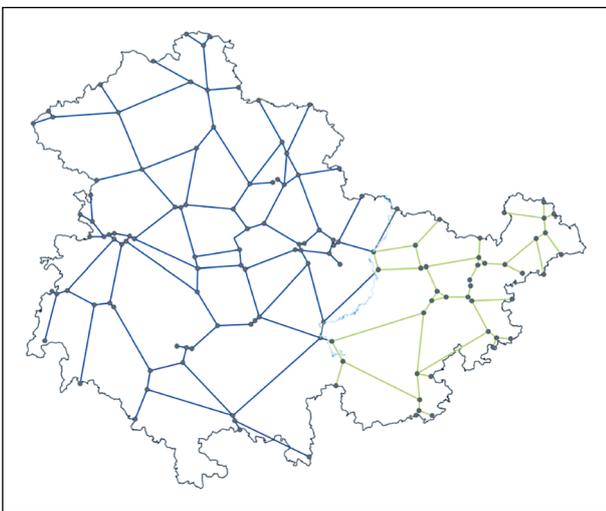


Bild 10.21: Netzwerkrepräsentation des Straßennetzes von Thüringen: Zerfall in einzelne Komponenten. Die zwei größten Komponenten sind durch unterschiedliche Einfärbung der Netzwerkkanten (Blau und Grün) hervorgehoben

werden, um ein Maß für Resilienz des betrachteten Netzwerkausschnitts abzuleiten.

Nachfolgend wird erläutert, wie sich die größte zusammenhängende Komponente verändert, wenn sukzessive Kanten aus dem Netzwerk entfernt werden. Ausgangspunkt ist wieder das abstrakte Netzwerk eines Straßennetzes beispielsweise von Thüringen. Zunächst besteht das betrachtete Netzwerk aus einer einzigen zusammenhängenden Komponente, die alle Kanten des Netzwerks umfasst. Somit ist von jedem beliebigen Knoten aus jeder andere Knoten über eine Folge von Kanten erreichbar. Im Folgenden werden zu Illustrationszwecken in einem synthetischen Beispiel in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten jeweils zufällig 20 Prozent der aktuell im Netz vorhandenen Kanten entfernt (siehe Bild 10.22 bis Bild 10.25). In der Legende sind die vorhandenen Komponenten aufgeführt, wobei die Anzahl der Kanten in der jeweiligen Komponente in eckigen Klammern dahinter aufgeführt sind. Zunächst besteht eine einzige und damit auch größte zusammenhängende Komponente mit 131 Kanten. Durch zufällige Entfernung von 20 Prozent der Kanten entstehen 4 Komponenten, wobei die größte aus noch 84 Kanten besteht. Nach Entfernung von weiteren 20 Prozent der Kanten ist das Netzwerk in neun Komponenten zerfallen, von denen die größte 60 Kanten aufweist. Nach abermaligem Entfernen von 20 Prozent der Kanten bestehen viele kleinere Komponenten mit maximal 14 Kanten. Damit verändert sich die Größe der größten zusammenhängenden Komponenten

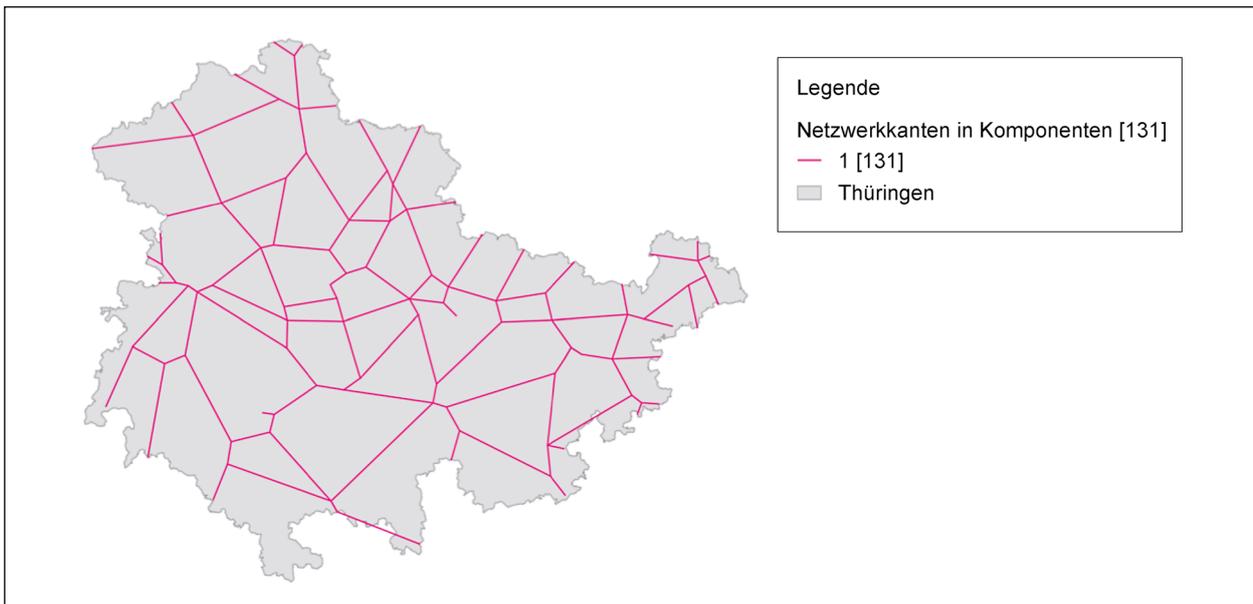


Bild 10.22: Netzwerkkanten in einer Komponente (Ausfall: 0 %), (Quelle: VG250 © GeoBasis-DE/BKG 2018)

te von 131 Kanten in der Ausgangssituation über 84 und 60 Kanten bis hin zu 14 Kanten. Die Entwicklung der größten zusammenhängenden Komponente über die einzelnen aufeinanderfolgenden Schritte der Entfernung von Kanten lässt sich als zeitabhängiges Leistungskriterium auffassen und entsprechend in einer Grafik darstellen.

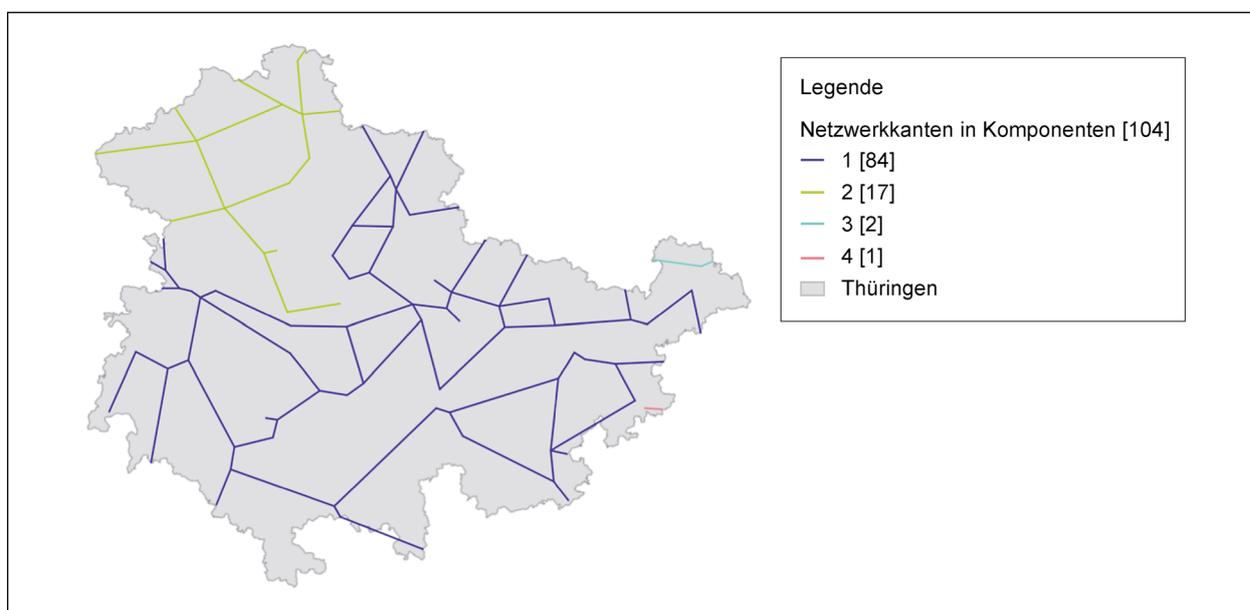


Bild 10.23: Netzwerkanten in vier Komponenten (Ausfall: 20 %), (Quelle: VG250 © GeoBasis-DE/BKG 2018)

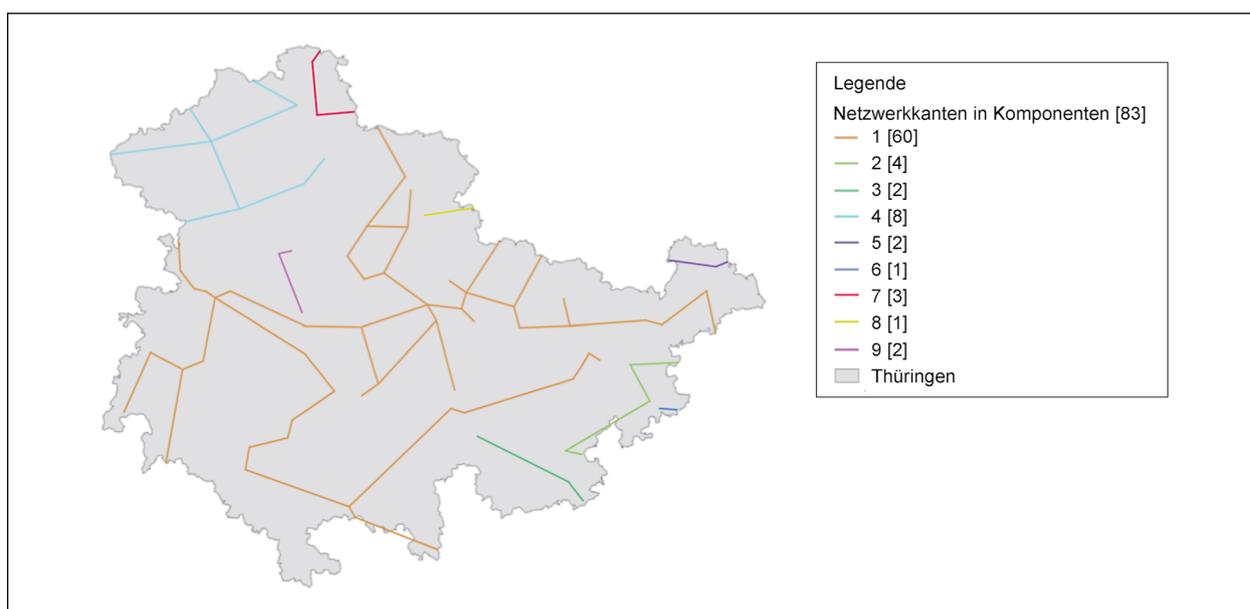


Bild 10.24: Netzwerkanten in neun Komponenten (Ausfall: 2 x 20 %), (Quelle: VG250 © GeoBasis-DE/BKG 2018)

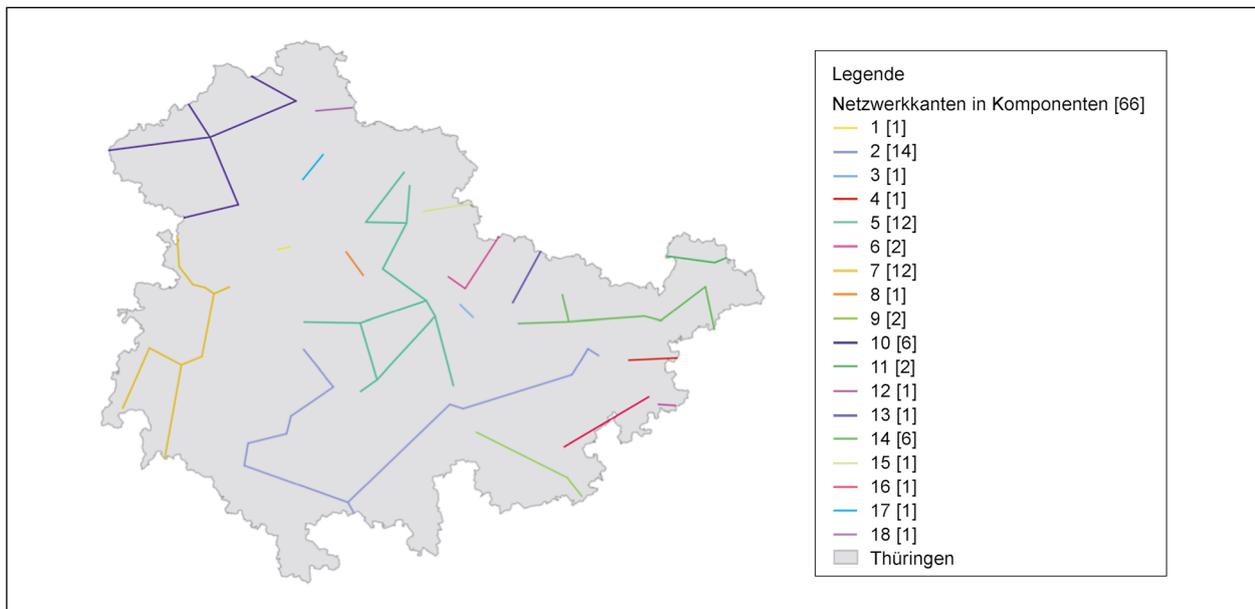


Bild 10.25: Netzwerkkanten in 18 Komponenten (Ausfall: 3 x 20 %) (Quelle: VG250 © GeoBasis-DE/BKG 2018)

10.4 Weiterentwicklung

In diesem Kapitel werden Weiterentwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt. Zunächst werden mögliche Erweiterungen der Eingangsdaten für die Netzwerkanalyse erörtert – zum einen hinsichtlich ihrer räumlichen Ausdehnung und Detailtiefe sowie zum anderen bezüglich zusätzlicher bisher nicht verwendeter Eingangsgrößen. Nachfolgend werden die Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) als ein Regelwerk zur Bestimmung der Bedeutung von Elementen eines Verkehrsnetzwerks thematisiert. Abschließend wird auf zusätzlich mögliche Daten zur Validierung der Ergebnisse eingegangen.

Der von der BAST für das Forschungsprojekt zur Verfügung gestellte BISStra-Testdatensatz beschränkt sich auf das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und auf Autobahnen und Bundesstraßen. Insbesondere in Grenzregionen kann für eine Analyse das Verkehrsnetz von angrenzenden Staaten eine entscheidende Rolle spielen. Beim Vorliegen entsprechender Daten stellt eine räumlich erweiterte Betrachtung kein Problem dar. Ebenso ist für eine Analyse mit höherer Detailtiefe die Hinzunahme weiterer Straßentypen zusätzlich zu den bereits verwendeten Autobahnen und Bundesstraßen denkbar.

Das vorgestellte Modell zur Netzwerkanalyse kann erweitert werden, um zusätzliche Eingangsgrößen mit aufnehmen zu können. Beispielsweise lässt sich die Unterscheidung zwischen Autobahnen und

Bundesstraßen durch Einführung eines zusätzlichen Faktors in der Berechnung der Distanzen zwischen zwei Kanten berücksichtigen. Damit fließen die zusätzlichen Faktoren in die Bestimmung der kürzesten Pfade ein, was sich wiederum auf Maße der Graphentheorie auswirkt, die sich in ihrer Berechnung auf kürzeste Pfade stützen, wie beispielsweise »betweenness centrality«.

Bezogen auf die Betrachtung der Erreichbarkeit von bestimmten Knoten beispielsweise bei dem Szenario Hochwasser könnten neben den Zuständen erreichbar bzw. nicht erreichbar weitere graduelle Abstufungen realisiert werden, um auch Teilerreichbarkeiten abzubilden.

Neben dem im Projekt gewählten Szenario Hochwasser können mit derselben Vorgehensweise bei Verfügbarkeit entsprechender Daten auch andere Expositionsanalysen beispielsweise für Hangrutschung oder Sturm durchgeführt werden. Voraussetzung hierfür ist lediglich das Vorliegen eines geeigneten GIS-Layers, der – analog zu den in den Hochwassergefahrenkarten ausgewiesenen Gebieten – eine Markierung entsprechender Bereiche aufweist, die sich mit den Straßennetzdaten verschneiden lassen, um diese auf eine mögliche Unterbrechung hin zu prüfen. Dementsprechend ist die Methodik nicht auf das Szenario Hochwasser festgelegt, sondern es können ebenso andere Szenarien – Stichwort szenariounabhängiger Ansatz – berücksichtigt und quantifiziert werden.

Bei der Netzwerkanalyse könnten weiterhin die Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) berücksichtigt werden (GERLACH 2009). Diese Richtlinien sind ein von der »Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen« herausgegebenes technisches Regelwerk mit dem Ziel, eine abgestimmte Verkehrsnetzentwicklung, basierend auf einem einheitlichen raumordnerischen Ansatz, zu erreichen. In der RIN sind sechs Verbindungsfunktionsstufen (VFS 0 bis VFS V: kontinental, großräumig, überregional, regional, nahräumig und kleinräumig) definiert, anhand der sich das Verkehrsnetz einteilen und sich entsprechend die Bedeutung von Verbindungen feststellen lässt. Diese Klassifizierung bietet eine zusätzliche Möglichkeit, ein Verkehrsnetz aus Knoten und Kanten zu gewichten und zu bewerten und diese Informationen in ein erweitertes Modell einfließen zu lassen.

Abschließend sei noch darauf verwiesen, dass neben den oben herangezogenen Daten der automatischen Dauerzählstellen zur Verkehrsstärke auch eine Verwendung von Floating-Car-Data für eine weitere empirische Absicherung der Ergebnisse denkbar wäre. Zusätzlich ließen sich bei der Betrachtung der Performanz eines Teils der Verkehrsinfrastruktur neben der Verkehrsstärke als quantitativer Größe auch – sofern vorhanden – Daten zur Qualität des Verkehrsflusses (fließend, stockend etc.) heranziehen.

11 Entwicklung/Weiterentwicklung von Verfahren und Modellen der Objektebene

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Charakterisierung der Resilienz auf Objektebene im Detail vorgestellt. Die Bewertung des Gesamttragverhaltens und den zu erwartenden Schaden bestimmt den Verlust der Gebrauchstauglichkeit und legt den Aufwand für Wiederherstellung fest, was rückwirkend eine Maßzahl für Resilienz liefert.

Neben der allgemeinen Vorgehensweise im Kapitel 11.1 wird der Ansatz für entsprechende Objekte auf die definierten Szenarien (Kapitel 7) angewandt. Im Vergleich zu dem Realereignis im Kapitel 11.2.1 wird der Nachweis der Validität geführt und Kapitel 11.2.2 präsentiert für verschiedene Versagensmechanismen und eine abweichende Bedrohungsort die Variabilität des Verfahrens. Mit dem Realereig-

nis wird das betrachtete Objekt weitestgehend detailgetreu nachgebildet. Das generische Beispiel orientiert sich an den statistischen Resultaten aus Kapitel 9.3 und verwendet somit ein generisches Objekt, das auf empirischen Häufigkeiten basiert. Die Resultate der Analyse bieten die Möglichkeit, einzelne Resilienzindikatoren, wie beispielsweise die Robustheit, zu bewerten.

11.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Quantifizierung der Resilienz auf Objektebene verwendet verschiedene Erkenntnisse und Verfahren, die im Rahmen der Literaturstudie (Kapitel 5.6) gesammelt wurden. In diesem Forschungsvorhaben sind einzelne Ansätze sondiert, eingeordnet und verknüpft mit dem Ziel, verschiedene Indikatoren der Resilienz eines Objekts der Verkehrsinfrastruktur zu charakterisieren. Eine komponentenweise Betrachtung dient der systematischen Identifizierung von Schwachstellen und liefert Beiträge zur Charakterisierung des Resilienzindikators Robustheit. Mit der Bewertung potenzieller Ausfälle in Kombination mit Angaben zur Wiederherstellungsdauer kann weiterhin der Indikator Schnelligkeit charakterisiert werden. Diese Informationen können weiterführend in die Bewertung auf Netzebene integriert werden, um Redundanzen zu schaffen und folglich eine erhöhte Resilienz im Straßennetz zu generieren.

Eine verallgemeinerte Übersicht des entwickelten Verfahrens auf Objektebene ist in Bild 11.1 dargestellt. Das Eintreten eines disruptiven Ereignisses kann eventuelle Schädigungen oder Ausfälle am Objekt hervorrufen, was der Verwundbarkeit zugeordnet wird. Der Grad der Schädigung hängt zum Teil von der Häufigkeit der Bedrohung (Wiederkehrwahrscheinlichkeit eines Gefahrenereignisses), der Intensität und der Exposition zum betrachteten Objekt ab.

Weiterhin bestimmen die Eigenschaften des Verkehrsinfrastrukturelements das Ausmaß der Verwundbarkeit. Im Bereich der Vorkommnis fließen die Resultate der statistischen Auswertung (Kapitel 9), wie beispielsweise die mittlere Spannweite eines Bauwerks, mit ein. Die Verkehrsbelastung stellt eine weitere berücksichtigte Eigenschaft und Schnittstellengröße zur Analyse auf Netzebene dar. Besitzt ein Bauwerk eine geringe Belastung, würde ein potenzieller Ausfall zu keinen weitreichenden Konsequenzen im Straßennetz führen.

In Abhängigkeit des zu erwartenden Schadens wird das Maß der Wiederherstellung festgelegt. Zusammenfassend ermöglicht das vorgestellte Modell, die Resilienz auf Objektebene über den Verlust eines Leistungskriteriums über die Zeit zu quantifizieren. Es wird das Auftreten eines disruptiven Ereignisses vorausgesetzt, um mit dieser Information Verlust einzelner Komponenten, die Auswirkung auf das Gesamtobjekt und eine erforderliche Wiederherstellung zu charakterisieren. Verwundbarkeit, Exposition zur Gefährdung und die Häufigkeit des Vorkommens können ebenfalls Beiträge zu risikobasierten Größen liefern.

Wird beispielsweise ein Brückenbauwerk betrachtet, kann dieses in einem vereinfachten Stabwerksmodell abstrahiert dargestellt werden. Der Abgleich mit empirischen Daten (ASB ING) liefert Informationen zur Vorkommnis und die Betrachtung auf Netzebene zur Verkehrsbelastung. Das Auftreten in Form eines beliebigen Gefährdungsszenarios charakterisiert durch Intensität und Exposition zum betrachteten Objekt den zu erwartenden Schaden und liefert Beiträge zur Verwundbarkeit. In Abhängigkeit des Schadens kann der erforderliche Aufwand für die Wiederherstellung abgeschätzt werden.

Bild 11.1 zeigt weiterhin in Grün einzelne Phasen des Resilienzzyklus und an welcher Stelle sie das erarbeitete Modell auf Objektebene ansprechen.

- Vorbereitung: Mit vorbereitenden Maßnahmen kann sich auf widrige Ereignisse eingestellt werden. Beispielsweise kann mit der Analyse historischer Ereignisse geprüft werden, welche Bedrohungen sich mit welcher Intensität ereignen können.
- Prävention: Das Verhindern oder die Prävention disruptiver Ereignisse verringert den zu erwartenden Schaden und verschiebt die Relation zwischen Ursache und Wirkung

- Schutz: Das Anbringen von Schutzmaßnahmen erhöht die Robustheit und verringert den zu erwartenden Schaden bei gleicher Bedrohungslage.
- Schnelles Reagieren/Wiederherstellung: Technische und organisatorische Aspekte können den zu erwartenden Wiederherstellungsprozess beschleunigen, sodass nach einem Schadenseintritt schnellstmöglich die ursprüngliche Funktionalität wiederhergestellt ist.

Nach der ganzheitlichen Darstellung des Modells auf Objektebene erfolgt im nächsten Schritt die Charakterisierung des Zusammenhangs von Bedrohung und Verwundbarkeit. Bild 11.2 zeigt eine verallgemeinerte Relation dieser beiden Modellkomponenten. Auf der Ordinate wird die betrachtete Bedrohung mit steigender Intensität aufgetragen. Das könnte beispielsweise die Bodenbeschleunigung infolge eines Erdbebens oder der Temperaturverlauf einer Brandbelastung darstellen. Zwei charakteristische Größen sind maßgebend für den Ver-

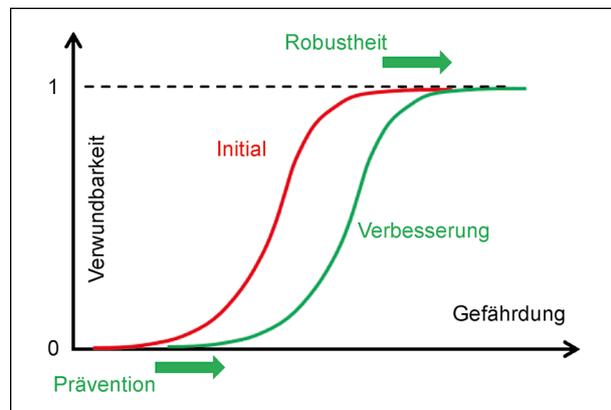


Bild 11.2: Verallgemeinerte Relation von Gefährdung und Schädigung zur Bewertung von Verkehrsinfrastruktur auf Objektebene. Die Berücksichtigung verschiedener Phasen der Resilienz verschiebt den funktionalen Verlauf (FISCHER 2018)

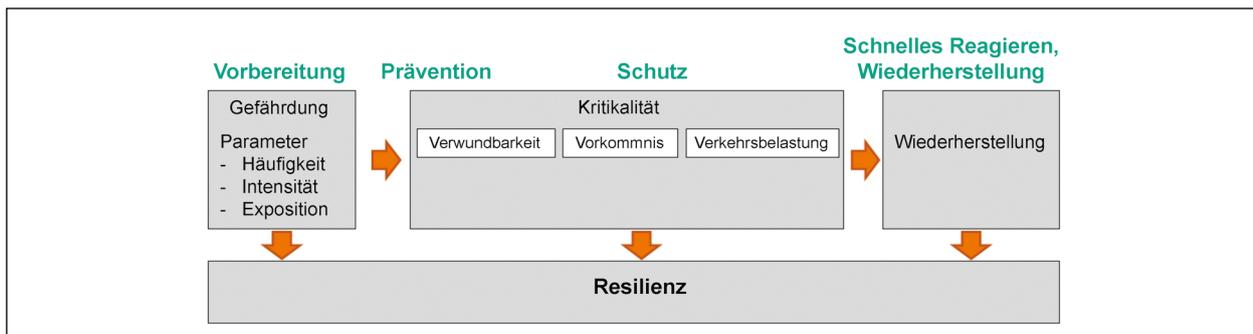


Bild 11.1: Einordnung von Teilkomponenten zur Bewertung von Resilienz auf Objektebene. In verschiedenen Bereichen können einzelne Phasen des Resilienzzyklus (Grün) direkt angesprochen werden

lauf des funktionalen Zusammenhangs: Ab einem kritischen Wert treten erste Schadenseffekte auf und ab einem maximalen Wert kommt es zum Totalversagen des betrachteten Systems.

Durch die Berücksichtigung von Resilienzsteigernden Maßnahmen kann der kritische oder der maximale Wert des Kurvenverlaufs in Bild 11.2 verschoben werden und somit die Effektivität der entsprechenden Maßnahme bemessen werden. Ein Beispiel kann mit Maßnahmen im Hochwasserschutz veranschaulicht werden. Das Anbringen eines Damms verhindert die Belastung durch Wasser am betrachteten Objekt und verschiebt den Punkt, an dem erste Schadenseffekte eintreten. Erhöhte Robustheit am Objekt würde den Punkt des Kollapses bei gleicher Bedrohungslage verschieben.

Die Resultate der Bedrohungs-Schadens-Relation liefern den Initialwert zur Charakterisierung einer Resilienzkurve, wie sie verallgemeinert im Kapitel 6.2 zur Einführung der Methodik dargestellt ist. Ein Leistungskriterium, beispielsweise die Nutzbarkeit eines Verkehrsinfrastrukturelements, wird als zeitabhängige Funktion $Q(t)$ dargestellt. Der Schadenseintritt zum Zeitpunkt t_0 verringert das Leistungskriterium. Erste Schritte nach einem Ereignis werden durch Klassifizierung der Schäden, Entscheidungen und Planungen dominiert. Ein optionaler Abriss kann den Funktionswert auf ein Minimum bringen. Der Neu- oder Wiederaufbau sorgt für einen Anstieg der Kurve. Nach der Vorstellung des erwarteten Verlaufs der Kurve in Bild 11.2 sei an dieser Stelle nochmals auf die gemessenen Zeitverläufe aus den Zählstellen in Kapitel 10.3.2 verwiesen. Dort zeigt die durch die Zählstellen gemessene Verkehrsstärke auf der betroffenen Autobahn A 57 einen derartigen zeitlichen Verlauf. Nach einem steilen Abfall ergibt sich ein langsamer Anstieg bis zur Wiedererreichung des Ausgangsniveaus.

In diesem Kapitel wurde verallgemeinert gezeigt, wie einzelne Aspekte der Resilienz für Objekte der Verkehrsinfrastruktur charakterisiert werden und wie sich einzelne Resilienzphasen in verschiedenen Bereichen des Modells wiederfinden. Die erzielten Resultate ermöglichen die Bewertung der Effizienz einzelner Schutzmaßnahmen. Beispielsweise kann über das Ableiten der relativen Reduktion des zu erwartenden Schadens geprüft werden, ob eine erhöhte Robustheit, die Prävention oder eine schnelle Wiederherstellung zu einem resilienteren System führt. Der Resilienzindikator Robustheit kann mit dieser Methodik direkt charakterisiert

werden. Ebenfalls können die Resultate in die Bewertung auf Netzebene integrierter werden, um weitere Indikatoren, wie beispielsweise Schnelligkeit oder Redundanz, zu bewerten.

Mit den Erkenntnissen der Literaturstudie werden Objekte hierarchisch in das System der Verkehrsinfrastruktur bis auf Komponentenebene eingegliedert. Statistische Werte geben Aufschluss zur Zusammensetzung einzelner Bauwerke, was beispielhaft für Brückenbauwerke in diesem Forschungsprojekt durchgeführt wurde. Anschließend wird für eine beliebige Bedrohungsart ein funktionaler Zusammenhang (Ist-Analyse) für Bedrohung und Schaden hergestellt. Dieses Resultat wird dann im nächsten Schritt angewandt um zeitabhängig ein Leistungskriterium zu bewerten. Über den zu erwartenden Verlust kann dann ein Maß für Resilienz abgeleitet werden. Um die praktische Anwendbarkeit der ausgeführten Methodik zu verdeutlichen, wird im folgenden Kapitel ein konkretes Anwendungsbeispiel betrachtet.

11.2 Anwendungsbeispiele

Im Gegensatz zur szenariounabhängigen Bewertung auf Netzebene erfolgt die Analyse auf Objektebene unter Berücksichtigung eines Gefährdungsszenarios. Eine grundlegende Komponente des Modells zur Bewertung von Resilienz auf Objektebene von Verkehrsinfrastruktur stellt die Generierung eines funktionalen Zusammenhangs von Gefährdung und Schaden dar. In diesem Kapitel werden zwei Beispiele vorgestellt. Das Szenario in Kapitel 11.2.1 bewertet ein Brückenbauwerk unter Brandlast und orientiert sich an einem Realereignis. Diese Bewertung soll den Nachweis führen, dass die angewandten Methoden auch reale Ereignisse hinreichend genau abbilden können.

Im zweiten Beispiel wird ein generisches Brückenbauwerk betrachtet. Bauwerksart und Abmessungen resultieren aus den häufigsten Vorkommnissen der statistischen Auswertung (Kapitel 9). Unter Annahme eines Starkregenereignisses und der daraus folgenden hydrologischen Belastung am Objekt sollen mit einer Unterspülung des Bauwerks und einem ungleichmäßigen Senken der Brückentruer sowie einer horizontalen Belastung durch Treibgut zwei mögliche Schadensmechanismen am Bauwerk untersucht werden. Ziel der beiden Beispiele ist die Demonstration der Anwendbarkeit vereinfachter Stabwerksmodelle, um eine Bewertung

der Sicherheit und Verfügbarkeit auf Objektebene vorzunehmen. Die Analyse charakterisiert den Ausfall einzelner Komponenten und deren Auswirkung auf das Gesamttragverhalten und liefert somit direkte Aussagen zur Robustheit eines Bauwerks. Diese Information kann weiterführend zur Bewertung weiterer Resilienzindikatoren bzw. -phasen eingesetzt werden.

11.2.1 Bewertung eines Realereignisses – Brücke Dormagen

Die generelle Anwendbarkeit der zuvor beschriebenen Methodik im Kapitel 11.1 wird im Folgenden anhand eines Realereignisses dargelegt. Analysiert wird der Brandschaden an der Brücke Dormagen

sowie der daraus resultierende Verlust der Tragfähigkeit.

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Betons treten Schädigungen infolge eines Brandfalls zunächst ausschließlich an der Betonoberfläche sowie in geringer Tiefe (wenige Zentimeter) auf. Abplatzungen des Betons induzieren jedoch einen weiteren Degradationsprozess, dessen zeitlicher Verlauf auch maßgeblich mit dem Maß der Betonüberdeckung korreliert. Liegt der Bewehrungsstahl infolge der Abplatzungen frei, werden die hohen Temperaturen, bedingt durch die Wärmeleitfähigkeit des Stahls, in Richtung des Betonkerns geleitet. Die unterschiedlichen Ausdehnungen von Beton und Stahl führen zu weiteren Abplatzungen und somit zu größeren Bereichen, in denen die Bewehrungs-

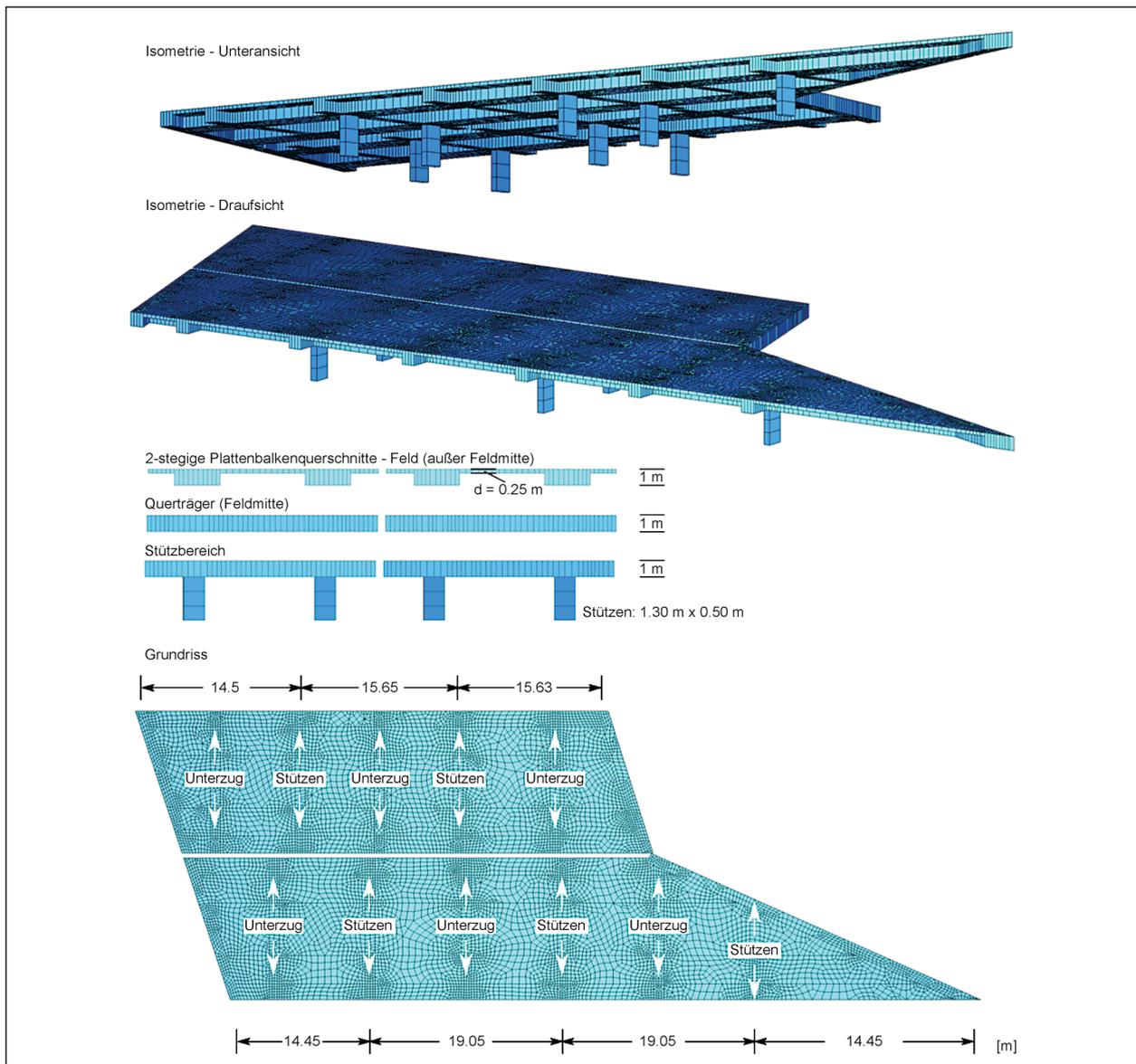


Bild 11.3: Brücke Dormagen – Ansichten, Bemaßung und Diskretisierung

rung vollständig freiliegt. Demzufolge wird sowohl die schlaffe Bewehrung als auch der eventuell vorhandene Spannstahl einer direkten Brandbelastung ausgesetzt. Bei hohen Temperaturen wird die Streckgrenze des Stahls signifikant reduziert. Während bei einer schlaffen Bewehrung die kritische Temperatur ca. 500 °C beträgt, bei der die Tragfähigkeit erschöpft ist, liegt der Grenzwert bei Spannstahl in etwa bei 350 °C (DIN 2004).

Das beschriebene Szenario kann auch anhand des Gutachtens zum Brandschaden an der Brücke Dormagen sowie anhand der darin enthaltenen Schadenskartierung des Überbaus nachvollzogen werden (Ingenieurbüro Domke Nachfolger 2012).

Ziel der Machbarkeitsstudie ist die Überprüfung, ob mit einem vereinfachten Stabwerksmodell ein Gesamtobjekt hinreichend genau abgebildet werden kann, um den Nachweis der Sicherheit hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit zu bewerten. Bild 11.3 zeigt das vereinfachte Modell des realen Bauwerks

in Dormagen. Der Bewehrungsgehalt sowie die Lage und der Verlauf der Bewehrung wurden abgeschätzt; eine Vorspannung in Längs- und Querrichtung wurde nicht berücksichtigt.

Neben dem Eigengewicht der Brücke und den Verkehrslasten wurden unterschiedliche Temperaturbelastungen aufgebracht, um den Brandfall und den daraus resultierenden Tragverlust zu verifizieren. Zudem wurde, um die Position des Brandherdes bzw. die in unmittelbarer Stützennähe gelagerten Rohre abzubilden, die über die Plattendicke angenommene Temperaturdifferenz ΔT_z lediglich in einem bestimmten Bereich des Tragwerks modelliert, siehe Bild 11.4. Die Verkehrslasten wurden feldweise aufgebracht und bilden zusammen mit dem Eigengewicht und der Temperaturbelastung mögliche Lastfallkombinationen.

Zusätzlich zur prognostizierten Spannungsverteilung (Bild 11.4) ist in Bild 11.5 der Ausnutzungsgrad in Abhängigkeit der vorgeschriebenen Temperatur

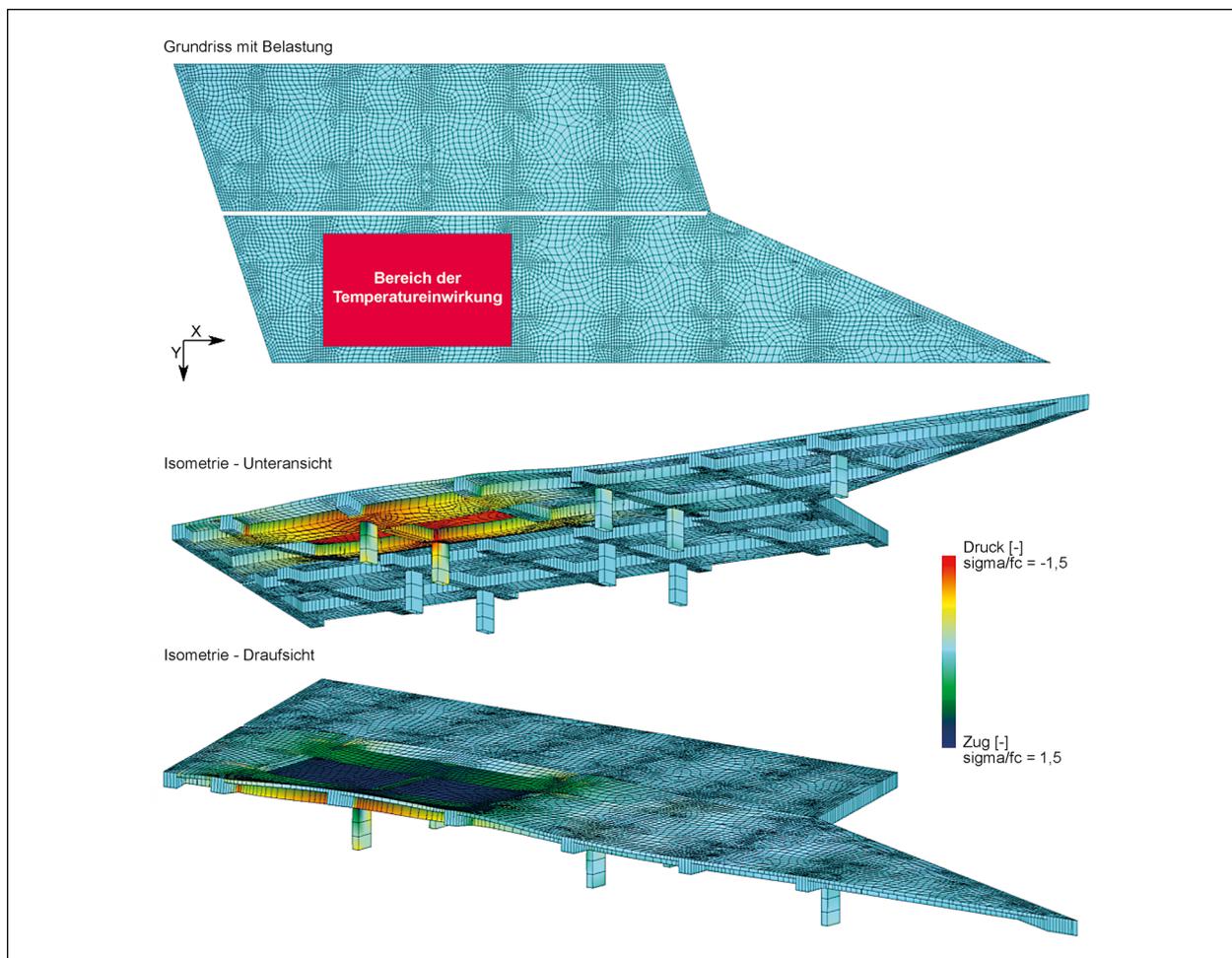


Bild 11.4: Brücke Dormagen – Temperatureinwirkung ΔT_z und resultierende Verformungsfigur (überhöhte Darstellung) mit Spannungsverteilung. Die farbliche Skalierung visualisiert den Ausnutzungsgrad

dargestellt. Letzterer, welcher im Rahmen einer linearen Berechnung ermittelt wurde, gibt lediglich Aufschluss darüber, ob zulässige Spannungen in lokalen Bereichen der Struktur bereits überschritten sind (Rissentwicklung) oder das Tragwerk vollständig intakt ist. Eine detaillierte, nichtlineare Analyse, welche Rückschlüsse über den tatsächlichen, globalen Tragverlust infolge des Brandfalls oder etwaiger Traglastreserven zulässt, wurde für die maßgebende temperaturabhängige Lastfallkombination aufgrund der erforderlichen Detailtreue nicht durchgeführt, da das Ziel eine schnelle und effiziente Abschätzung beinhaltet. Die Simulation liefert den Nachweis, dass die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks eingeschränkt ist und somit das Realereignis widerspiegelt. Somit wird der Zeitpunkt nach dem Ereignis wiedergegeben, was mit den Resultaten auf Netzebene mit einer Reduzierung der Verkehrsbelastung, anhand der Resultate der Zählstellen, übereinstimmt.

Um den Ausnutzungsgrades vor und nach dem Brandfall qualitativ vergleichen zu können, wurde zunächst eine Berechnung mit der maßgebenden Lastfallkombination aus Eigengewicht (g) und Verkehrslast (q) initiiert. Die prognostizierte Ausnutzung (lineare Berechnung) liegt in diesem Fall bei ~25 Prozent (grüne Linie in Bild 11.5). Zur Abschätzung des Einflusses einer Brandeinwirkung auf die rissinduzierenden Spannungen innerhalb der Plattenbrücke wurde im Anschluss eine Temperaturbelastung inkrementell aufgebracht (initial: 25 °C) und in jedem Schritt mit dem Eigengewicht und der Verkehrslast kombiniert. Während bei einer Temperaturdifferenz von 25 °C der Ausnutzungsgrad nur marginal höher ist als bei ausschließlicher Berücksichtigung von Eigengewicht und Verkehrslast, be-

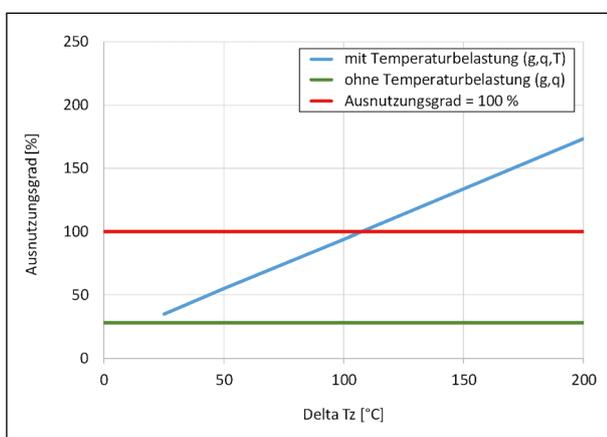


Bild 11.5: Prognostizierter Ausnutzungsgrad als Funktion der Temperaturbelastung ΔT_z infolge einer linearen Berechnung

trägt die Ausnutzung bei 50 °C bereits ~55 Prozent und bei 100 °C in etwa ~95 Prozent. Lokal überschritten werden die zulässigen Spannungen bei einer Temperaturdifferenz größer als ~110 °C.

Ziel der Analyse ist der Nachweis, dass mit einem vereinfachten Berechnungsmodell der Ausfall einzelner Komponenten und die daraus resultierende Nutzbarkeit des Bauwerks, unabhängig von der externen Belastung, abgeschätzt werden kann. In diesem Kapitel wurde ein reales Szenario zu Vergleichszwecken herangezogen. Die Genauigkeit hängt vom Detaillierungsgrad der vorliegenden Informationen ab. Für den vorliegenden Fall wurden teilweise Annahmen zu Bewehrungsgehalt und Bewehrungsführung vorgenommen, die das Gesamttragverhalten maßgebend beeinflussen. Mit detaillierten Angaben zum Bewehrungsgehalt und zur Bewehrungsführung sowie der Berücksichtigung einer Längs- und Quervorspannung könnten realitätsnähere Prognosen zum Tragverlust infolge einer Brandeinwirkung abgegeben werden. Neben der Verifizierung der Bauteilschädigung auf lokaler Ebene ist zur Beurteilung des globalen Versagens der Plattenbrücke zudem eine nichtlineare Analyse (Traglastiteration) durchzuführen. Aus bereits benannten Gründen wurden die Ergebnisse hier, basierend auf der linearen Theorie, ermittelt. Es ist anzunehmen, dass sich unter Berücksichtigung von nichtlinearen Effekten und Prüfung des Tragverlustes auf globaler Ebene der Grad der Ausnutzung gegenüber den hier ermittelten Werten reduziert und somit das Tragwerk auch bei Temperaturdifferenzen von mehr als 110 °C noch geringe Reserven aufweist. Um diesen Steigerungsfaktor zu bestimmen, sind, wie bereits zuvor erläutert, komplexere Modelle und detaillierte Angaben zum Brückenbauwerk erforderlich. Eine generelle Anwendbarkeit der in vorherigen Kapiteln aufgeführten Methoden konnte jedoch mit dem hier verwendeten simplifizierten Modell gezeigt werden. In Anlehnung an die allgemeine Darstellung von Gefährdung und Schädigung (Bild 11.2) wird in diesem Fall eine Beziehung zwischen Temperatureinwirkung und Einschränkung des Tragverhaltens hergestellt, die wiederum als Eingangsgröße zur Minderung der Gebrauchstauglichkeit im Leistungs-Zeit-Diagramm (Bild 6.2) herangezogen werden kann, um ein vereinfachtes Maß für Resilienz abzuleiten.

11.2.2 Generisches Brückenobjekt

In Anlehnung an die statistische Auswertung im Kapitel 9 wird als generisches Brückenobjekt eine Plattenbrücke (3-Feld-Brücke) mit einer Breite von 13 m (zweispurige Fahrbahn) und einer Länge von 50 m gewählt, siehe Bild 11.6. Neben dem Eigengewicht (g) und der Verkehrslast (q), welche in Analogie zur vorherigen Analyse feldweise aufgebracht werden, werden zwei weitere Lasten angesetzt, um folgende Fragestellungen beantworten zu können:

- 1) Welche Auswirkungen hat eine Stützensenkung auf die Tragfähigkeit des Brückenbauwerks?
- 2) Inwieweit kann eine aus einem Hochwasserereignis resultierende Degradation der Tragfähigkeit numerisch prognostiziert werden?

Basierend auf dem gewählten Ansatz zur Bewertung auf Objektebene, erfolgt eine komponentenweise Betrachtung des Bauwerks. Die Stütze der Brücke wurde als kritische Komponente identifiziert und daher wurde eine Stützensenkung als kritisches Ereignis betrachtet.

Beide Fälle werden hier unabhängig voneinander betrachtet. Die jeweiligen Lasten werden auch hier mit entsprechenden Beiwerten multipliziert und zu Lastfallkombinationen zusammengefasst.

Um den für beide Analysen maßgebenden Fall zu simulieren, werden sowohl bei Modellierung der Stützensenkung als auch bei Modellierung der Hochwasserbelastung die drei in Querrichtung angeordneten Stützen gleichzeitig belastet.

Die Spannungsverteilungen und Verformungsfiguren infolge Stützensenkung und Hochwasserbelastung sind in Bild 11.6 und 11.7 dargestellt.

Bild 11.7 zeigt das Verhalten des Objekts bei hydrostatischer Belastung, welche mit zunehmender Höhe abnimmt. Bedingt durch die feste Einspannung in der Gründung, resultiert das Bauwerk in diesem Bereich mit kleineren Verformungen trotz größerer Belastungen, im Gegensatz zu Bereichen unterhalb der Fahrbahn.

Um eine Relation zwischen Gefährdung und resultierendem Schaden herzustellen (Bild 11.2), wird in

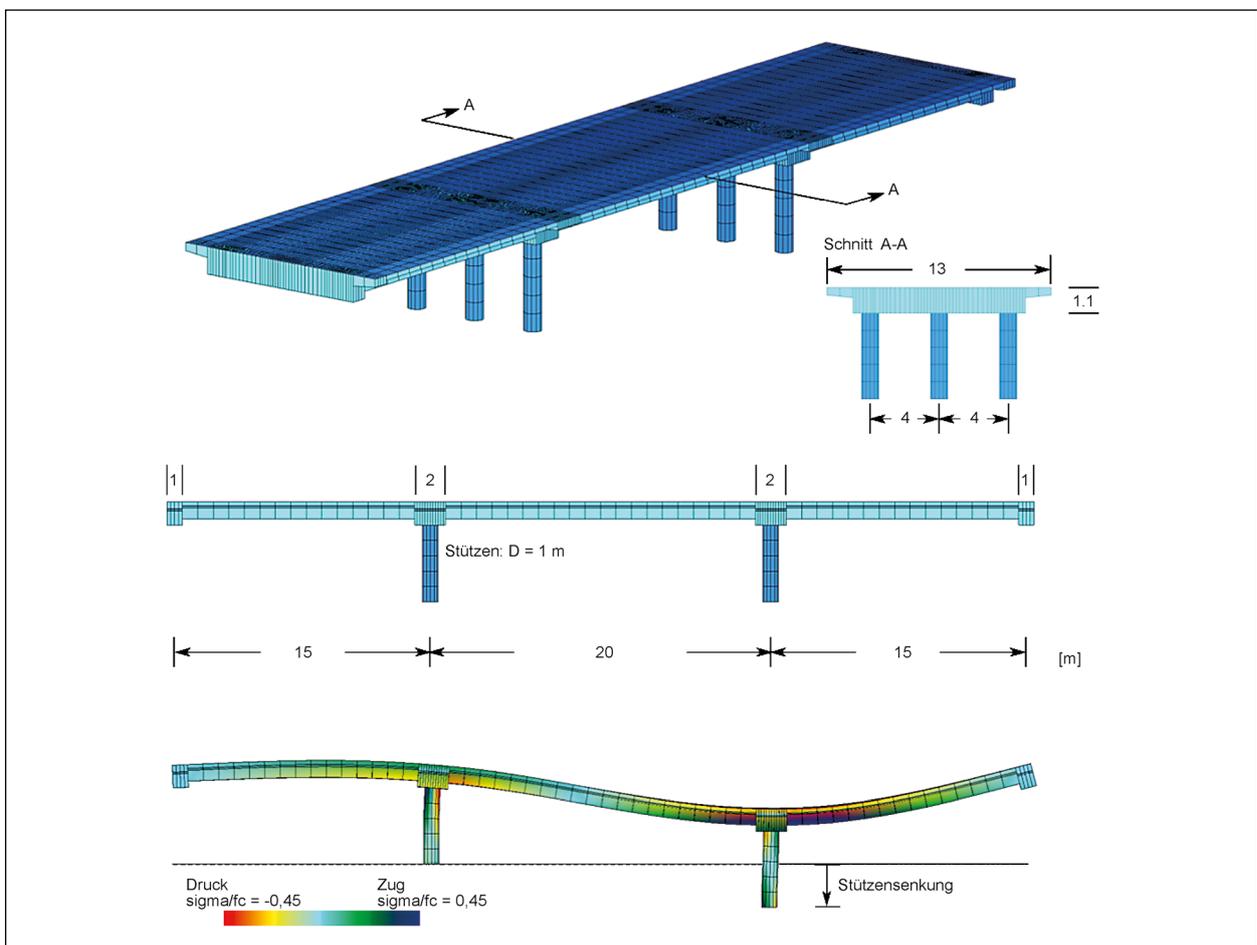


Bild 11.6: Brückenansichten, Bemaßung, Diskretisierung und Verformungsfigur infolge Stützensenkung (überhöhte Darstellung)

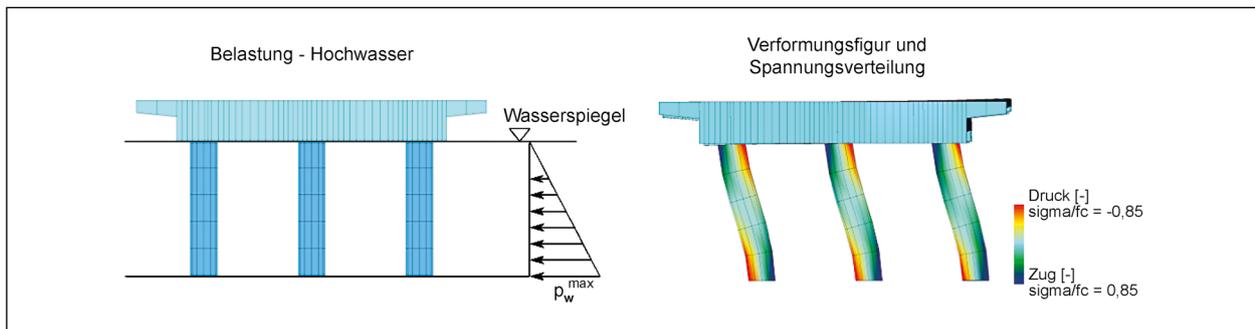


Bild 11.7: Brückenansichten, Bemaßung, Diskretisierung und Verformungsfigur infolge Hochwasserbeanspruchung (überhöhte Darstellung)

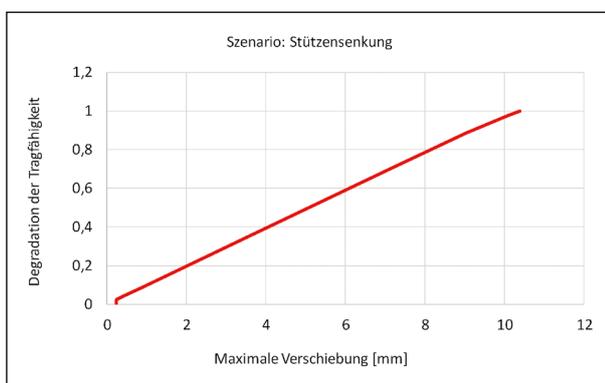


Bild 11.8: Degradation der Tragfähigkeit als Funktion der maximalen Verschiebung (vollständiger Tragverlust bei $DdT = 1$) – Stützensenkung

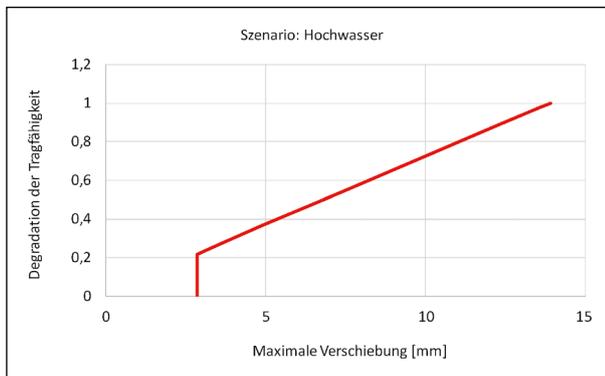


Bild 11.9: Degradation der Tragfähigkeit als Funktion der maximalen Verschiebung (vollständiger Tragverlust bei $DdT = 1$) – Hochwasserereignis

diesem Beispiel die maximale Verschiebung der Stützen herangezogen, um daraus die zu erwartende Minderung der Tragfähigkeit zu bestimmen. Für die Stützensenkung und Hochwasserbelastung ergeben sich folgende Graphen, die als Funktion $1-Q(t)$ zu lesen sind.

Bei dem der Analyse zugrundeliegenden, vereinfachten Berechnungsmodell ergibt sich, dass infolge einer Stützensenkung von $\sim 10,5$ mm ein voll-

ständiger Verlust der Tragfähigkeit eintritt. Beim Hochwasserereignis beträgt die maximale Verschiebung hingegen ~ 14 mm. Es zeigt sich, dass mit der gewählten Methodik für ein beliebiges Bedrohungsszenario eine Relation zwischen Gefährdung und zu erwartendem Schaden erstellt werden kann. Die numerische Prognose potenzieller Schäden, beispielsweise die Degradation der Tragfähigkeit, bildet somit die Grundlage zur Bewertung der Verfügbarkeit und Sicherheit auf Bauwerksebene.

12 Demonstrator

In diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen eines anwenderfreundlichen GIS-basierten Software-Prototyps beschrieben, der in dem Projekt entwickelt wurde. Dieser Prototyp wird dazu eingesetzt, die erarbeiteten Verfahren und Modelle an Anwendungsbeispielen zu demonstrieren.

Im Demonstrator können die Straßendaten sowie die dazugehörige abstrakten Netzwerkrepräsentation dargestellt werden. Neben der Darstellung der Knoten und Kanten lassen sich über Einfärbung der Knoten Maßzahlen, die für die Knoten berechnet wurden, visualisieren. Durch Angabe von entsprechenden Informationen in einer Legende können die Farbtöne Wertebereichen zugeordnet werden. Viele der in den vorangehenden Kapiteln aufgeführten Abbildungen mit Kartendarstellungen zeigen Ergebnisse des Demonstrators. Da die Anwendungsbeispiele oben schon vorgestellt wurden, liegt der Fokus dieses Kapitels auf den technischen Grundlagen des Demonstrators.

Der Software-Prototyp basiert auf Open-Source-Software für die Bereiche GIS und Netzwerkanalyse sowie auf vom Fraunhofer EMI entwickelten

Plug-ins. Zusätzlich zu der nachfolgenden Erläuterung, welche Open-Source-Software zum Einsatz kommt, werden im Kapitel 15 Installationshinweise gegeben.

Zum einen stellt QGIS in der Version 2.18 »Las Palmas« die zugrunde liegende Desktop-Anwendung (QGIS developers 2017). Zum anderen kommt GRASS GIS – kurz einfach GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) – in der Version 7.2 zum Einsatz (GRASS Development Team 2017; NETELER et al. 2012). Dabei wird GRASS GIS nicht als eigenständige Desktop-Anwendung betrieben, sondern ist in QGIS eingebunden. Die Funktionalität von GRASS GIS wird über eine »Processing Toolbox« zur Verfügung gestellt. Diese Kombination von QGIS und GRASS GIS wird standardmäßig installiert und ist unter Windows bei den Programmen folgendermaßen bezeichnet »QGIS Desktop 2.18.X with GRASS 7.2.X«.

Die GRASS GIS besteht aus vielen einzelnen Modulen, die zuerst nach Kategorie und zweitens nach Funktionalität geordnet sind (NETELER et al. 2012). Von besonderem Interesse ist hier das Modul »v.network«, dass in der Kategorie Vektordaten »v.*« grundlegende Funktionalität zur Netzwerkanalyse »network« bereitstellt.

Für eine erweiterte Funktionalität wurde eine Verbindung zu der Open-Source-Python-Bibliothek NetworkX hergestellt (NetworkX developers 2017). Dabei wurde der Mechanismus zur Einbindung über die »Processing Toolbox« verwendet, der auch bei GRASS GIS zum Einsatz kommt. Somit kann der Benutzer von der Desktop-Anwendung QGIS aus auf dieselbe Weise unterschiedliche Module zur Netzwerkanalyse, basierend auf GRASS GIS oder NetworkX, aufrufen. Ein Screenshot der »Processing Toolbox« von QGIS ist in Bild 12.1 dargestellt. Unter dem Punkt »Fraunhofer EMI Network Calculation Plug-in« sind verschiedene Geoalgorithmen zur Berechnung von Zentralitätsmaßen, die auf NetworkX beruhen, auswählbar. Für GRASS GIS ist ein Ausschnitt aus der Kategorie »Vector (v.*)« zu sehen.

Weiterhin wird unter dem Punkt »Fraunhofer EMI Network Conversion Plug-in« Funktionalität zur Konvertierung von Straßendaten, wie beispielsweise dem BISStra Testdatensatz, in ein Netzwerkmodell aus Knoten und Kanten zur Verfügung gestellt. Dieses Plug-in stützt sich auf Algorithmen aus GRASS GIS und NetworkX.

Zusammengefasst bietet der GIS-basierte Software-Prototyp die Möglichkeit, die entwickelten Modelle und Verfahren anhand von Anwendungsbeispielen aus den ausgewählten Szenarien (siehe Kapitel 10.3) zu demonstrieren.

Neben den bereits in den Kapiteln 8 und 10 in diesem Zusammenhang gezeigten Abbildungen wird an dieser Stelle noch auf weitere Untersuchungen der Bauwerksdaten eingegangen. Die im Kapitel 9 statistisch ausgewerteten Bauwerksdaten, die als Tabelle vorliegen, lassen sich auch in das verwendete GIS-System importieren, da die entsprechenden Geokoordinaten in der Tabelle angegeben sind. Die Spalten der Tabelle repräsentieren unterschiedliche Attribute der Bauwerke und lassen sich in verschiedenen Layern visualisieren wie beispielsweise:

- Substanzkennzahl,
- Zustandsnotenklasse,
- Altersklasse,
- Längenklasse,
- Baustoffklasse,
- etc.

Dabei können die Klassenzugehörigkeit oder andere Wertebereiche, farblich abgestuft, dargestellt werden.

Die Zusammenführung verschiedener Attribute und Eingrenzung auf bestimmte Wertebereiche können über das Setzen von Filtern realisiert werden. Dadurch ist eine explorative Analyse des Datenbe-

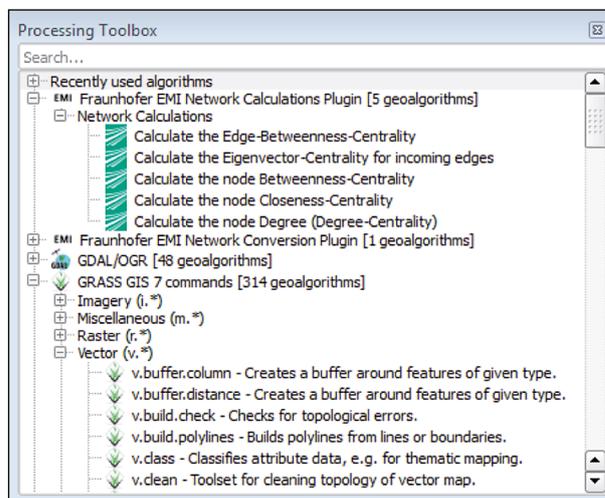


Bild 12.1: Processing Toolbox von QGIS mit Geoalgorithmen von GRASS GIS und Fraunhofer EMI Plug-in

standes durch sukzessive Einschränkung möglich, wie das nachfolgende Beispiel zeigt. Alle Autobahnbrücken aus Spannbeton mit einer Länge ab 100 Metern, die vor 1970 gebaut wurden und mit einer Substanzkennzahl von 3.0 oder höher bewertet wurden, lassen sich durch folgende Filter, die mit logischem UND verknüpft werden, aus dem Datensatz extrahieren:

- „zugeordneter_sachverhalt“ LIKE ‚A %‘ AND,
- „baustoffklasse“ LIKE ‚Spannbeton‘ AND,
- „laenge“ > = 100 AND,
- „baujahr“ < 1970 AND,
- „substanzkennzahl“ > = 3.0.

Damit verbleiben aus den insgesamt 51.564 Einträgen in der Datentabelle 59 Fälle übrig, die sich georeferenziert auf einer Karte anzeigen lassen.

Einfache statistische Auswertungen numerischer Attribute sind ebenfalls in dem verwendeten GIS-System möglich. Beispielsweise lassen sich Minimum und Maximum sowie Standardabweichung und andere statistische Größen durch Aufruf des Menüpunkts »Vector -> Analysis Tools -> Basic statistics« berechnen und anzeigen, wie hier für das Feld »laenge« aufgeführt.

- Count: 51564, Unique values: 8322,
- Minimum value: 2.0, Maximum value: 1800.0, Range: 1798.0,

- Sum: 2131877.38,
- Mean value: 41.3442979598, Median value: 16.29,
- Standard deviation: 84.0760029159,
- Minority (rarest occurring value): 2.02,
- Majority (most frequently occurring value): 8.0,
- etc.

Die Bauwerksdaten lassen sich weiterhin mit anderen Daten verknüpfen, um Fragestellungen zu beantworten, wie die Anzahl von Brückenbauwerken mit bestimmten Attributen auf definierten Streckenabschnitten. Bild 12.2 verdeutlicht das für das Bundesland Thüringen und die dort vorkommenden Autobahnen und Bundesstraßen. Hierbei wird die Anzahl der Brückenteilbauwerke pro definierter Straße (A 4, A 71, ..., B 2, B 80, ...) und pro Längeneinheit durch eine Einfärbung der jeweiligen Straßen gemäß Spektralfarben (Blau = niedrigster Wert, Türkis, Grün, Gelb, Orange, Rot = höchster Wert) wiedergegeben. Die Auswertung lässt sich durch das Filtern der Bauwerke nach bestimmten Attributen – wie oben gezeigt – noch weiter verfeinern.

Grundsätzlich sind die im GIS-basierten Software-Prototypen umgesetzten und an Beispielszenarien demonstrierten Verfahren auf andere Netze übertragbar. Das gilt sowohl für größere räumliche Ausdehnungen wie zum Beispiel auf Bundesebene als auch – bei Verfügbarkeit entsprechender Daten –

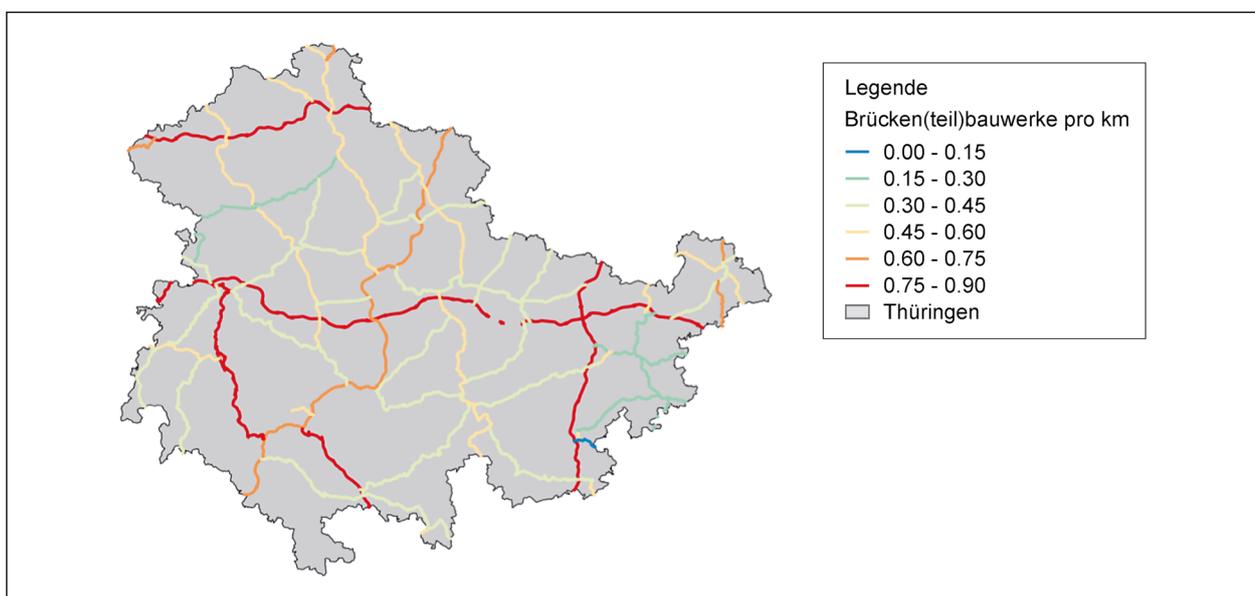


Bild 12.2: Brücken-(teil-)bauwerke pro Straße pro Längeneinheit, (© GeoBasisDE/BKG <2018>)

für anderen Netztypen wie beispielsweise das Schienennetz.

Die im Kapitel 10.3 gezeigten Anwendungsbeispiele, die mittelst des GIS-basierten Software-Prototypen realisiert wurden, bilden den Ausfall von Elementen der Verkehrsinfrastruktur durch das Entfernen von Elementen der Netzwerkrepräsentation (z. B. Netzwerkkanten) ab. Die vergleichende Betrachtung der realen Daten, die von den Dauerzählstellen erhoben wurden, schließt die Phasen vom Ausfall bis zur Wiederinbetriebnahme mit ein. Eine wiederhergestellte Verbindung lässt sich im Netzwerkmodell ebenfalls durch das Wiedereinfügen von Elementen der Netzwerkrepräsentation abbilden, um somit eine Berücksichtigung dieser Phase realisieren. Ebenfalls berücksichtigt werden können neu geschaffene Verbindungen an Stellen, an denen vorher keine existierten. Die grundsätzliche Machbarkeit wurde im Rahmen des Projekts demonstriert. Als mögliche Weiterentwicklung ist die Aufnahme von Teilverfügbarkeiten in das Modell zu sehen, um den zeitlichen Verlauf der Resilienzkurven noch besser abbilden zu können. Das ist durch die Zuweisung eines zusätzlichen Faktors, der den Grad der Verfügbarkeit der jeweiligen Kante im Netzwerk angibt, möglich. Mit diesem Ansatz lassen sich dann auch bestehende Maßnahmen zur Sicherstellung von Verfügbarkeit und Sicherheit (z. B. Zufahrtsbeschränkungen) in das Modell mit aufnehmen.

13 Zusammenfassung

Eine zuverlässig funktionierende Verkehrsinfrastruktur ist eine essentielle Voraussetzung für den freien Individualverkehr und den volkswirtschaftlich bedeutsamen Gütertransport. Die in diesem Bericht vorgestellte Machbarkeitsstudie fokussiert sich auf die Bewertung der Sicherheit und Verfügbarkeit von Verkehrsinfrastrukturen während extremer Ereignisse. Es werden die ersten Ergebnisse der Anwendung des Resilience Engineering-Ansatzes auf die Verkehrsinfrastruktur vorgestellt.

Ein zeitabhängiges Leistungskriterium, beispielsweise der Verkehrsfluss auf einer Straße, kann angewandt werden, um ein Maß für Resilienz abzuleiten. Das durch die Messung des Leistungsverlustes über die Zeit entstehende Flächenmaß wird in Relation zum betrachteten Zeitintervall gesetzt, sodass beispielsweise eine schnellere Erholung zu einem resilienteren System führt.

Basierend auf Erkenntnissen einer Literaturstudie, wurde eine differenzierte Bewertung von Netz- und Objektebene vorgenommen. Das Straßennetz wird abstrahiert als ein Knoten-Kanten-Modell abgebildet und die Verteilung des Verkehrsflusses bei Unterbrechung des Netzes wird analysiert. Auf Objektebene wird ein einzelnes Bauwerk als vereinfachtes statisches Ersatzmodell abgebildet und der Ausfall einzelner Komponenten und deren Einfluss auf das Gesamttragverhalten wird analysiert. Basierend auf der hergestellten Relation zwischen Bedrohung, Gefährdung und Schaden, beispielsweise eine ungleichmäßige Stützensenkung als Resultat eines Extremwetterereignisses, wird die Minderung der Gebrauchstauglichkeit als Eingangsgröße zur Charakterisierung von Resilienz verwendet. In dieser Studie wurde sich aufgrund des vorhandenen Datenbestands auf Brückenbauwerke fokussiert.

Spezielles Augenmerk bei sowohl der Netz- als auch der Objektebene liegt auf einer plausiblen Vereinfachung der verwendeten Modelle, die zur Berechnung der Performanzparameter und Resilienzindikatoren herangezogen werden. Diese Vereinfachungen sollen es ermöglichen, die große Anzahl an Elementen im Bundesfernstraßennetz zeiteffizient zu bewerten. Das spielt insbesondere bei einer Betrachtung des gesamten Bundesfernstraßennetzes eine Rolle. Weiterhin ermöglichen die Vereinfachungen, Netzwerkanalysen in dem GIS-basierten Demonstrator interaktiv durchzuführen wie beispielsweise für das Szenario Brand unter der Autobahnbrücke bei Dormagen-Nievenheim. Dazu werden die Modelle auch besonders dahingehend aufgebaut, dass die erforderlichen Eingangsparameter auch vollständig zur Verfügung stehen bzw. ebenso effizient ermittelt werden können.

Diese entwickelte Methodik ermöglicht eine Bewertung beliebiger Gefährdungsszenarien. Im Rahmen dieses Projekts werden exemplarisch zwei Szenarien betrachtet, um die Vorgehensweise zu demonstrieren. Im Vergleich zu einem Realereignis wurde der Nachweis der Validität geführt. Das zweite Beispiel untersucht die Belastung eines Brückenbauwerks unter Hochwasserbelastung.

Generell eignet sich diese Methodik zur Charakterisierung der Resilienz von Straßeninfrastruktur bei Betrachtung eines beliebigen Gefährdungsszenarios. Verschiedene Phasen des Resilienzyklus können vereinfacht charakterisiert und hinsichtlich ihrer Effizienz bewertet werden, wie beispielsweise der Vergleich von Schutz oder Wiederherstellung.

Zur Analyse auf Objektebene wurden zwei Ansätze zur Bewertung von Resilienz herangezogen. Die Auswertung empirischer Daten sollte Rückschlüsse geben, ob direkt einzelne Resilienzindikatoren in Abhängigkeit des Zustands, des Alters oder der Bauwerksart abgeleitet werden können. Die statistische Auswertung hat jedoch belegt, dass keine Korrelationen vorliegen und somit keine statistischen Prognosen direkt zur Analyse herangezogen werden können.

Der ausgewertete Datenbestand liefert allerdings Erkenntnisse über die Häufigkeit einzelner Attribute auf Objektebene. Wird beispielsweise eine bestimmte Bauwerksart mit bestimmten Abmessungen analysiert, kann im Abgleich mit dem Datenbestand die Häufigkeit der Vorkommnis festgelegt werden. Diese Information fließt mit in den zweiten Ansatz zur ingenieurmäßigen Bewertung auf Objektebene ein. Es wurde der Nachweis geführt, ob mit einem vereinfachten Stabwerksmodell ein Brückenbauwerk abgebildet werden kann und hinreichend genaue Prognosen zum Ausfall auf Objektebene geliefert werden können, um somit die Sicherheit hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit zu bewerten. Die numerische Prognose potenzieller Schäden, beispielsweise die Degradation der Tragfähigkeit, bildet somit die Grundlage zur Bewertung der Verfügbarkeit und Sicherheit auf Bauwerkebene.

Neben der allgemeinen Beschreibung der Methodik wurden zwei Anwendungsfälle betrachtet. Der Vergleich zu einem Realereignis hat gezeigt, dass die gewählte Methodik prognosefähige Resultate liefert und der zweite Fall bezieht sich auf ein generisches Objekt, bei dem sich Konstruktionsart und Abmessung am ausgewerteten Datenbestand orientieren. Die Resultate liefern einen direkten Beitrag zur Bewertung des Indikators Robustheit. Mit weiteren Angaben zur potenziellen Wiederherstellungsdauer können Beiträge zur Charakterisierung der Schnelligkeit geliefert werden. Weiterführende Betrachtungen auf Netzebene können die Redundanz und somit die Resilienz steigern.

Literatur

- ADGER, W. N. (2006): Vulnerability. In: *Global Environmental Change* 16 (3), S. 268 – 281. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006
- AXHAUSEN, K. W.; EHREKE, I.; GLEMSER, A.; HESS, S.; JÖDDEN, C.; NAGEL, K. et al. (2015): Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung. Schlussbericht. FE-Projekt-Nr. 96.996/2011
- BALL, R. E. (2007): *The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design*. 2. ed. Norwich, NY: Knovel (AIAA education series)
- BARABÁSI, A.-L.; PÓSFAL, M. (2016): *Network science*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press
- BELL, M. G. H.; IIDA, Y. (1997): *Transportation networks analysis*. Chichester [etc.]: J. Wiley & Sons
- BERDICA, K. (2002): An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. In: *Transport Policy* 9 (2), S. 117 – 127. DOI: 10.1016/S0967-070X(02)00011-2
- BRUNEAU, M.; CHANG, S. E.; EGUCHI, R. T.; LEE, G. C.; O'ROURKE, T. D.; REINHORN, A. M. et al. (2003): A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. In: *Earthquake Spectra* 19 (4), S. 733 – 752. DOI: 10.1193/1.1623497
- BRUNEAU, M.; REINHORN, A. (2007): Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities. In: *Earthquake Spectra* 23 (1), S. 41 – 62. DOI: 10.1193/1.2431396
- Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) (2017a): Bundesamt für Kartografie und Geodäsie. Website. Online verfügbar unter www.bkg.bund.de, zuletzt geprüft am 10.07.2017
- Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) (2017b): Dienstleistungszentrum des Bundes für Geoinformation und Geodäsie (DLZ). Website. Online verfügbar unter www.geodatenzentrum.de, zuletzt geprüft am 10.07.2017

- Bundesanstalt für Straßenwesen (2015): Bundesinformationssystem Straße (BISStra). Website. Online verfügbar unter www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-bisstra.html, zuletzt geprüft am 10.07.2017
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014): Sicherheitsstrategie für die Güterverkehrs- und Logistikwirtschaft. Schutz kritischer Infrastrukturen und verkehrsträgerübergreifende Gefahrenabwehr. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/sicherheitsstrategie.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 19.07.2016
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-kabinettsplan.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 04.12.2017
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (2013): ASB-ING. Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten. Teilsystem Bauwerksdaten. Online verfügbar unter <http://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Publikationen/Regelwerke/Erhaltung/ASB-ING.html>, zuletzt geprüft am 19.09.2017
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2015): Ermittlung des Einflusses der Infrastruktur auf die Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs für den Verkehrsträger Schiene. Forschungsvorhaben
- Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) (2010): Verkehrsinfrastruktur: Investitionen sichern, Effizienz verbessern, Wachstum stärken. Gemeinsame Erklärung
- Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) (2012): Damit Deutschland wirtschaftlich stark bleibt. In die Verkehrsinfrastruktur investieren, die Grundlage des Wachstums sichern. Gemeinsame Erklärung
- CARPENTER, S.; WALKER, B.; ANDERIES, J. M.; ABEL, N. (2001): From Metaphor to Measurement. Resilience of What to What? In: *Ecosystems* 4 (8), S. 765 – 781. DOI: 10.1007/s10021-001-0045-9
- CARRION, C.; LEVINSON, D. (2012): Value of travel time reliability. A review of current evidence. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (4), S. 720 – 741. DOI: 10.1016/j.tra.2012.01.003
- CASCHILI, S.; ROMANA, M., F.; REGGIANI, A. (2015): Guest editorial. Resilience of Networks. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 81, S. 1 – 3. DOI: 10.1016/j.tra.2015.07.010
- CATS, O.; JENELIUS, E. (2015): Planning for the unexpected. The value of reserve capacity for public transport network robustness. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 81, S. 47 – 61. DOI: 10.1016/j.tra.2015.02.013
- CHARTRAND, G.; ZHANG, P. (2012): *A first course in graph theory*. Mineola, N.Y.: Dover Publications (Dover books on mathematics)
- CHEN, A.; YANG, H.; LO, H. K.; TANG, W. H. (1999): A capacity related reliability for transportation networks. In: *J. Adv. Transp.* 33 (2), S. 183 – 200. DOI: 10.1002/atr.5670330207
- CHEN, A.; YANG, H.; LO, H. K.; TANG, W. H. (2002): Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 36 (3), S. 225 – 252. DOI: 10.1016/S0191-2615(00)00048-5
- Committee on Increasing National Resilience to Hazards and Disasters; Committee on Science, Engineering, and Public Policy; The National Academies (2012): *Disaster resilience. A national imperative*. Washington, DC: National Academies Press. Online verfügbar unter <http://nap.edu/13457>
- D'LIMA, M.; MEDDA, F. (2015): A new measure of resilience. An application to the London Underground. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 81, S. 35 – 46. DOI: 10.1016/j.tra.2015.05.017
- DA-RONG, H.; LI-BING, S.; LING, Z.; JUN, S. (2013): Review on Road Network Reliability and Trends in the Information Model. In: *25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 4885 – 4891
- DEMIREL, H.; KOMPIL, M.; NEMRY, F. (2015): A framework to analyze the vulnerability of

- European road networks due to Sea-Level Rise (SLR) and sea storm surges. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 81, S. 62 – 76. DOI: 10.1016/j.tra.2015.05.002
- DERRIBLE, S. (2012): Network centrality of metro systems. In: *PloS one* 7 (7), e40575. DOI: 10.1371/journal.pone.0040575
- D'ESTE, G. M.; TAYLOR, M. A. P. (2003): Network Vulnerability: An Approach to Reliability Analysis at the Level of National Strategic Transport Networks. In: M. I. G. H. BELL und Y. IIDA (Hrsg.): *The network reliability of transport. Proceedings of the 1st International symposium on transportation network reliability (INSTR)*. Oxford: Pergamon Press, S. 23 – 44
- Deutscher Bundestag (Hrsg.): Bundestag zieht Bilanz der Unwetter-Zerstörungen. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2016/kw23-aktuelle-stunde-unwetter/426746>, zuletzt geprüft am 21.07.2016
- DEVANANDHAM, H.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. (2012): Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. In: *Reliability Engineering & System Safety* 99, S. 114 – 122. DOI: 10.1016/j.ress.2011.09.002
- DIN (2004): DIN 4102-22: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 22: Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemessungsbasis von Teilsicherheitsbeiwerten
- DUAN, Y.; LU, F. (2014): Robustness of city road networks at different granularities. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 411, S. 21 – 34. DOI: 10.1016/j.physa.2014.05.073
- ECKERMANN, C. (2016): POL-HRO: Verkehrsbehinderungen nach Unwetter im Bereich Nordwestmecklenburg. Hrsg. v. news aktuell GmbH. Hamburg. Online verfügbar unter <http://www.presseportal.de/blaulicht/pm/108746/3361244>, zuletzt aktualisiert am 21.07.2016
- EDWARDS, C. (2009): *Resilient nation*. London: Demos
- European Commission (2011): *WHITE PAPER. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. efficient transport system*. European Commission. Brussels (COM(2011) 144 final). Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:EN:PDF>, zuletzt geprüft am 26.07.2016
- FATURECHI, R.; MILLER-HOOKS, E. (2014): Travel time resilience of roadway networks under disaster. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 70, S. 47 – 64. DOI: 10.1016/j.trb.2014.08.007
- FISCHER, K. (2018): *Resilience Quantification of Urban Areas, an Integrated Statistical-Empirical-Physical Approach for Man-Made and Natural Disruptive Events*. Ph.D. Thesis. University of Freiburg, Freiburg, Germany
- FISCHER, K.; HÄRING, I.; RIEDEL, W.; VOGELBACHER, G.; HIERMAIER, S. (2016): Susceptibility, vulnerability, and averaged risk analysis for resilience enhancement of urban areas. In: *International Journal of Protective Structures* 7 (1), S. 45 – 76. DOI: 10.1177/2041419615622727
- FITSCHEN, A.; NORDMANN, H. (2016a): *Download: V 278 Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014 Daten*. Carl Schünemann Verlag GmbH. Online verfügbar unter <http://www.schuenemann-verlag.de/fachverlag-nw/bast/download/download-verkehrsentwicklung-auf-bundesfernstrassen-2014-anhaenge.html>, zuletzt geprüft am 30.06.2017
- FITSCHEN, A.; NORDMANN, H. (2016b): *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014*. 1. Auflage. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Verkehrstechnik (V), 278)
- FREEMAN, L. C. (1978): Centrality in social networks conceptual clarification. In: *Social Networks* 1 (3), S. 215 – 239. DOI: 10.1016/0378-8733(78)90021-7
- GAMA DESSAVRE, D.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E.; BARKER, K. (2016): Multidimensional approach to complex system resilience analysis. In: *Reliability Engineering & System Safety* 149, S. 34 – 43. DOI: 10.1016/j.ress.2015.12.009
- GEISTEFELDT, J.; HOHMANN, S.; WU, N. (2014): Ermittlung des Zusammenhangs von Infrastruktur und Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs für

- den Verkehrsträger Straße. Schlussbericht. Forschungsauftrag FE 24.0019/2012. Ruhr Universität Bochum
- GERLACH, J. (2009): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung. RIN. Ausg. 2008. Köln: FGSV-Verlag (FGSV R 1, 121)
- GRASS Development Team (2017): GRASS GIS. Official Website. Online verfügbar unter <https://grass.osgeo.org/>, zuletzt geprüft am 18.08.2017
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. (2015): Introduction to operations research. Tenth edition. New York, NY: McGraw-Hill
- HOSSEINI, S.; BARKER, K.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. (2016): A review of definitions and measures of system resilience. In: Reliability Engineering & System Safety 145, S. 47 – 61. DOI: 10.1016/j.ress.2015.08.006
- Ingenieurbüro Domke Nachfolger (2012): Untersuchungsbericht PB 5662-1-12. Durchführung einer Bausubstanzprüfung an der Autobahnbrücke A 57 – Brandschaden
- IP, W. H.; WANG, D. (2011): Resilience and Friability of Transportation Networks. Evaluation, Analysis and Optimization. In: IEEE Systems Journal 5 (2), S. 189 – 198. DOI: 10.1109/JSYST.2010.2096670
- JANIĆ, M. (2015): Reprint of “Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event”. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 81, S. 77 – 92. DOI: 10.1016/j.tra.2015.07.012
- JENELIUS, E.; MATTSSON, L.-G. (2015): Road network vulnerability analysis. Conceptualization, implementation and application. In: Computers, Environment and Urban Systems 49, S. 136 – 147. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2014.02.003
- KAUFMANN, S.; BLUM, S. (2012): Governing (In) Security: The Rise of Resilience. In: H.-H. Gander; W. PERRON; R. POSCHER; G. RIESCHER; T. WÜRTENBERGER (Hrsg.): Resilienz in der offenen Gesellschaft. Symposium des Centre for Security and Society. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos (Sicherheit und Gesellschaft, Bd. 1), S. 235 – 257
- KAUNDINYA, I.; NISANCIOGLU, S.; KAMMERER, H.; OLIVA, R. (2016): All-hazard Guide for Transport Infrastructure. In: Transport Research Arena TRA2016 14, S. 1325 – 1334. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.205
- KERMANSHAH, A.; KARDUNI, A.; PEIRAVIAN, F.; DERRIBLE, S. (2014): Impact analysis of extreme events on flows in spatial networks. In: 2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). 2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Washington, DC, USA, 27.10.2014 – 30.10.2014: IEEE, S. 29 – 34
- KNOOP, V. L.; SNELDER, M.; van ZUYLEN, H. J.; HOOGENDOORN, S. P. (2012): Link-level vulnerability indicators for real-world networks. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 46 (5), S. 843 – 854. DOI: 10.1016/j.tra.2012.02.004
- KRAWINKLER, H.; MIRANDA, E. (2004): Performance-based earthquake engineering: CRC Press: Boca Raton, FL (9). In: Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering
- KRÖGER, W.; ZIO, E. (2011): Vulnerable systems. London, New York: Springer
- MATTSSON, L.-G.; JENELIUS, E. (2015): Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 81, S. 16 – 34. DOI: 10.1016/j.tra.2015.06.002
- MISHRA, S.; WELCH, T. F.; JHA, M. K. (2012): Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 46 (7), S. 1066 – 1085. DOI: 10.1016/j.tra.2012.04.006
- MURIEL-VILLEGAS, J. E.; ALVAREZ-URIBE, K. C.; PATIÑO-RODRÍGUEZ, C. E.; VILLEGAS, J. G. (2016): Analysis of transportation networks subject to natural hazards – Insights from a Colombian case. In: Reliability Engineering & System Safety 152, S. 151 – 165. DOI: 10.1016/j.ress.2016.03.006
- NAGEL, L.-M.; Pauly, M.; MUCHA, V.; SETZER, J.; WILHELM, F. (2016): Wettlauf gegen den Verfall. In: Die Welt, 12.07.2016. Online verfü-

- bar unter <http://www.welt.de/politik/interaktiv/bruecken/deutschlands-bruecken-wettlauf-gegen-den-verfall.html>, zuletzt geprüft am 12.12.2017
- NETELER, M.; BOWMAN, M. H.; LANDA, M.; METZ, M. (2012): GRASS GIS. A multi-purpose open source GIS. In: *Environmental Modelling & Software* 31, S. 124 – 130. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.11.014
- NetworkX developers (2017): NetworkX. Official Website. Online verfügbar unter <http://networkx.github.io/>, zuletzt geprüft am 18.08.2017
- NEWMAN, M. E. J. (2015): *Networks. An introduction*. Repr. with corr.; impress. 9. Oxford: Oxford University Press
- OLIVEIRA, E. de LEAL; PORTUGAL, da SILVA, L.; PORTO Jr. W. (2016): Indicators of reliability and vulnerability. Similarities and differences in ranking links of a complex road system. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 88, S. 195 – 208. DOI: 10.1016/j.tra.2016.04.004
- PAPATHOMA-KÖHLE, M.; KAPPES, M.; KEILER, M.; GLADE, T. (2011): Physical vulnerability assessment for alpine hazards. State of the art and future needs. In: *Nat Hazards* 58 (2), S. 645 – 680. DOI: 10.1007/s11069-010-9632-4
- QGIS developers (2017): QGIS. Official website. Online verfügbar unter <http://qgis.org/en/site/>, zuletzt geprüft am 18.08.2017
- REGGIANI, A. (2013): Network resilience for transport security. Some methodological considerations. In: *Transport Policy* 28, S. 63 – 68. DOI: 10.1016/j.tranpol.2012.09.007
- REGGIANI, A.; NIJKAMP, P.; LANZI, D. (2015): Transport resilience and vulnerability. The role of connectivity. In: *Transportation Research Part A* 81, S. 4 – 15
- SCHARTE, B.; THOMA, K. (2016): Resilienz – Ingenieurwissenschaftliche Perspektive. In: Rüdiger WINK (Hrsg.): *Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung*. 1. Aufl. 2016. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Studien zur Resilienzforschung), S. 123 – 150
- Significance; Goudappel Coffeng; NEA (2012): *Erfassung des Indikators Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung*. Schlussbericht. Projekt-Nr. 96.0973/2011
- SNELDER, M.; v. ZUYLEN, H. J.; IMMERS, L. H. (2012): A framework for robustness analysis of road networks for short term variations in supply. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (5), S. 828 – 842. DOI: 10.1016/j.tra.2012.02.007
- SOLTANI-SOBH, A.; HEASLIP, K.; STEVANOVIC, A.; KHOURY, J. E.; SONG, Z. (2016): Evaluation of transportation network reliability during unexpected events with multiple uncertainties. In: *International Journal of Disaster Risk Reduction* 17, S. 128 – 136. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2016.04.011
- SUWANSIRIKUL, C.; FRIESZ, T. L.; TOBIN, R. L. (1987): Equilibrium Decomposed Optimization. A Heuristic for the Continuous Equilibrium Network Design Problem. In: *Transportation Science* 21 (4), S. 254 – 263. DOI: 10.1287/trsc.21.4.254
- TAMVAKIS, P.; XENIDIS, Y. (2012): Resilience in Transportation Systems. In: *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 48, S. 3441 – 3450. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1308
- TAMVAKIS, P.S.; XENIDIS, Y. (2013): Comparative Evaluation of Resilience Quantification Methods for Infrastructure Systems. In: *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 74, S. 339 – 348. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.03.030
- TAYLOR, M. A. P.; SEKHAR, S. V. C.; D'ESTE, G. M. (2006): Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks. In: *Networks and Spatial Economics* 6 (3), S. 267 – 291. DOI: 10.1007/s11067-006-9284-9
- TAYLOR, M. A. P. (2012): Network vulnerability in large-scale transport networks. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (5), S. 743 – 745. DOI: 10.1016/j.tra.2012.02.001
- TAYLOR, M. A. P. (2013): Travel through time: the story of research on travel time reliability. In: *Transportmetrica B: Transport Dynamics* 1 (3), S. 174 – 194. DOI: 10.1080/21680566.2013.859107

THADAKAMAILA, H. P.; RAGHAVAN, U. N.; KUMARA, S.; ALBERT, R. (2004): Survivability of multiagent-based supply networks. A topological perspective. In: IEEE Intelligent Systems 19 (5), S. 24 – 31

THOMA, K. (Hrsg.) (2014): Resilien-Tech. "Resilience by Design": a strategy for the technology issues of the future. acatech STUDY. München: Herbert Utz Verlag

TREß, K. (2016): Verkehrschaos als Folge des Unwetters. Hrsg. v. Westdeutsche Zeitung GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <http://www.wz.de/lokales/rhein-kreis-neuss/neuss/verkehrschaos-als-folge-des-unwetters-1.2203850>, zuletzt aktualisiert am 21.07.2016

TRUDEAU, R. J. (2013): Introduction to graph theory. New York: Dover Publ (Dover books on advanced mathematics)

VDI Technologiezentrum GmbH: Verbundprojekt SKRIBT: Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen. Schlussbericht. Düsseldorf. Online verfügbar unter [http://134.147.230.146/skribt/download/AP5/Schutz %20kritischer %20Br %C3 %BCcken% 20und%20Tunnel %20- %20Schlussbericht.pdf](http://134.147.230.146/skribt/download/AP5/Schutz%20kritischer%20Br%C3%BCcken%20und%20Tunnel%20-%20Schlussbericht.pdf), zuletzt geprüft am 13.03.2017

ZHANG, X.; MILLER-HOOKS, E.; DENNY, K. (2015): Assessing the role of network topology in transportation network resilience. In: Journal of Transport Geography 46, S. 35 – 45. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2015.05.006

Bilder

Bild 5.1: Eingesetzte Methoden zur Analyse von Verkehrsnetzwerken nach MURIEL-VILLEGAS et al. (2016)

Bild 5.2: Veröffentlichungen zu Verbindungen zwischen Konzepten nach CASCHILI et al. (2015)

Bild 5.3: Hierarchische Gliederung von kritischer Infrastruktur (CI) von der Netzebene bis hin zur Objektebene und eine exemplarische Klassifizierung von Brückenbauwerken im gesamten System orientiert an KRÖGER und ZIO (2011)

Bild 6.1: Fünf Phasen des Resilienzyklus basierend auf THOMA (2014)

Bild 6.2: Verallgemeinertes Leistungs-Zeit Verhältnis als Grundlage zur Quantifizierung von Resilienz auf Objektebene in Anlehnung an FISCHER (2018)

Bild 7.1: Chronologische Zusammenfassung des Realereignisses und schematische Darstellung der Nutzbarkeit der Autobahn

Bild 8.1: Verwaltungsgebiete: Kreise

Bild 8.2: BISStra: Ausgangsdaten

Bild 8.3: BISStra: Autobahnen und Bundesstraßen

Bild 8.4: Straßennetz (Autobahnen und Bundesstraßen) von Nordrhein-Westfalen mit Einfärbung gemäß Gesamtanzahl der Fahrstreifen

Bild 8.5: Dauerzählstellen: Import der CSV-Datei

Bild 8.6: Lage der Dauerzählstellen

Bild 8.7: Klassifikation der Dauerzählstellen

Bild 8.8: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV-Kfz) auf Autobahnen

Bild 8.9: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV-Kfz) auf Bundesstraßen

Bild 8.10: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV-Kfz) auf Autobahnen und Bundesstraßen

Bild 8.11: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerververkehrs (DTV-SV) auf Autobahnen

Bild 8.12: Schwerververkehrsanteil (SV-Anteil) an der Verkehrsstärke

Bild 8.13: Lage und Zustandsnoten von Brückenbauwerken

Bild 8.14: Hochwassergefahrenkarte der »Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie« für die Verwaltungsgemeinschaft Gera-Aue

Bild 8.15: Wassertiefen HQ200 sowie maximale Ausdehnung bei HQ-Extrem als Import von Shape-Files in QGIS aus der Web-Anwendung der »Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie«

- Bild 9.1: Verteilung der 51 564 Brückenbauwerke nach Zustandsnote (links) und Substanzkennzahl (rechts)
- Bild 9.2: Verteilung der Brückenbauwerke nach Altersklasse
- Bild 9.3: Bedingte Verteilung der Zustandsnote (links) und der Substanzkennzahl (rechts) bei gegebener Altersklasse
- Bild 9.4: Bedingte Verteilung der Altersklasse bei gegebener Zustandsnote (links) und Substanzkennzahl (rechts)
- Bild 9.5: Verteilung von Brückenbauwerken nach verwendetem Baustoff (links) und der Bauwerksart (rechts)
- Bild 9.6: Bedingte Verteilung der Substanzkennzahl (links) und Zustandsnote (rechts) bei gegebenem Baustoff am Beispiel Stahl- und Spannbeton
- Bild 9.7: Bedingte Verteilung der Substanzkennzahl (links) und Zustandsnote (rechts) bei gegebener Bauwerksart
- Bild 9.8: Bedingte Verteilung des Baustoffes (links) und der Altersklasse bei gegebener Bauwerksart
- Bild 9.9: Verteilung der Brückenbauwerke auf Längensklassen (links) und die bedingte Verteilung der Längensklasse bei gegebener Bauwerksart (rechts)
- Bild 9.10: Empirisch kumulierte Verteilungsfunktion für geometrische Eigenschaften eines Brückenbauwerks in Deutschland
- Bild 10.1: BISStra-Autobahnen mit einstelliger Nummer (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)
- Bild 10.2: BISStra-Autobahnen: Netzwerkkanten (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)
- Bild 10.3: Netzwerkknoten: Grad (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)
- Bild 10.4: Netzwerkknoten: Nähe (Quelle: VG250-EW: © GeoBasis-DE/BKG 2017)
- Bild 10.5: Zwischenzentralität (betweenness centrality) (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2016)
- Bild 10.6: Zentralitätsmaße: Grad, Nähe und Zwischenzentralität (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2016)
- Bild 10.7: Gebiet um die DB-Brücke »Nievenheim« auf der A 57 bei Dormagen (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG)
- Bild 10.8: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der A 57 an der Zählstelle 5061 »AK Neuss-Süd (S)« an Dienstagen zur Stunde 9
- Bild 10.9: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der A 57 an der Zählstelle 5014 »AD Neuss (S)« jeweils am Mittwoch zur Stunde 9
- Bild 10.10: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der A 59 an der Zählstelle 5007 »Langenfeld« an Dienstagen zur Stunde 9
- Bild 10.11: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der B 477 an der Zählstelle 5262 »Gohr« an Dienstagen zur Stunde 9
- Bild 10.12: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der B 9 an der Zählstelle 5267 »Dormagen« an Dienstagen zur Stunde 9
- Bild 10.13: Verkehrsmenge an Dienstagen zur Stunde 17 an den vier Zählstellen 5007, 5061, 5262 und 5267
- Bild 10.14: Netzwerkmodell der Autobahnen und Bundesstraßen um die DB-Brücke »Nievenheim« bei Dormagen. Längster Weg ab Zählstelle 5061 beträgt 30 km (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2018)
- Bild 10.15: Zwischenzentralität (betweenness centrality) des ungestörten Netzes (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2018)
- Bild 10.16: Zwischenzentralität (betweenness centrality) des gestörten Netzes (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2018)
- Bild 10.17: Prozentuale Veränderung der Werte für die Zwischenzentralität (betweenness centrality) bei Vergleich des ungestörten mit dem gestörten Netzzustand (Quelle: © GeoBasis-DE/BKG 2017)

- Bild 10.18: Verkehrsmenge in Richtung 1 und 2 auf der A 57 an der Zählstelle 5061 »AK Neuss-Süd (S)« an Dienstagen zur Stunde 9
- Bild 10.19: Flächenberechnung für Resilienzkurve: Kfz in Richtung 1 bei Dauerzählstelle 5061 á Flächenmaß: 1,34
- Bild 10.20: Flächenberechnung für Resilienzkurve: Kfz in Richtung 2 bei Dauerzählstelle 5061 á Flächenmaß: 1,56
- Bild 10.21: Netzwerkepräsentation des Straßennetzes von Thüringen: Zerfall in einzelne Komponenten. Die zwei größten Komponenten sind durch unterschiedliche Einfärbung der Netzwerkkanten (Blau und Grün) hervorgehoben
- Bild 10.22: Netzwerkkanten in einer Komponente (Ausfall: 0 %) (Quelle: VG250 © Geobasis-DE/BKG 2018)
- Bild 10.23: Netzwerkkanten in vier Komponenten (Ausfall: 20 %) (Quelle: VG250 © Geobasis-DE/BKG 2018)
- Bild 10.24: Netzwerkkanten in neun Komponenten (Ausfall: 2 x 20 %) (Quelle: VG250 © Geobasis-DE/BKG 2018)
- Bild 10.25: Netzwerkkanten in 18 Komponenten (Ausfall: 3 x 20 %) (Quelle: VG250 © Geobasis-DE/BKG 2018)
- Bild 11.1: Einordnung von Teilkomponenten zur Bewertung von Resilienz auf Objektebene. In verschiedenen Bereichen können einzelne Phasen des Resilienzyklus (Grün) direkt angesprochen werden
- Bild 11.2: Verallgemeinerte Relation von Gefährdung und Schädigung zur Bewertung von Verkehrsinfrastruktur auf Objektebene. Die Berücksichtigung verschiedener Phasen der Resilienz verschiebt den funktionalen Verlauf (FISCHER 2018)
- Bild 11.3: Brücke Dormagen – Ansichten, Bemaßung und Diskretisierung
- Bild 11.4: Brücke Dormagen – Temperatureinwirkung ΔT_z und resultierende Verformungsfigur (überhöhte Darstellung) mit Spannungsverteilung. Die farbliche Skalierung visualisiert den Ausnutzungsgrad
- Bild 11.5: Prognostizierter Ausnutzungsgrad als Funktion der Temperaturbelastung ΔT_z infolge einer linearen Berechnung
- Bild 11.6: Brückenansichten, Bemaßung, Diskretisierung und Verformungsfigur infolge Stützensenkung (überhöhte Darstellung)
- Bild 11.7: Brückenansichten, Bemaßung, Diskretisierung und Verformungsfigur infolge Hochwasserbeanspruchung (überhöhte Darstellung)
- Bild 11.8: Degradation der Tragfähigkeit als Funktion der maximalen Verschiebung (vollständiger Tragverlust bei $DdT = 1$) – Stützensenkung
- Bild 11.9: Degradation der Tragfähigkeit als Funktion der maximalen Verschiebung vollständiger Tragverlust bei $DdT = 1$) – Hochwasserereignis
- Bild 12.1: Processing Toolbox von QGIS mit Gealgorithmen von GRASS GIS und Fraunhofer EMI Plug-in
- Bild 12.2: Brücken-(teil-)bauwerke pro Straße pro Längeneinheit

Tabellen

- Tab. 9.1: Kategorisierung von Brückenbauwerken nach statischem System, Konstruktionsweise und Material. Angabe der durchschnittlichen Spannweiten (VDI Technologiezentrum GmbH)
- Tab. 9.2: Beispielhafte Auswertung des Datenbestands über eine Kontingenztafel mit den Merkmalen »Zustandsnote« und »Baustoff«
- Tab. 9.3: Berechnete Kontingenzkoeffizienten zweier Merkmale eines Brückenbauwerks
- Tab. 10.1: Vergleich der prozentualen Veränderung der „betweenness centrality“ und der gemessenen Verkehrsstärke

Anhang

A Installation und Nutzung der Plug-ins für den GIS-basierten Software-Prototypen

A.1 Installation von QGIS 2.18 mit NetworkX

1. QGIS Setup herunterladen (Eigenständige QGIS-Installation Version 2.18 (64-bit); <https://www.qgis.org/de/site/forusers/download.html>), als Administrator ausführen und den Installationsprozess abschließen.
2. Für die NetworkX Installation folgendes Setup herunterladen: OSGeo4W-Netzwerkinstallation (64 bit); <https://www.qgis.org/de/site/forusers/download.html>
3. Beim Setup »Fortgeschrittene Installation auswählen« und folgende Anpassungen vornehmen:
 - a. Setup bis zum Setup-Prozess »Paket Wählen« (siehe Bild A.1) mit Standard-Werten durchführen
 - b. NetworkX in das Suchfeld bei »Paket Wählen« eingeben (wie in Bild A.1)

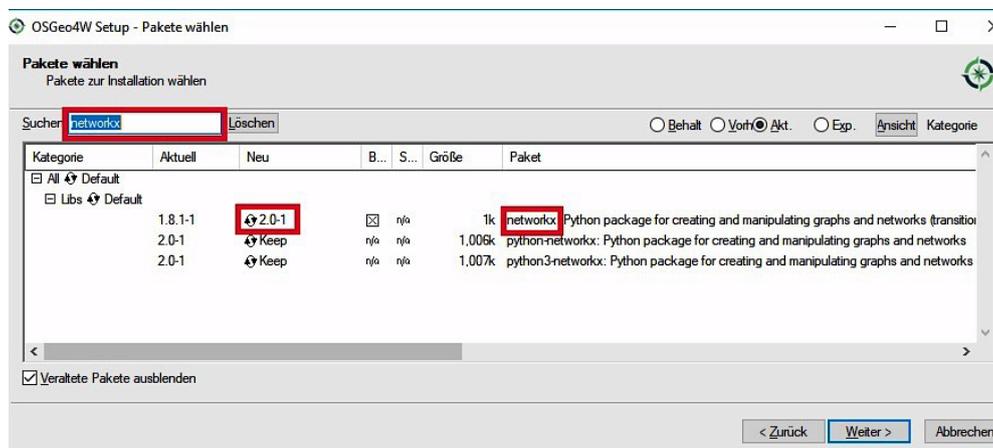


Bild A.1: NetworkX-Installation über mithilfe des OSGeo4W Setups

- c. Durch Klicken auf ein Attribut in der Spalte »Neu« (im Screenshot mit roter Umrandung, die Versionsnummer), kann entschieden werden, was mit der Library gemacht werden soll (Neuinstallation, Updaten, Installieren usw). Bei erstmaliger Installation, muss »Install« gewählt werden.

A.2 Installation der QGIS Plug-Ins

1. Jeden Plugin Ordner(FraunhoferEMI ...) in folgendes Verzeichnis kopieren:
C:\Users\altas\.qgis2\python\plugins (altas durch eigenen Benutzernamen ersetzen).
2. QGIS (falls offen) schließen und wieder öffnen.
3. In der Leiste oben auf »Plugins« -> »Manage and Install Plugins ...« (siehe Bild A.2).

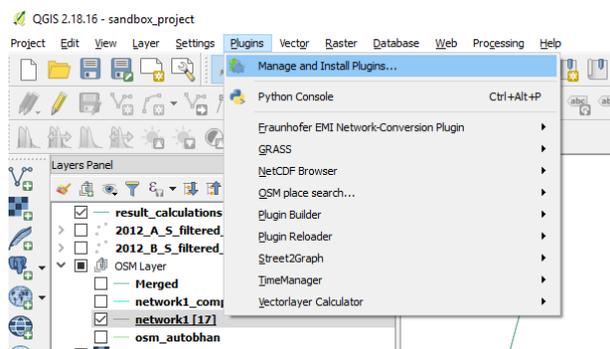


Bild A.2: »Plug-in«-Verwaltung in QGIS 2.18

4. Im Settings-Tab ein Häkchen setzen bei »show also experimental plugins« (siehe Bild A.3).

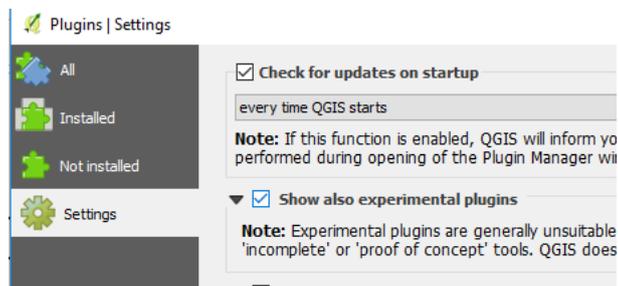


Bild A.3: Aktivieren von experimentellen Plug-in in QGIS

5. Im All-Tab in der oberen Suchleiste nach »Fraunhofer EMI« suchen.

6. Einen Haken hinter dem Namen in der Liste setzten (siehe Bild A.4) und fallsnotwendig das Plug-in installieren (über den Button unten rechts im Panel).

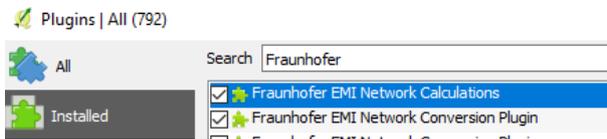


Bild A.4: Aktivierung der Plug-in

7. In der QGIS Toolbox (Menü: Processing -> Toolllbox, bzw. Strg+Alt+T) auf »enable additional providers« (siehe blaue Box in Bild A.5).

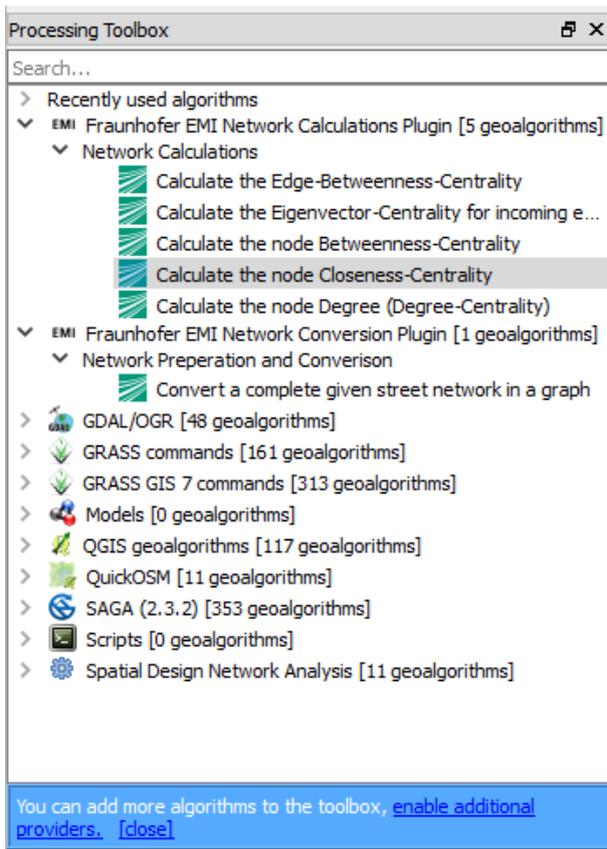


Bild A.5: Processing Toolbox in QGIS

8. In C:\Program Files\QGIS 2.18\apps bzw. C:\Programme\QGIS 2.18\apps einen Ordner »msys« anlegen.
9. Bei »Providers« -> »Fraunhofer EMI Network Calculation/Conversion Plugin« Häkchen bei »activate« setzten.

A3 Nutzung der Plug-in

Übersicht der »Plug-in«-Funktionalitäten

Fraunhofer EMI Network Conversion Plug-in:

- Input: Straßennetz als Linien Vektor-Layer als Shapefile (.shp).
- Output: Konvertiertes Straßennetzwerk in Form eines mathematischen Graphen (nach dem entwickelten Konzept zur Netzwerkkonvertierung von Straßen); Linien Vektor-Layer als Shapefile.

Fraunhofer EMI Network Calculations Plug-in:

- Input: Straßennetz als Linien Vektor-Layer/Konvertiertes Straßennetzwerk in Form eines Graphen als Shapefile.
- Output: Shapefile mit Linien oder Punkten, je nach Art des Algorithmus, mit Attributen, die Kennzahlwerte widerspiegeln.

Anwendung der Plug-Ins

Beide Plug-in sind in der Processing Toolbox in QGIS zu finden (siehe Bild A.6). Diese lässt sich über den Menüpunkt ‚View‘ -> ‚Panels‘ -> ‚Toolbox‘ öffnen oder mit der Tastenkombination Strg+Alt+T.

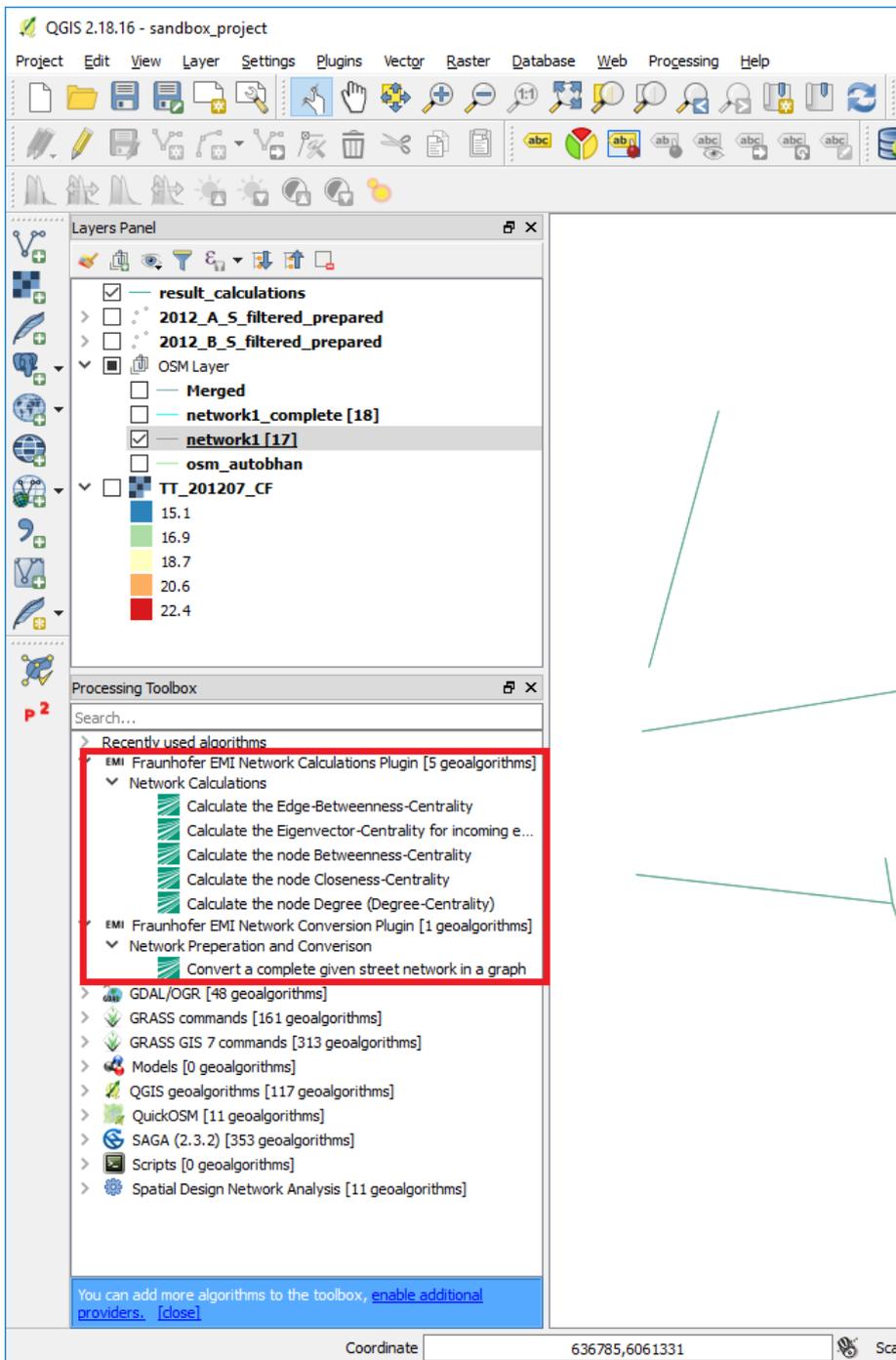


Bild A.6: Processing Toolbox in QGIS

Mit einem Doppelklick auf die Beschreibung eines Algorithmus werden die Algorithmen aus der Processing Toolbox ausgeführt. Daraufhin erscheint ein Dialog-Fenster wie in Bild Bild A.7 (beispielhaft gezeigt am Netzwerkkonvertierungs-»Plug-in«).

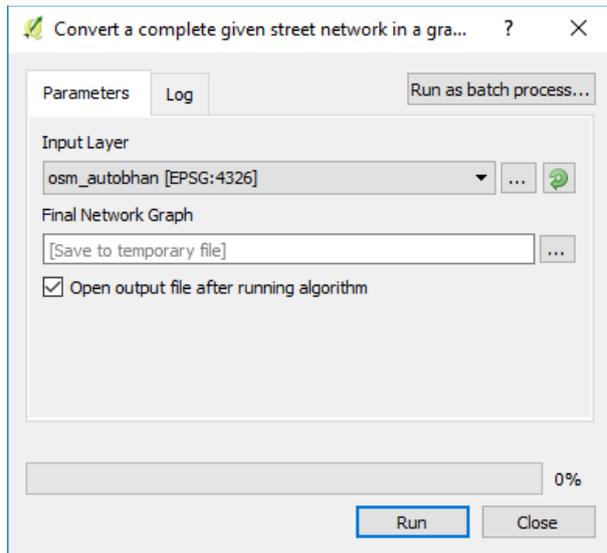


Bild A.7: Dialog-Fenster des Network Conversion Plug-in

Im oberen Drop-Down-Menü »Input Layer« soll ein Linien Vektor-Layer ausgewählt werden, der zu einem mathematischen Graphen konvertiert wird. Wenn der Knopf mit den 3 Punkten bei »Final Network Graph« gedrückt wird, kann der resultierende Layer in ein persistentes Shape-File gespeichert werden. Hierzu muss nur ein Speicherort ausgewählt werden. Ansonsten wird der resultierende Vektor-Layer temporär in QGIS gespeichert (kann auch später zusätzlich persistent gespeichert werden über das Kontextmenü/Rechts-Klicken eines Layers im Layer-Panel).

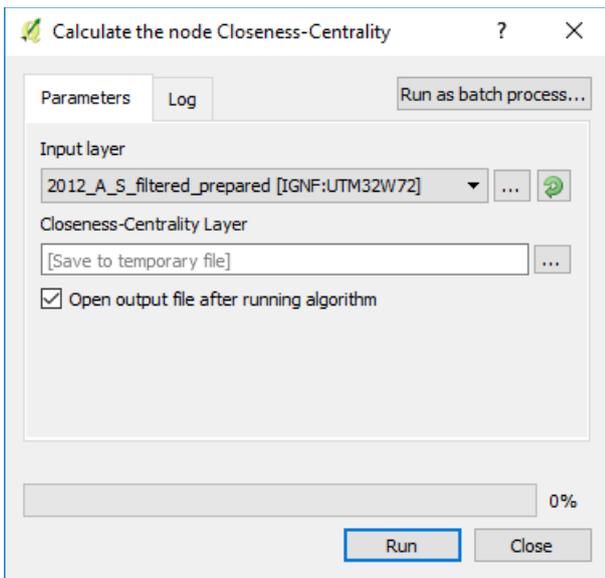


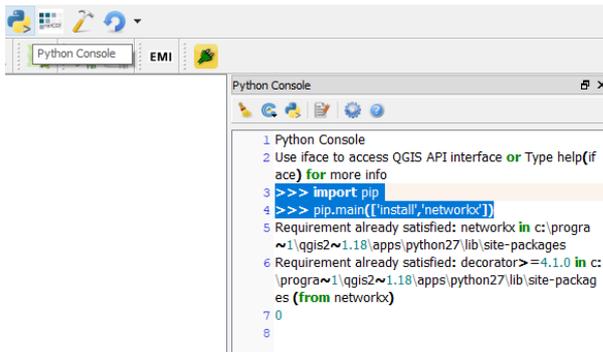
Bild A.8: Dialog-Fenster des Network Calculations Plug-in

Bild Bild A.8 zeigt den Dialog eines Algorithmus (Closeness Centrality) Network Calculation Plug-in. Dieser ist genauso aufgebaut wie der des Network Conversion Plug-in.

Weitere Hinweise zur Nutzung der Plug-in

- Ein Plug-in kann neugestartet werden, indem das Dialog-Fenster geöffnet und wieder geschlossen wird (notwendig, falls zur Laufzeit neue Vektor-Layer hinzugefügt werden) oder durch einen Neustart von QGIS.
- Einbindung von NetworkX 2.1 mithilfe des Python 2.7 Plug-in Interfaces in QGIS 2.18 (keine Kompatibilität zu QGIS 3.0 getestet!).
- Bei ASCII/Unicode Python Fehlern hilft ein Neustart des Rechners.
- Das Koordinatensystem muss teilweise ausgewählt werden (je nach QGIS Projekt-einstellungen fragt QGIS danach).

- Bei möglichen Installationsproblemen von NetworkX: In der QGIS Python Konsole den Code aus Bild Bild A.9 absetzen (Zeile 3 und 4 in der Python-Konsole).



```
1 Python Console
2 Use iface to access QGIS API interface or Type help(if
ace) for more info
3 >>> import pip
4 >>> pip.main(['install','networkx'])
5 Requirement already satisfied: networkx in c:\progra
~1\qgis2~1.18\apps\python27\lib\site-packages
6 Requirement already satisfied: decorator>=4.1.0 in c:
\progra~1\qgis2~1.18\apps\python27\lib\site-packag
es (from networkx)
7 0
8
```

Bild A.9: Installation von NetworkX über die QGIS interne Python-Konsole

A4 Weiterführende Links

- Python 2.7 Documentation: <https://docs.python.org/2/>
- NetworkX Documentation: <https://networkx.github.io/documentation/stable/>
- QGIS 2.18 Documentation: <https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/index.html#>
- QGIS 2.18 API Documentation: <https://qgis.org/api/2.18/>
- PyQGIS Developer Cookbook: https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/pyqgis_developer_cookbook/index.html
- GRASS GIS 7.4 Reference Manual: <https://grass.osgeo.org/grass74/manuals/index.html>

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

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

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

2018

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

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

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

2019

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

2020

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

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

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

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

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

Keßler, Gehlen € 16,00

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

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

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

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, 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, Staeck
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.

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

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

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.