

# **Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchti- gung und/oder Ersatz wichtiger Brücken**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 184**

**bast**

# Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchti- gung und/oder Ersatz wichtiger Brücken

von

Annette Kindl  
Andreas Stadler  
Christoph Walther

PTV Planung Transport Verkehr AG  
Karlsruhe/Berlin

Michael Bornmann  
Nancy Freitag

Ingenieurbüro Bornmann & Jauck GmbH  
Leipzig

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 184**

**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 15.0645**  
Entwicklung einer Methodik einschliesslich Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen

### Fachbetreuung

Ulrich Bergerhausen

### Referat

Tunnel- und Grundbau, Tunnelbetrieb,  
Zivile Sicherheit

### Herausgeber

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

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

### Druck und Verlag

Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-95606-712-9

Bergisch Gladbach, November 2022

---

## Kurzfassung – Abstract

### **Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen**

Ziel des F+E-Vorhabens „Entwicklung einer Methodik einschl. Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen“ war es, ein prototypisches Verfahren zu entwickeln, das für ein Teilnetz der Bundesfernstraßen, Ertüchtigungs- und/oder Erneuerungsmaßnahmen an Brücken in ein optimiertes Ertüchtigungsprogramm überführt und die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen durch Nichtverfügbarkeit oder beschränkte Nutzbarkeit der Brücken minimiert.

Im Ergebnis entstand eine Methodik, welche die folgenden Aspekte beinhaltet:

Das Verfahren zur Vorselektion von Bauwerken unter baulichen und gesamtwirtschaftlichen Aspekten soll den Baulasträgern dazu dienen, frühzeitig besonders kritische Bauwerke zu identifizieren, um diese in ein Verfahren zur Maßnahmenplanung auf Teilnetzebene einbeziehen zu können. Eng verknüpft mit der baulichen Vorselektion ist die Bestimmung des baulichen Maßnahmenbedarfs. Art der Maßnahme und Eingreifzeitraum werden auf Basis der Vorselektionsstufe und dem Zustand des Bauwerks ermittelt.

Im Fokus stehen schließlich die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen von verkehrlichen Einschränkungen aufgrund der Ertüchtigungs- und Erneuerungsmaßnahmen an den Bauwerken. Hierbei finden neben den maßnahmenbedingten Baulasträgerkosten und den veränderten Restwerten der Bauwerke, die Veränderung von Reisezeiten, Emissionen und Unfällen im von Verkehrseinschränkungen direkt oder indirekt betroffenen Teilnetz Berücksichtigung. Für die Erarbeitung optimierter Ertüchtigungsprogramme ist eine Betrachtung von gleichzeitigen (Teil-) Sperrungen von Brücken und den entstehenden Wechselwirkungen im Verkehrsmodell von besonderer Bedeutung. Und zwar insbesondere vor dem Hintergrund der Vielzahl an zu ertüchtigenden Bauwerken im Bundesfernstraßennetz bei gleichzeitig vergleichsweise guter Finanzausstattung des Programms zur Brückenmodernisierung.

Die Methodik zur Aufstellung von optimierten Ertüchtigungsprogrammen hat zum Ziel, für die Gesamtheit der im Teilnetz erforderlichen Maßnahmen einen möglichst hohen gesamtwirtschaftlichen Nutzen zu generieren, d. h. die negativen Auswirkungen von Verkehrseinschränkungen durch Baustellen sollen für die Verkehrsteilnehmer insgesamt möglichst gering gehalten werden. Die Berechnung erfolgt mittels eines auf dem sog. Tabu-Search-Verfahren basierenden Optimierungsansatz.

Zur Überprüfung der Methodik wurde sie in einem auf Microsoft Excel und VBA sowie der Verkehrsplanungssoftware PTV Visum basierenden Software-Prototyp implementiert. Angewendet wurde das Verfahren auf ein Beispiel mit 16 Brücken – darunter vier wichtige Rheinquerungen – in Nordrhein-Westfalen.

## **Methodology and prototype for an optimized planning of retrofitting and/or replacement of important bridges of the federal highways**

The R&D project “Development of a methodology incl. prototype for an optimized planning of retrofitting and/or replacement of important bridges of the federal highways” aimed to develop a prototypical procedure for a subnet of federal highways, which transfers retrofitting and/or replacement measures on bridges in an optimized retrofitting program minimising the overall economic impact through unavailability or limited usability of bridges.

The result is a methodology that includes the following aspects:

The procedure for the preselection of structures under macroeconomic aspects is intended to serve public authorities to identify particularly critical buildings at an early stage in order to be able to include them in a procedure for planning measures at subnetwork level. Closely linked with the structural preselection is the determination of the structural need for measures. The type of measure and intervention period are determined on the basis of the preselection stage and the condition of the building.

Finally, the macroeconomic effects of traffic restrictions due to the retrofitting and replacement measures on the buildings are considered. In addition to the measure-related costs of the public authorities and the changed residual values of the structures, the changes in travel times, emissions and accidents in the subnetwork directly or indirectly affected by traffic restrictions are also taken into account. For the development of optimised retrofitting programmes, the consideration of simultaneous (partial) closures of bridges and the resulting interactions in the transport model is of particular importance. This is particularly important in view of the large number of structures to be retrofitted in the federal road network and the comparatively good financial resources available for the bridge modernisation programme.

The aim of the methodology for setting up an optimized retrofitting programme is to generate the greatest possible macroeconomic benefit for all the measures required in the subnetwork, i.e. the negative effects of traffic restrictions caused by construction sites should be kept to a minimum for the road users as a whole. The calculation is carried out using an optimization approach based on the so-called taboo search method.

To verify the methodology, it was implemented in a software prototype based on Microsoft Excel and VBA as well as the transportation planning software PTV Visum. The procedure was applied to an example with 16 bridges - including four important Rhine crossings - in North Rhine-Westphalia.

## Summary

### **Methodology and prototype for an optimized planning of retrofitting and/or replacement of important bridges of the federal highways**

#### **1 Task definition**

Due to their design, many of the structures of the federal highways built before 1985 have a load-bearing capacity that is often insufficient to withstand the stresses of freight transport and is certainly not designed for the truck numbers forecast in the Federal Transport Infrastructure Plan for the year 2030. This can be verified using the guidelines for assessing load capacity risks which serve to evaluate existing road bridges that have not been planned and built according to the current standardization status, with regard to their load capacity and serviceability. If it can be predicted that the capacity of a road bridge is no longer adequate, options for action are to be derived for the structure, which can consist of various measures to upgrade or replace the structure.

Due to the large scale of the problem, in particular the high number of affected structures, the consideration of individual structures and their possible options for upgrading does not go far enough. A strategic planning approach is required that also considers the structures in their traffic context. This was the starting point for the project's task. The aim of this project was to develop a prototypical procedure which, for a partial network of federal highways, converts retrofitting and/or replacement measures on bridges into an optimized maintenance programme and minimises the macroeconomic impacts due to unavailability or limited usability of the bridges. The findings from the R+D project 15.0616/2015/NRB (development of a methodology for an optimized planning of retrofitting and/or replacement of important bridges of the federal highways) were used as a basis.

#### **2 Scientific approach**

Within the framework of the project, prototypical methods were developed for various stages of an optimized planning of retrofitting and/or replacement of important bridges. These are in detail:

- approaches for the preselection of structures,
- a methodology for analysing the need for action,
- a methodology for analysing the traffic effects of measures on individual structures and combinations of measures on several structures, and
- a methodology for setting up optimized retrofitting programmes.

All approaches have in common that they take both structural and traffic aspects into account. With regard to the analysis and evaluation of the traffic aspects, the same transport model-based investigation and overall economic evaluation approaches are applied in each case (Fig. 1).

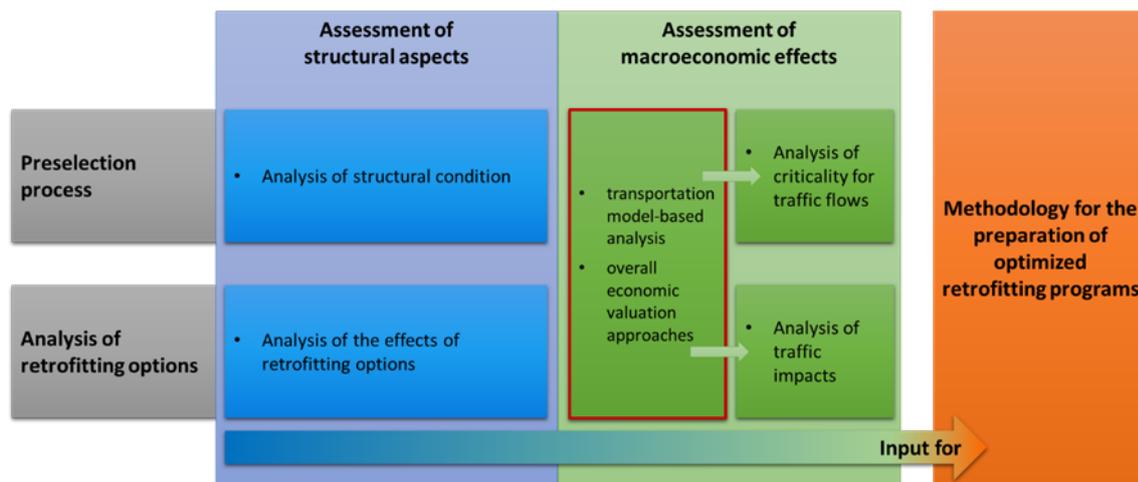


Fig. 1: Transport modelling and macroeconomic evaluation approaches

For the determination of load capacity effects and site-related traffic limitations the macroscopic transportation planning software PTV Visum and the Germany-wide road network and transport data model PTV Validate were used as database. Using the transportation model, the effects for both road users directly affected by the road blocking, e.g. when the structure is located directly on the planned route, and indirectly affected road users can be recorded. When evaluating the macroeconomic effects, a planned case is compared with a reference case. The evaluation is carried out against the background of a target system with the help of which the demands on the structure are expressed according to its function in the transport network. The traffic and economic impacts are described on the basis of the evaluation criteria of overtime, air pollutant and greenhouse gas emissions and accidents. For value synthesis, the indicator values are monetarised using current cost rates from the evaluation procedure of the Federal Transport Infrastructure Planning 2030.

Based on the need for measures at the object level, the aim of the research project was to develop a methodology for setting up retrofitting programmes for subnetworks. The optimization objective is to generate the highest possible macroeconomic benefit for the selected subnetwork. Against the background of the financial resources of the Federal States which are currently good, and a prioritisation of the retrofitting measures within the framework of maintenance planning, it was to be assumed that the simultaneous implementation of measures on several structures in the subnetwork would be possible. Therefore, on the one hand, all traffic interactions with simultaneous traffic restrictions at different bridges in the traffic model had to be considered.

On the other hand, an optimization process had to be developed which

- is suitable for a very large solution space and
- the consideration of the non-additive beneficial components occurring due to traffic dependencies.

For this purpose, an optimization approach based on the taboo search method was developed.

---

## 3 Results

### Approaches for the preselection of structures

The procedure for the preselection of structures under structural and overall economic aspects enables the building authorities to identify particularly critical structures at an early stage so that they can then be included in a procedure for the planning of measures at sub-network level. With the structural preselection measure, an evaluation can be made as to whether there is a need for measures under structural aspects and, if so, whether it is more likely to be a retrofitting measure or a new construction. Initial classifications are already possible for many buildings via information on the year of construction and the main building material. The considerations include the usual BAST procedures (prioritisation system and bearing capacity index). The traffic preselection measure - against the background of any existing traffic restrictions - allows an evaluation to be made of the significance of the structure in the road network and therefore of how important a measure is under traffic aspects. There are also indications as to whether major negative effects on traffic are to be expected during the implementation of the measure.

The concretisation of the structural need for measures is closely linked to the structural preselection. The type of measure and intervention period are determined for each bridge on the basis of the structural preselection stage and the structural condition (substance identifier). The so-called "priority network bridge", which expresses along which motorways throughout Germany all bridges are to be retrofitted to a certain target load level by 2030 at the latest is also taken into account within the framework of the concretisation of the intervention periods. The application of standard measure options allows rough measure durations and costs to be estimated at an early planning stage.

### Macroeconomic evaluation of measures (combinations)

Retrofitting measures or the construction of replacement buildings lead to an interference in the traffic flow. The procedure described serves to evaluate the effects of such interventions from a macroeconomic point of view. Against the background of the preparation of optimized rehabilitation plans, the procedure is used in particular to estimate the effects of overlapping measures (combinations of measures on several structures), in order to then use the optimization procedure to find the optimum periods of measures for the structures in the subnetwork.

Within the framework of the evaluation, possible planning cases (e.g. based on the standard measure options) are compared with the hypothetical reference case, an unrestricted usability of the structures. The evaluation is based on the following evaluation criteria:

- On the cost side
  - the investment costs of the retrofitting or replacement measure(s)

- On the benefit side
  - the negative traffic benefits (excess travel time, air pollutant and greenhouse gas emissions and accidents) resulting from traffic restrictions during the implementation of the measure(s)
  - negative traffic benefits, if any, resulting from traffic restrictions due to load-bearing capacity prior to the implementation of the measure(s)
  - any negative traffic benefits avoided during the evaluation period as a result of the condition-related traffic restrictions no longer required as a result of the implementation of measures
  - the change in the residual value of the structure due to renewal measures carried out

All evaluation criteria are original monetary values (investment costs and residual value of the building) or are monetised using the cost rates of the BVWP evaluation procedure (traffic benefits). To synthesise value, the benefit-cost difference is formed, so that the macroeconomic benefits of measures (combinations) can be read off by means of a parameter.

### **Restriction of combinations of measures**

For the development of optimized retrofitting programmes, the consideration of simultaneous (partial) closures of bridges with the resulting interactions in the traffic model is of particular importance. This is particularly the case against the background of the large number of structures to be retrofitted in the federal road network and the current comparatively good financial situation of the bridge modernization programme.

The requirement to draw up retrofitting programmes for subnetworks of up to 50 structures theoretically results in a very large number of possible combinations of traffic restrictions on different structures: for example, in a subnetwork of this size, with an assumed upper limit of 10 simultaneous traffic restrictions, more than 10 billion combinations are possible. Against this background, the methodology developed provides technically plausible ways of limiting the theoretical combination possibilities: thus, for example, the intervention periods defined on the basis of the preselection results and the structural conditions clearly limit the possible combinations. Consequently, only combinations of buildings with overlapping intervention periods are critical. Under traffic aspects, additional combinations can be excluded which are likely to lead to impermissible displacements on inner city roads. Combinations that are highly likely to cause higher overall economic costs than the separate implementation of individual measures can also be defined as "unfavourable" and excluded from further consideration. In addition, an estimation procedure is provided that makes it possible to validly approximate the macroeconomic impacts for selected combinations.

### **Methodology for setting up optimized retrofitting programmes**

The aim of the methodology for setting up optimized retrofitting programmes is to generate the greatest possible macroeconomic benefit for all the measures required in the subnetwork, i.e. the negative effects of traffic restrictions caused by construction sites should be kept to a minimum for the road users as a whole. In addition, the investment costs and the residual values of the buildings can also be taken into account in the target function. The calculation is carried out using an optimization approach based on the so-called taboo search method. This is a

meta-method which combines a local search (neighbourhood search) with an approach for leaving local optima (implementation with a taboo list). For the optimization problem at hand, different possibilities for the implementation of neighbourhood search and tabular list were implemented and at the end a procedure adequate to the problem was chosen, which can be controlled by suitable process parameters. Specifically, in each iteration step, an attempt is made to generate a new plan that is as good as possible by changing the selected alternative on exactly one structure. The taboo list prevents already examined combinations from being checked a second time, so that deteriorations of the current plan are also accepted. If no new solutions can be found due to the tabooing in a neighbourhood, a new, random plan is generated, and a different area of the solution space is searched.

### **Prototype, demonstration and validation of the developed methodology**

In order to ensure the practical applicability of the developed methodology, it was applied to an example with 16 bridges - including four important Rhine crossings - in North Rhine-Westphalia and implemented in a prototype based on Microsoft Excel and VBA as well as the traffic planning software PTV Visum. All the process steps described were mapped in the software prototype. Thus, it was possible to prove the consistency and applicability of the procedure.

## **4 Conclusion**

A procedure has been developed which converts retrofitting and/or replacement measures on bridges into an optimized rehabilitation programme for a partial network of federal highways with up to 50 structures and minimises the macroeconomic effects due to non-availability or limited usability of the bridges. With the implementation of the procedure in a prototype, the basis for a commercially usable software development was created. If the developed methodology is to be made available to a larger circle of users, the use of the prototype in the context of a concrete application case in the sense of a pilot project is generally recommended. The aim of such a pilot application would be to check the applicability of the process in a large subnetwork (50 buildings) and to specify the specific requirements of the end users. With such a pilot application, the application context of the procedure could be defined and the end-user-suitable software solution as well as the necessary data structures could be specified.



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>16</b>
2.1	Ausgangssituation .....	16
2.2	Projektziele .....	16
2.3	Mehrstufiges Verfahren .....	17
2.4	Definition des Anwendungsbeispiels .....	18
<b>3</b>	<b>Grundlagen aus Verkehrsmodellierung und Bewertung</b> .....	<b>21</b>
3.1	Modellanwendung zur Bewertung der verkehrlichen Wirkungen.....	21
3.1.1	Verkehrliche Wirkungen .....	21
3.1.2	PTV Visum und PTV Validate .....	23
3.1.3	Umsetzung der Verkehrssimulation.....	25
3.2	Gesamtwirtschaftliches Bewertungsverfahren .....	25
3.2.1	Zielsystem.....	25
3.2.2	Bewertungskriterien .....	26
3.3	Anwendungsbeispiel: Verkehrsmodellierung und Bewertungsmethodik ...	34
3.3.1	Aufbereitung des Verkehrsmodells.....	34
<b>4</b>	<b>Vorselektion relevanter Bauwerke</b> .....	<b>36</b>
4.1	Einführung.....	36
4.2	Verkehrliche Vorselektion.....	37
4.2.1	Kriterien zur Bewertung der verkehrlichen Kritikalität .....	37
4.2.2	Maßzahl zur Bewertung der verkehrlichen Kritikalität im Rahmen der Vorselektion.....	39
4.2.3	Anwendungsbeispiel: Verkehrliche Vorselektion .....	39
4.3	Bauliche Vorselektion.....	43
4.3.1	Einteilung der Bauwerke in Vorselektionsstufen.....	43
4.3.2	Einbeziehung des Traglastindex .....	44
4.3.3	Anwendungsbeispiel: Bauliche Vorselektion .....	45
4.4	Zusammenfassung: Vorselektion von Bauwerken .....	46
4.4.1	Zusammenschau der Vorselektionsmaße .....	46
4.4.2	Anwendungsbeispiel: Zusammenschau der Vorselektionsmaße .....	46

---

<b>5</b>	<b>Baulicher Maßnahmenbedarf.....</b>	<b>48</b>
5.1	Zuordnung von Standardmaßnahmen.....	48
5.2	Anpassung des Maßnahmenbedarfs und Konkretisierung des Eingreifzeitraums .....	50
5.3	Berücksichtigung des „Vorrangnetzes Brücke“.....	51
5.4	Anwendungsbeispiel: Baulicher Maßnahmenbedarf.....	52
<b>6</b>	<b>Bewertung von Ertüchtigungsoptionen.....</b>	<b>58</b>
6.1	Exemplarische Darstellung der Standardoptionen.....	58
6.2	Gesamtwirtschaftliches Verfahren zur Bewertung von Ertüchtigungsmaßnahmen .....	61
6.2.1	Einführung .....	61
6.2.2	Definition der Planfälle und des Bezugsfalls.....	62
6.2.3	Definition des Bewertungszeitraums .....	63
6.2.4	Bewertungskriterien .....	64
6.2.5	Syntheseverfahren.....	67
<b>7</b>	<b>Verkehrliche Bewertung gleichzeitiger Maßnahmen bzw. Verkehrseinschränkungen an mehreren Brücken.....</b>	<b>69</b>
7.1	Zielstellung.....	69
7.2	Ansatz.....	70
7.3	Verfahren .....	71
7.3.1	Bezeichner.....	72
7.3.2	Ausschluss unzulässiger Kombinationen .....	72
7.3.3	Ausschluss ungünstiger Kombinationen.....	74
7.3.4	Bewertung „normaler“ Kombinationen.....	74
7.3.5	Identifikation der zu berechnenden „normalen“ Kombinationen.....	82
7.3.6	Zusammenfassung der Verfahrensparameter.....	83
7.4	Anwendungsbeispiel: Verkehrliche Bewertung gleichzeitiger Maßnahmen.....	84
<b>8</b>	<b>Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme .....</b>	<b>88</b>
8.1	Optimierungsziel .....	88
8.1.1	Zielfunktion .....	88
8.1.2	Kapazitätsbeschränkungen.....	89
8.1.3	Optimierungsverfahren .....	89

8.1.4	Folgerungen.....	90
8.2	Optimierungsverfahren.....	90
8.2.1	Allgemeine Verfahrensbeschreibung.....	91
8.2.2	Einordnung .....	93
8.3	Umsetzung des Verfahrens .....	93
8.3.1	Erzeugung und Repräsentation von Lösungen.....	93
8.3.2	Gültigkeit von Lösungen.....	94
8.3.3	Erzeugung der Nachbarschaft einer Lösung .....	94
8.3.4	Bewertung von Lösungen .....	95
8.3.5	Umsetzung der Tabu-Liste.....	96
8.3.6	Abbruchkriterium zum Beenden der Lösungssuche. ....	97
8.4	Anwendungsbeispiel: Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme...97	
8.4.1	Überprüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens.....	98
8.4.2	Anwendungsbeispiel .....	103
8.4.3	Bewertung der Optimierung .....	105
<b>9</b>	<b>Prototyp.....</b>	<b>107</b>
9.1	Überblick.....	107
9.2	Implementierung des Verfahrens.....	108
9.2.1	Überblick.....	108
9.2.2	Datenimport aus dem Verkehrsmodell (PTV Visum) .....	109
9.2.3	Verfahrensschritte auf Objektebene .....	109
9.2.4	Definition und Berechnung von Szenarien im Verkehrsmodell.....	109
9.2.5	Optimierung von Ertüchtigungsplänen .....	110
<b>10</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>112</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>115</b>
	<b>Bilder .....</b>	<b>118</b>
	<b>Tabellen.....</b>	<b>120</b>
	<b>Anhang: Literaturstudie sowie Bestandsaufnahme vorhandener Methoden und Ansätze .....</b>	<b>121</b>
<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>121</b>
<b>2</b>	<b>Literatur: Bauliche Aspekte .....</b>	<b>122</b>

<b>3</b>	<b>Literatur: Verkehrliche und gesamtwirtschaftliche Aspekte .....</b>	<b>124</b>
<b>4</b>	<b>Nachrechnungsdaten aus NRW / BAB 1 .....</b>	<b>131</b>
<b>5</b>	<b>Fazit zur Literaturstudie .....</b>	<b>132</b>

# 1 Zusammenfassung

Ziel des F+E-Vorhabens „Entwicklung einer Methodik einschl. Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen“ war es, ein prototypisches Verfahren zu entwickeln, das für ein Teilnetz der Bundesfernstraßen Ertüchtigungs- und/oder Erneuerungsmaßnahmen an Brücken in ein optimiertes Ertüchtigungsprogramm überführt und die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen durch Nichtverfügbarkeit oder beschränkte Nutzbarkeit der Brücken minimiert.

Im Ergebnis entstand eine Methodik, welche die folgenden Aspekte beinhaltet:

Das Verfahren zur Vorselektion von Bauwerken unter baulichen und gesamtwirtschaftlichen Aspekten soll den Baulastträgern dazu dienen, frühzeitig besonders kritische Bauwerke zu identifizieren, um diese in ein Verfahren zur Maßnahmenplanung auf Teilnetzebene einbeziehen zu können. Eng verknüpft mit der baulichen Vorselektion ist die Bestimmung des baulichen Maßnahmenbedarfs. Art der Maßnahme und Eingreifzeitraum werden auf Basis der Vorselektionsstufe und des Zustands des Bauwerks ermittelt.

Im Fokus stehen schließlich die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen von verkehrlichen Einschränkungen aufgrund der Ertüchtigungs- und Erneuerungsmaßnahmen an den Bauwerken. Hierbei werden neben den maßnahmenbedingten Baulastträgerkosten und den veränderten Restwerten der Bauwerke die Veränderungen von Reisezeiten, Emissionen und Unfällen im von Verkehrseinschränkungen direkt oder indirekt betroffenen Teilnetz berücksichtigt. Für die Erarbeitung optimierter Ertüchtigungsprogramme ist eine Betrachtung von gleichzeitigen (Teil-) Sperrungen von Brücken und den entstehenden Wechselwirkungen im Verkehrsmodell von besonderer Bedeutung. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der Vielzahl an zu ertüchtigenden Bauwerken im Bundesfernstraßennetz bei gleichzeitig vergleichsweise guter Finanzausstattung des Programms zur Brückenmodernisierung.

Die Methodik zur Aufstellung von optimierten Ertüchtigungsprogrammen hat zum Ziel, für die Gesamtheit der im Teilnetz erforderlichen Maßnahmen einen möglichst hohen gesamtwirtschaftlichen Nutzen zu generieren. Das bedeutet, dass die negativen Auswirkungen von Verkehrseinschränkungen durch Baustellen für die Verkehrsteilnehmer insgesamt möglichst geringgehalten werden sollen. Die Berechnung erfolgt mittels eines auf dem Tabu Search-Verfahren basierenden Optimierungsansatzes.

Zur Überprüfung der Methodik wurde sie in einem auf Microsoft Excel und VBA sowie der Verkehrsplanungssoftware PTV Visum basierenden Software-Prototyp implementiert. Angewendet wurde das Verfahren auf ein Beispiel mit 16 Brücken – darunter vier wichtigen Rheinquerungen – in Nordrhein-Westfalen.

## 2 Aufgabenstellung

### 2.1 Ausgangssituation

Zahlreiche Bauwerke der Bundesfernstraßen, die vor 1985 gebaut wurden, weisen bauartbedingt eine Tragfähigkeit auf, die oftmals bereits heute den Belastungen durch den Güterverkehr nicht genügt und schon gar nicht für die im Bundesverkehrswegeplan für das Jahr 2030 prognostizierten Lkw-Zahlen ausgelegt ist. Ein Nachweis hierüber kann mit Hilfe der Nachrechnungsrichtlinie erfolgen, die dazu dient, bestehende Straßenbrücken, die nicht nach aktuellem Normungsstand geplant und errichtet wurden, hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu bewerten. Ist die Tragfähigkeit einer Straßenbrücke absehbar nicht mehr ausreichend, sind Handlungsoptionen für das Einzelbauwerk abzuleiten, die aus unterschiedlichen Ertüchtigungsmaßnahmen oder dem Ersatz des Bauwerks bestehen können.

### 2.2 Projektziele

Aufgrund des großen Ausmaßes der Problematik, insbesondere der hohen Anzahl an betroffenen Bauwerken, greift die Betrachtung einzelner Bauwerke und ihrer möglichen Ertüchtigungsoptionen zu kurz. Benötigt wird ein strategischer Planungsansatz, welcher die Bauwerke in ihrem verkehrlichen Kontext zueinander betrachtet.

An dieser Stelle setzte das Projekt an, welches zum Ziel hat, eine Methodik zur Erstellung von „Ertüchtigungsplänen“ zu erarbeiten. Mit einem Ertüchtigungsplan soll für ein Teilnetz der Bundesfernstraßen die Tragfähigkeit des betrachteten Brückenkollektivs insgesamt optimiert und gleichzeitig sollen die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen durch Nichtverfügbarkeit oder beschränkte Nutzbarkeit der Brücken, gerade auch während der Bauzeiten, minimiert werden.

Das Ziel des Projekts war also die Erarbeitung eines strategischen Instruments zur optimierten Planung von Ertüchtigung und Erneuerung wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen.

Das Projektziel lässt sich wie folgt konkretisieren:

- Das Planungsinstrument soll die Praktiker dabei unterstützen, sich auf die anstehende große Aufgabe der tragfähigkeitsbedingten Ertüchtigung bzw. Erneuerung vorzubereiten. Es setzt deutlich vor der HOAI-Planungsphase 1 und vor der Nachrechnung der Brücken an.
- Im Fokus des Projekts steht die Untersuchung von tragfähigkeitsbedingt zu ertüchtigenden bzw. erneuernden Bauwerken, also von Bauwerken der Nachrechnungsliste des Bundes.
- Insbesondere erfolgt eine Bewertung der durch Nutzungsausfall bzw. -einschränkungen an den Bauwerken entstehenden gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen. Dabei werden vor allem die Wirkungen bei gleichzeitiger Maßnahmendurchführung an mehreren Bauwerken betrachtet. Aufgrund der Zielsetzung eines strategischen Planungsinstruments stand eine Bewertung von Maßnahmenoptionen am Einzelbauwerk nicht im Fokus des Projekts.
- Die Methodik zielt auf die Untersuchung von Teilnetzen mit bis zu 50 Bauwerken ab.

## 2.3 Mehrstufiges Verfahren

Im Projekt war eine Methodik für ein mehrstufiges Vorgehen zu erarbeiten, das sowohl bauliche als auch verkehrliche Aspekte berücksichtigt:

- Verfahren zur Vorselektion von Bauwerken

Das Vorselektionsverfahren soll Baulasträgern grundsätzlich die Möglichkeit bieten, frühzeitig besonders kritische Bauwerke zu identifizieren sowie erste Maßnahmenoptionen und Eingreifzeiträume abzuleiten. Die Vorselektion wird in Kapitel 4, die Ableitung des baulichen Maßnahmenbedarfs in Kapitel 5 beschrieben.

### Verfahren zur Bewertung von Maßnahmen / Maßnahmenkombinationen

Mit dem Bewertungsverfahren sollen die durch Baustellen verursachten Verkehrseinschränkungen hinsichtlich ihrer gesamtwirtschaftlichen bzw. verkehrlichen Wirkungen – etwa die Veränderung von Reisezeiten, Emissionen und Unfällen – beurteilt werden können. Dabei ist sowohl der Fall von Maßnahmen an nur einem Bauwerk als auch der der gleichzeitigen Durchführung von Maßnahmen an mehreren Bauwerken im betrachteten Teilnetz zu betrachten. Die Bewertung von Ertüchtigungsoptionen wird in Kapitel 6 dargestellt. Kapitel 7 behandelt die Bewertung gleichzeitiger Verkehrseinschränkungen an mehreren Brücken.

### Methodik zur Aufstellung von Ertüchtigungsprogrammen für Teilnetze

Mit dem Ertüchtigungsprogramm soll für die Gesamtheit der im Teilnetz erforderlichen Maßnahmen ein möglichst hoher gesamtwirtschaftlicher Nutzen generiert werden, d. h. die negativen Auswirkungen von Verkehrseinschränkungen durch Baustellen sollen für die Verkehrsteilnehmer insgesamt möglichst geringgehalten werden. Das Verfahren wird in Kapitel 8 erläutert.

### Anwendungsbeispiel und Software-Prototyp

Die Methodik war anhand eines Anwendungsbeispiels zu validieren. Alle skizzierten Berechnungsschritte waren in einen Software-Prototyp zu integrieren, der in Kapitel 9 beschrieben wird.

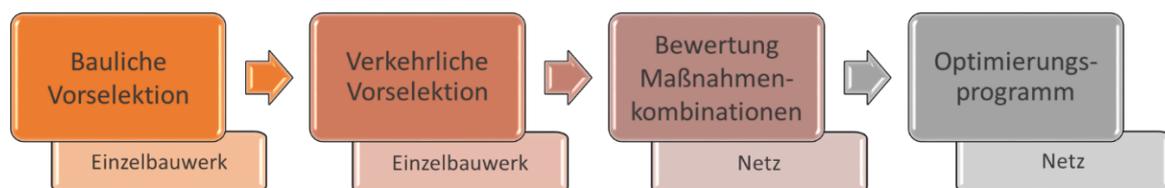


Abbildung 1: Prozessablauf bei der Anwendung des Planungsinstruments / Prototyps

## 2.4 Definition des Anwendungsbeispiels

Die entwickelte Methodik wurde exemplarisch für ein Teilnetz mit 16 auf der Nachrechnungsliste verzeichneten Brücken angewendet. So konnten alle Teilschritte / Teilverfahren – von der Vor-selektion bis hin zum Optimierungsverfahren – unmittelbar angewendet und auf Plausibilität und Praktikabilität geprüft werden.

Mit dem Verfahren sollen insbesondere die verkehrlichen Auswirkungen einer gleichzeitigen Maßnahmendurchführung an mehreren Bauwerken untersucht werden. Daher wurden für die Auswahl der Bauwerke im Teilnetz die folgenden Kriterien angelegt. Es sollte Bauwerke enthalten,

1. die sich hintereinander auf einem Streckenzug befinden,
2. die auf der Ausweichroute eines anderen Bauwerks im Teilnetz liegen und
3. die voneinander unabhängig sind, also weder auf einem Streckenzug mit einem anderen Bauwerk liegen noch auf dessen Ausweichroute.

Dadurch war es möglich Bauwerkskombinationen mit zu erwartenden

1. positiven,
2. negativen und
3. neutralen gesamtwirtschaftlichen Effekten

zu untersuchen. Daneben enthält das Anwendungsbeispiel sowohl vergleichsweise große und sehr bedeutende Bauwerke als auch kleinere weniger bedeutende Bauwerke.

Die Bauwerke wurden aus der Liste der nachzurechnenden Bauwerke (vgl. [6] und [7]) unter den genannten Kriterien und mit dem Ziel, möglichst viele wichtige Rheinquerungen in die Untersuchung einzubeziehen, ausgewählt.

Abbildung 2 zeigt die ausgewählten Bauwerke.

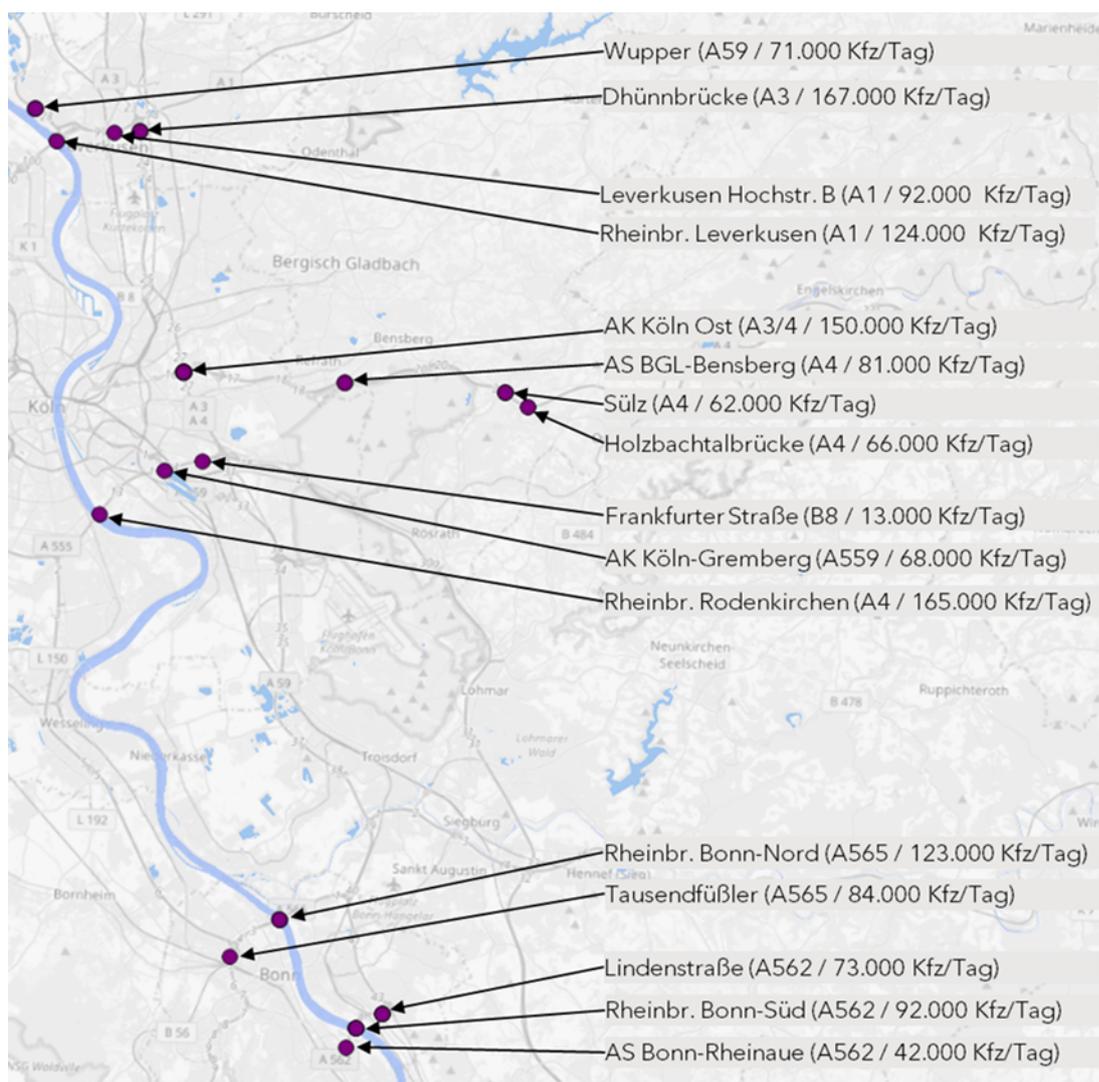


Abbildung 2: Bauwerke im Beispielnetz (PTV Group)

Die ausgewählten Beispielbauwerke umfassen zum Teil mehrere auf der Nachrechnungsliste stehende Teilbauwerke. In der Regel wurden für die Beispielanwendung lediglich die Teilbauwerke der Hauptfahrbahnen betrachtet. In die Berechnungen wurden somit insgesamt 32 Teilbauwerke einbezogen. Dies war ausreichend, um die Methodik zu validieren und begrenzte die Komplexität der Fragestellung im Rahmen der prototypischen Umsetzung des Planungsinstruments. Auf eine detaillierte Darstellung der ausgewählten Teilbauwerke und ihrer baulichen Eigenschaften wird hier aufgrund von Geheimhaltungsvorschriften verzichtet.

Ergänzend wurden Beispielrechnungen mit einem zweiten Datensatz, der ausgewählter Rheinbrücken beinhaltet, durchgeführt. Abbildung 3 zeigt diese Bauwerke. In dieses Beispiel wurden auch Brücken in kommunaler Baulastträgerschaft in vereinfachter Form einbezogen. So wurden die verkehrlichen Auswirkungen von Maßnahmen an Bauwerken in der Baulastträgerschaft des Bundes auf die kommunalen Bauwerke dargestellt, um so den Bedarf für evtl. erforderliche verkehrlenkende Maßnahmen zu verdeutlichen. Eine vollständige Integration kommunaler Bauwerke in das Optimierungsverfahren ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da sich bei der Betrachtung innerstädtischer Brücken deutlich komplexere Bewertungssituationen ergeben, z. B. durch nicht im Modell abzubildende kleinräumige innerstädtische Verlagerungseffekte oder

Verschiebungen bei der Modalwahl (auf den ÖPNV oder den aktiven Verkehr) im Maßnahmenzeitraum.

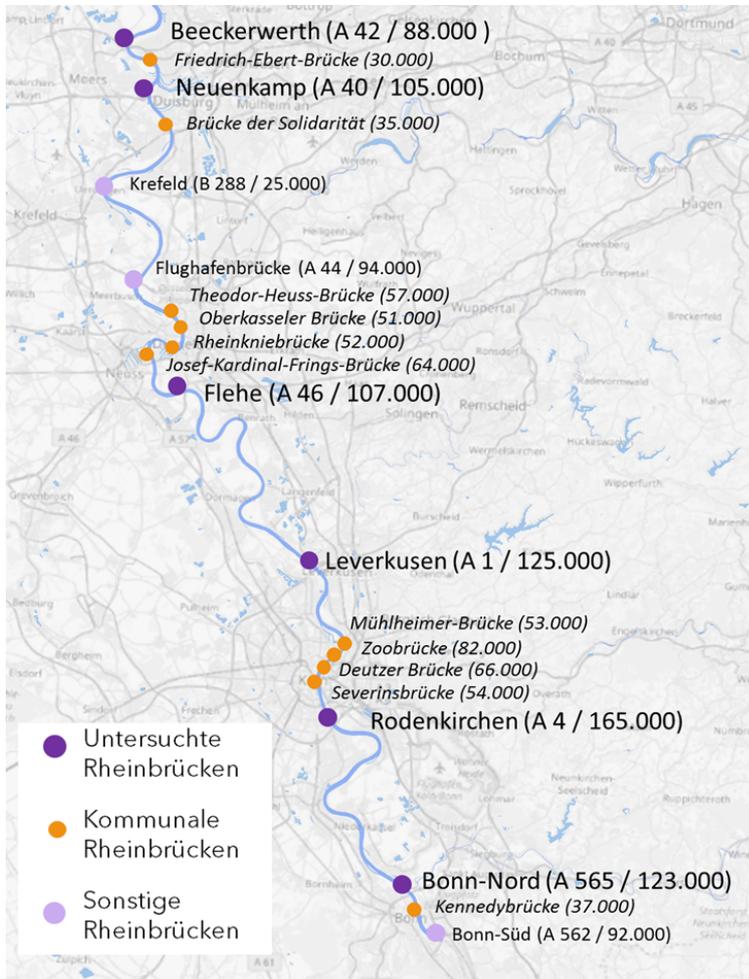


Abbildung 3: Bauwerke des Rheinbrücken-Beispiels (PTV Group)

### 3 Grundlagen aus Verkehrsmodellierung und Bewertung

Im Rahmen des Vorhabens „Entwicklung einer Methodik für eine optimierte Planung von Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen“ wurden prototypische Methoden für verschiedene Stufen einer optimierten Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken entwickelt. Im Einzelnen sind dies:

- Ansätze zur Vorselektion von Bauwerken,
- eine Methodik zur Analyse von Ertüchtigungsoptionen an einem Bauwerk und von Maßnahmenkombinationen an mehreren Bauwerken sowie
- eine Methodik zur Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme.

Allen Ansätzen ist gemeinsam, dass sie sowohl bauliche als auch verkehrliche Aspekte berücksichtigen. Im Hinblick auf die Analyse und Bewertung der verkehrlichen Aspekte kommen jeweils die gleichen verkehrsmodellbasierten Untersuchungs- und gesamtwirtschaftlichen Bewertungsansätze zur Anwendung. Aus diesem Grund erfolgt in diesem Kapitel – der Darstellung der oben aufgeführten Methoden vorangestellt – eine Erläuterung der „Grundlagen aus Verkehrsmodellierung und Bewertung“. Abbildung 4 verdeutlicht den dargestellten Zusammenhang.

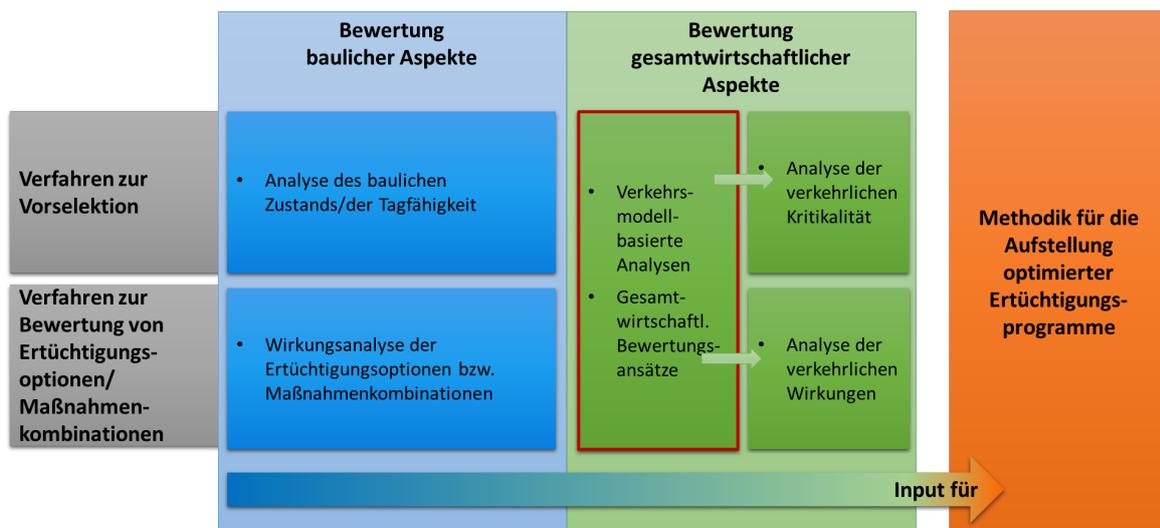


Abbildung 4: Rolle der Ansätze zur Verkehrsmodellierung und der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsansätze im Projekt

## 3.1 Modellanwendung zur Bewertung der verkehrlichen Wirkungen

### 3.1.1 Verkehrliche Wirkungen

Bei der Betrachtung von tragfähigkeitsbedingten Ertüchtigungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen sind Auswirkungen auf das Straßennetz unter zwei Gesichtspunkten relevant. Zum einen können aufgrund von Tragfähigkeitsdefiziten Verkehrseinschränkungen am betreffenden Bauwerk erforderlich werden. Zum anderen führt die Durchführung von Ertüchtigungs- oder

Erneuerungsmaßnahmen selbst zu Verkehrseinschränkungen und damit zu einem Eingriff in den Verkehrsablauf. Bestenfalls beschränken sich die Eingriffe auf Überholverbote oder Geschwindigkeitsreduktionen, bei schweren Tragfähigkeitsdefiziten und im Rahmen von Baumaßnahmen ist jedoch meist eine Kapazitätseinschränkung im Hinblick auf die Verkehrsmenge, die das Bauwerk passieren kann, erforderlich. In Abhängigkeit von der Höhe der Verkehrsbelastung können Kapazitätseinschränkungen zu effektiven Geschwindigkeitsreduktionen und ggf. Stauereignissen und in der Folge zu Reisezeitverlusten für die Verkehrsteilnehmer führen.

In Abhängigkeit von der verbleibenden Restkapazität des Bauwerks wird mindestens ein Teil der Verkehrsteilnehmer – im Falle einer Vollsperrung alle Verkehrsteilnehmer – die geplanten Ziele über Alternativrouten ansteuern.<sup>1</sup> Da sowohl im Falle von tragfähigkeitsbedingten als auch von maßnahmenbedingten Eingriffen mit längerfristigen Einschränkungen zu rechnen ist, ist davon auszugehen, dass die Verkehrsteilnehmer (nach einer gewissen Zeit) vor Antritt ihrer Fahrt wissen, dass die normale Route durch einen Kapazitätsengpass beeinträchtigt bzw. gesperrt ist. Insbesondere bei stark belasteten, überregional bedeutsamen Streckenabschnitten ist bei einer (Teil-)Sperrung mit weiträumigen Verlagerungswirkungen zu rechnen. Durch diese Verkehrsverlagerungen und die sich dadurch erhöhenden Verkehrsmengen auf den Alternativrouten werden auch nicht unmittelbar von der Bauwerks(teil)sperrung betroffene Verkehrsteilnehmer beeinträchtigt.

Die verkehrlichen Auswirkungen von verkehrseinschränkenden Maßnahmen auf das Straßennetz lassen sich quantitativ ermitteln. Die Berechnung erfolgt über Verkehrssimulationsmodelle, die in der Lage sind, den Ausfall eines Bauwerks, dessen Kapazitätseinschränkung oder eine Geschwindigkeitsreduktion im Verkehrsnetz abzubilden und die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss im Netz zu bestimmen. Dabei werden die Verkehrsströme für Pkw und Lkw durch Umlagerungsrechnungen auf das umliegende Verkehrsnetz verteilt. Im Verkehrsnetz ergeben sich vor allem absolute Veränderungen der Streckenbelastung, der Reisezeit und der Fahrleistung. Je nach Verkehrsstärke, Lage und Netzdichte hat der (Teil-)Ausfall eines Bauwerks unterschiedliche Auswirkungen. Mit Hilfe des Verkehrsmodells lassen sich die Auswirkungen sowohl für die direkt von der Sperrung betroffenen Verkehrsteilnehmer – also Verkehrsteilnehmer, bei denen das Bauwerk unmittelbar auf der geplanten Route liegt – erfassen als auch für die von der Bauwerkssperre indirekt betroffenen Verkehrsteilnehmer. In diesem Sinne können die Auswirkungen der Umwege im gesamten Netz festgestellt werden.

In Abbildung 5 werden diese Auswirkungen wie folgt dargestellt: Die verkehrlichen Einschränkungen am Bauwerk führen zu einer Reduktion der Verkehrsbelastung auf dem Bauwerk von 25.000 Kfz/Tag. In grün sind diejenigen Strecken dargestellt, welche in der Folge entlastet werden, in rot diejenigen Strecken, welche als Alternativrouten dienen und entsprechend mehr Verkehr aufnehmen.

---

<sup>1</sup> Innerhalb des Projektes wurde vereinfachend angenommen, dass keine wesentlichen Änderungen bei Ziel- und Verkehrsmittelwahl auftreten.

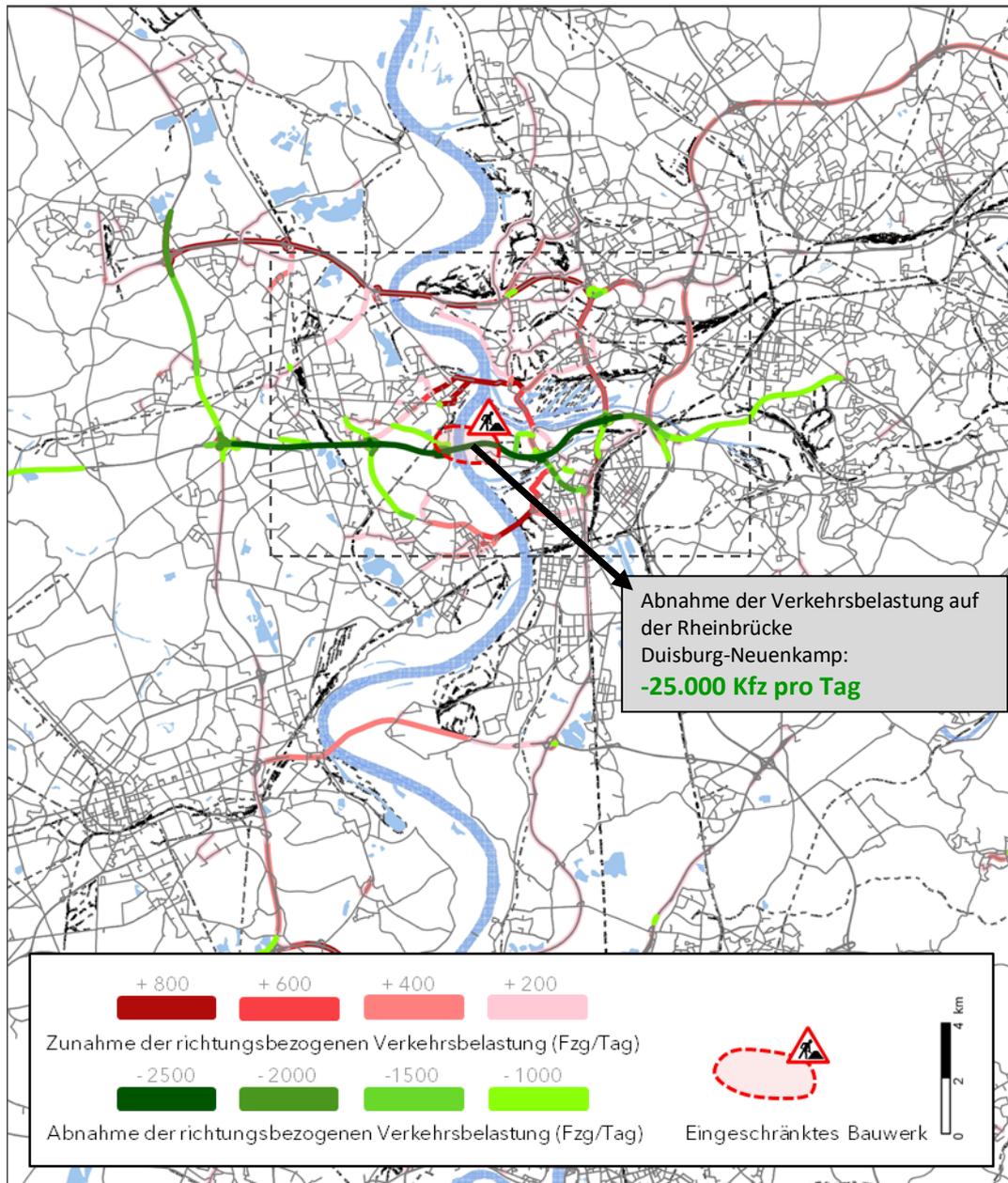


Abbildung 5: Verkehrliche Effekte einer verkehrlichen Einschränkung am Beispiel der Rheinbrücke Duisburg Neuenkamp (PTV Group)

### 3.1.2 PTV Visum und PTV Validate

Zur Ermittlung verkehrlicher bzw. gesamtwirtschaftlicher Wirkungen kommt im Rahmen des entwickelten Verfahrens die makroskopische Verkehrsplanungssoftware PTV Visum zum Einsatz. PTV Visum ist eine Software für Verkehrsanalysen, Verkehrsprognosen und eine GIS-orientierte Datenverwaltung. Sie wird beispielsweise für die Modellierung von Verkehrsnetzen und der Verkehrsnachfrage, zur Analyse der zu erwarteten Verkehrsströme sowie zur Entwicklung von Verkehrsstrategien und -lösungen angewendet.

Als Datenmodell wird die Version 7.2 des PTV-eigenen, deutschlandweiten Straßennetz- und Verkehrsmodells PTV Validate verwendet (vgl. [40]). Validate ist derzeit eines der größten Verkehrsmodelle der Welt. Das kalibrierte, prognosefähige Modell enthält Pkw- und Lkw-Belastungen für das gesamte deutsche Hauptstraßennetz und bildet auch das gesamte europäische Ausland mit ab. Die Netzlänge des für Deutschland abgebildeten Straßennetzes umfasst ca. 600.000 km.

Die Verkehrsnachfrage ist in der Version VALIDATE 7.2 in Form von fünf Quelle-Ziel-Matrizen, separat für Pkw, Lkw bis 3,5 t zGG (Lkw-S), bis 7,5 t zGG (Lkw-M), bis 12 t zGG (Lkw-L) und über 12 t zGG (Lkw-XL) hinterlegt.

Aus der Kombination von Netzmodell und der so differenzierten Verkehrsnachfrage werden mit Hilfe von PTV Visum die Belastungen der einzelnen Strecken richtungsgetreunt ermittelt. Hierbei finden sowohl offizielle Verkehrszählungen als auch existierende geeichte Verkehrsmodelle zur Kalibrierung Verwendung. Als Ergebnis liegt für jede Strecke je Richtung eine durchschnittliche tägliche Belastung unterteilt nach den oben dargestellten fünf Nachfragesegmenten (Pkw, Lkw-S, Lkw-M, Lkw-L und Lkw-XL) vor.

Abbildung 6 zeigt das in PTV Validate modellierte Straßennetz Europas sowie das Netzmodell Deutschlands.

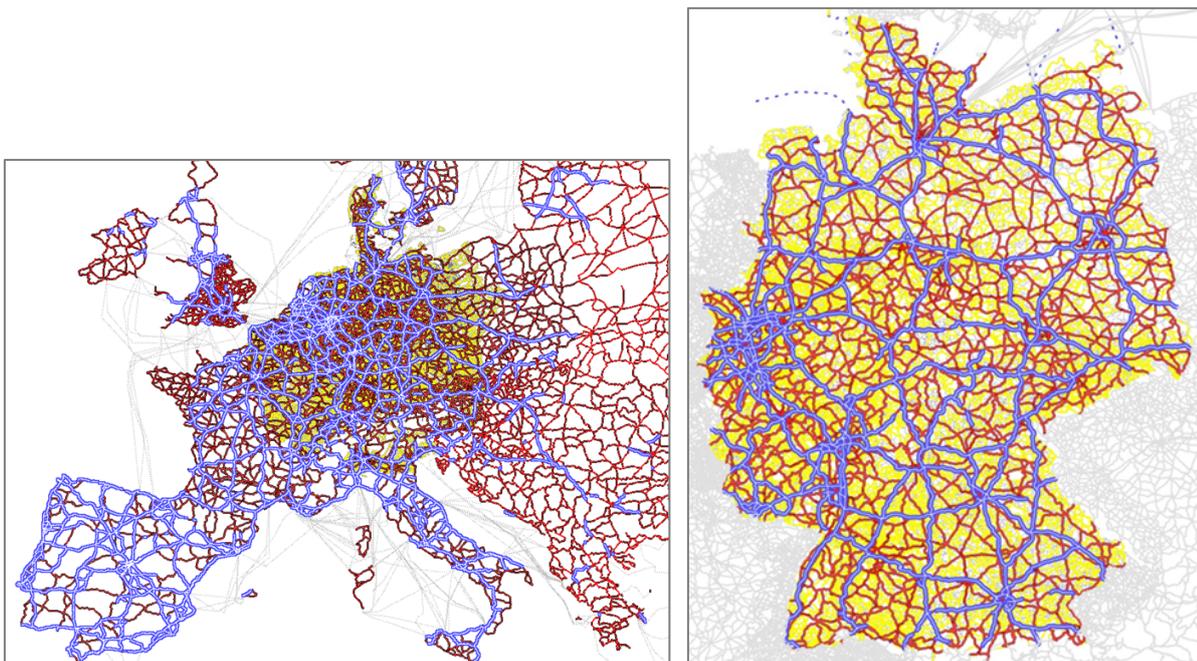


Abbildung 6: PTV Validate (PTV Group)

PTV Visum und PTV Validate werden für die folgenden Aspekte des Verfahrens angewendet:

- Im Rahmen der Vorselektion kritischer Bauwerke (vgl. Kapitel 4.2) wird PTV Validate zur Bewertung der verkehrlichen Kritikalität der Bauwerke angewendet, indem es eine Berechnung der netzweiten Effekte (Verkehrsverlagerungen) des Ausfalls von Bauwerken sowie von zustandsbedingten, d. h. aus einer Reduzierung der Leistungsfähigkeit in Folge von Tragfähigkeitsdefiziten resultierenden, Verkehrseinschränkungen ermöglicht.

- Bei der Bewertung der Maßnahmenwirkungen (vgl. Kapitel 6) werden mit Hilfe von PTV Validate sowohl die Effekte von Verkehrseinschränkungen während der Durchführung von Ertüchtigungsmaßnahmen als auch die die negativen Wirkungen von tragfähigkeitsbedingten Verkehrseinschränkungen vor der Durchführung einer Maßnahme bewertet.
- Für die Erarbeitung eines Ertüchtigungsplans werden mit Hilfe von PTV Validate die Auswirkung gleichzeitiger Verkehrseinschränkungen an mehreren Bauwerken simuliert.

### 3.1.3 Umsetzung der Verkehrssimulation

Die verkehrlichen Auswirkungen von Verkehrseinschränkungen werden im Verkehrsmodell auf der makroskopischen Ebene mit Hilfe von Umlegungsrechnungen ermittelt. Je nach Lage, Netzdichte und Straßenkategorie ergeben sich verschiedene Verkehrsverlagerungseffekte und damit unterschiedliche negative Folgen: je dichter beispielsweise das Straßennetz ist, desto mehr potenzielle Ausweichrouten stehen zur Verfügung, und die Zeitverluste werden – bei entsprechenden Kapazitätsreserven der alternativen Routen – folglich weniger signifikant. Befindet sich das Bauwerk in einem Teil des Netzes mit beschränktem Verkehrsangebot, so werden die negativen Auswirkungen wegen der größeren Umwege größer. Darüber hinaus ist bei überregional bedeutsamen Streckenabschnitten mit starker Tagesbelastung (wie z. B. die zahlreichen Pendlerautobahnen in NRW) mit erheblichen Verkehrswirkungen zu rechnen, die sich nur durch eine Umlegung abbilden lassen.

Wesentliche Grundlage der Umlegungsrechnungen bildet neben dem Netzmodell die Nachfrage, die im Validate-Teilnetz in Form einer Quelle-Ziel-Matrix separat für den motorisierten Individualverkehr (MIV) und für den Schwerverkehr bereits enthalten ist. Diese Nachfrage wird auf das Streckennetz umgelegt.

## 3.2 Gesamtwirtschaftliches Bewertungsverfahren

### 3.2.1 Zielsystem

Auf der Basis der oben dargestellten Analysen zu den verkehrlichen Wirkungen von Verkehrseinschränkungen bzw. Bauwerksausfällen können die gesamtwirtschaftlichen Effekte bewertet werden. Grundsätzlich wird dazu ein Planfall einem Bezugsfall gegenübergestellt. Die Definition der Plan- und Bezugsfälle erfolgt für das Vorselektionsverfahren und die Bewertung von Ertüchtigungsoptionen unterschiedlich und wird in den Kapiteln 4.2 und 6.2.2 dargestellt.

Bei der Auswahl der konkret zu betrachtenden Aspekte kommt dem Zielsystem des Bewertungsverfahrens eine besondere Rolle zu. Bei der Bewertung von Bauwerken unter verkehrlichen Aspekten werden mit seiner Hilfe die Erwartungen und Forderungen an das Bauwerk vor dem Hintergrund seiner Funktion im Verkehrsnetz ausgedrückt. Ein für die Bewertung der verkehrlichen Kritikalität eines Bauwerks und für die Bewertung von Ertüchtigungsoptionen geeignetes Zielsystem muss daher vielfältigen Ansprüchen gerecht werden. Insbesondere müssen Aspekte der Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. Vor dem Hintergrund dieser Ansprüche kommt ein aus drei Wirkungsbereichen bestehendes Zielsystem zur Anwendung, wobei diese die klassischen Dimensionen der Nachhaltigkeit widerspiegeln:

- Soziales: Schutz von menschlichem Leben und Sachgütern
- Ökonomie: Regionalwirtschaft (und Kosten der Ertüchtigungsoption), repräsentiert durch Reise- und Transportzeiten
- Ökologie: Umwelt, repräsentiert z. B. durch Luftschadstoffe und Klimagasemissionen (s.u.)

#### Zielsystem

für die gesamtwirtschaftliche Bewertung  
im Rahmen der Vorselektion



für die gesamtwirtschaftliche Bewertung  
von Ertüchtigungs-/Erneuerungsmaßnahmen



Abbildung 7: Darstellung der Zielsysteme im Rahmen der gesamtwirtschaftlichen Bewertung

Das daraus abgeleitete Bewertungsverfahren umfasst Kriterien zur Beschreibung bzw. Berechnung der gesamtwirtschaftlichen Wirkungen aus den drei Wirkungsbereichen, die sich aus den in Kapitel 3.1 dargestellten verkehrlichen Aspekten ableiten lassen.

Über ein Verfahren zur Wertsynthese werden die Teilergebnisse der einzelnen Kriterien zu einem Gesamtergebnis zusammengeführt.

## 3.2.2 Bewertungskriterien

### 3.2.2.1 Grundlagen

Die verkehrlichen und gesamtwirtschaftlichen Wirkungen, die sich durch die (Teil-) Sperrung von Bauwerken aufgrund verkehrseinschränkender Maßnahmen oder aufgrund der Durchführung von Ertüchtigungsmaßnahmen ergeben, können anhand von geeigneten Kriterien beschrieben werden. Die Kriterien wurden unter folgenden Aspekten bestimmt:

- Es wurden aussagekräftige Größen im Hinblick auf das oben dargestellte Zielsystem ausgewählt. Dabei wurde auf Erfahrungen bei der gesamtwirtschaftlichen Bewertung von verkehrlichen Maßnahmen zurückgegriffen.
- Insbesondere wurden die Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben SKRIBT<sup>Plus</sup> (vgl. [35] und [36]) genutzt. Das angewendete Kritikalitätsverfahren wird – aufgrund der prinzipiell ähnlichen Fragestellung – als grundsätzlich geeignet zur Beurteilung der verkehrlichen Kritikalität im Zuge der Vorselektion zur Ertüchtigungsplanung sowie zur Bewertung von Ertüchtigungsoptionen eingeschätzt.

- Da mit dem Verfahren die Bewertung einer Vielzahl von Bauwerken möglich sein soll, wurden Kriterien ausgewählt, deren Berechnung automatisiert über die Verkehrsmodellierungssoftware PTV Visum in Kombination mit Microsoft Excel mit handhabbaren Rechenzeiten möglich ist. Aus diesem Grund wurde auch die Anzahl der Kriterien auf ein praktikables Maß beschränkt.

Die Kriterienauswahl sowie die Methodik zu deren Berechnung berücksichtigen die neuesten Erkenntnisse aus der Bewertungsmethodik der Bundesverkehrswegeplanung 2030. Hier ergab sich gegenüber dem SKRIBT<sup>Plus</sup>-Verfahren im Detail ein Anpassungsbedarf. Dieser resultierte im Wesentlichen daraus, dass die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP), eines der maßgeblichen Bewertungsverfahren der strategischen Verkehrsplanung, mit dem Bundesverkehrswegeplan 2030 eine Erneuerung erfahren hat. Die Darstellung dieser Methodik erfolgt im Rahmen des Methodenhandbuchs zur Bundesverkehrswegeplanung (vgl. [38]).

Die zur Bewertung der gesamtwirtschaftlichen Wirkungen herangezogenen Kriterien liegen nach der Berechnung zunächst in unterschiedlichen originären Einheiten vor. Um diese auf eine einheitliche Bezugsgröße zu transformieren kommt ein Wertsyntheseverfahren zum Ansatz. Wie im Forschungsvorhaben SKRIBT<sup>Plus</sup> erprobt, wird für das Verfahren zur Vorselektion sowie für das Verfahren zur Bewertung der Ertüchtigungsoptionen ein monetäres Wertegerüst zur Wertsynthese herangezogen. Für die Monetarisierung werden die entsprechenden Kostensätze der Bundesverkehrswegeplanung 2030 verwendet.

Im Folgenden werden die Bewertungskriterien sowie ihre Berechnung erläutert.

### 3.2.2.2 Mehrreisezeit (→ Wirkungsbereich „Regionalwirtschaft“)

#### Definition

Eine Kenngröße für die Bewertung der gesamtwirtschaftlichen Wirkungen ist die Veränderung der Reisezeit im Netz im Vergleich Planfall/Bezugsfall. Zusätzliche Reisezeiten von Personen können von diesen nicht zu anderen, ggf. auch produktiven Zwecken genutzt werden. Unter gesamtwirtschaftlichen Aspekten entstehen dadurch Kosten. Auch im Güterverkehr sind Transportzeiten mit Kosten verbunden, da einerseits die Güter während der Transportzeit Kapital binden, das nicht produktiv eingesetzt werden kann, und andererseits die Lohnkosten der Fahrer zu Buche schlagen.

Zur Ermittlung der Mehrreisezeit wird die Summe der Fahrzeugstunden über alle Strecken im Netz ermittelt. Die bezugs- und planfallspezifische Verkehrsbeteiligungsdauer ergibt sich aus der Multiplikation der Streckenbelastung und der streckenbezogenen aktuellen Reisezeit. Die Mehrreisezeit lässt sich durch die absolute Veränderung der Reisezeiten zwischen den Netzzuständen des Bezugsfalls und der Planfälle ermitteln. Die vollständige Reisezeitberechnung umfasst sowohl die erhöhten Reisezeiten im Streckenabschnitt mit Verkehrseinschränkungen als auch die erhöhten Reisezeiten auf den Ausweichrouten (s.o.).

#### Wertansätze

Für die Berechnung der Mehrreisezeitkosten muss zwischen dem Pkw- und dem Lkw-Verkehr differenziert werden. Beim Pkw-Verkehr wird darüber hinaus zwischen gewerblichem und nicht-gewerblichem Verkehr unterschieden.

Pkw

Für den nicht-gewerblichen Pkw-Verkehr wurden die Werte verwendet, die in der aktuellen Bundesverkehrswegeplanung angegeben sind. Der entsprechende Kostensatz beträgt aggregiert über die Fahrtzwecke Arbeit, Freizeit und Einkauf sowie alle Verkehrsmittel und Entfernungsklassen 4,32 EURO/Pers-h [38].

Für den gewerblichen Personenverkehr wurde ein Kostensatz in Höhe von 32,60 EURO/Pers-h verwendet. Dies entspricht laut Statistischem Bundesamt den durchschnittlichen Arbeitskosten des Jahres 2015 je Arbeitsstunde (vgl. [16]). Hier wurde gegenüber dem BVWP-Verfahren eine Vereinfachung vorgenommen, da die dort verwendeten Kostensätze entfernungsabhängig angegeben werden und eine entfernungsabhängige Berechnung der Reisezeiten einen deutlichen Mehraufwand bedeutet hätte.

Da die Zeitkostensätze im Pkw-Verkehr personenstundenbezogen vorliegen, die zugrunde liegenden Kenngrößen aus Visum dagegen in Fahrzeugstunden ausgewiesen sind, erfolgte eine Umrechnung durch den von MID 2008 und MID 2017 angegebenen durchschnittlichen Besetzungsgrad von 1,5 Personen/ Fahrzeug (vgl. [23][24]). Der Anteil des gewerblichen Pkw-Verkehrs an der Gesamt-Pkw-Verkehrsleistung wird mit 14,2 % [38] angesetzt.

Lkw

Beim Güterverkehr setzen sich die zeitabhängigen Kosten gemäß der BVWP-Methodik aus folgenden Komponenten zusammen:

- Personalkosten: Über alle Fahrzeugtypen ergibt sich gemäß BVWP ein über die durchschnittliche Jahresfahrleistung gemittelter Wert von 18,30 EURO/Fzg-h [38].
- Veränderung der Transportzeit der Ladung: Der Kostensatz beträgt 6,88 EURO/Fzg-h und es wird von einem Beladungsfaktor von 0,7 ausgegangen [38].

**Berechnung**

$$\begin{aligned}
 & \text{Summe Fzg-h (nicht-gewerbliche Pkw)} \times \\
 & \quad \text{Besetzungsgrad Pkw (MID)} \times \\
 & \quad \text{Kostensatz Mehrreisezeiten (BVWP)} \\
 & \quad + \\
 & \quad \text{Summe Fzg-h (gewerbliche Pkw)} \times \\
 & \quad \text{Besetzungsgrad Pkw (MID)} \times \\
 & \quad \text{Kostensatz Mehrreisezeiten (DESTATIS - Arbeitskosten)} \\
 & \quad + \\
 & \quad \text{Summe Fzg-h (Lkw)} \times \\
 & \quad [\text{Kostensatz Personalkosten (BVWP)} + \\
 & \quad \text{Kostensatz Transportzeit Ladung (BVWP)} \times \text{Beladungsfaktor (BVWP)}]
 \end{aligned}$$

**Rot: Output Verkehrsmodell**

### 3.2.2.3 Luftschaadstoff- und Klimagasemissionen → Wirkungsbereich „Umwelt“

#### Definition

Die veränderte Verkehrssituation verursacht insgesamt nicht nur erhöhte Reisezeiten im Netz, sondern auch veränderte Luftschaadstoff- und Klimagasemissionen.

Die Abgasemissionen der Fahrzeuge enthalten Luftschaadstoffe, die eine negative Wirkung auf Mensch und Umwelt entfalten. Außerdem werden außerdem Treibhausgase freigesetzt, die zu einem Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre führen. Dieser Anstieg ist unter anderem verantwortlich für die durch den Menschen verursachte Erwärmung der Erdoberfläche und trägt damit wesentlich zum Klimawandel bei. Luftschaadstoffe und Klimagasemissionen verursachen gesamtwirtschaftliche Kosten, z. B. im Bereich der Gesundheitskosten.

Die BVWP-Methodik berücksichtigt die folgenden sechs Schadstoffarten:

- Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)
- Stickoxid (NO<sub>x</sub>)
- Partikel (PM)
- Kohlenwasserstoff (HC)
- Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)
- Kohlenstoff (CO)

Zur Berechnung der Höhe der Emissionen werden Emissionsfaktoren des „Handbuchs für Emissionsfaktoren“ (HBEFA 3.3) verwendet. Die Emissionsfaktoren sind als Zusatzmodul in der makroskopischen Simulationssoftware PTV Visum integriert. Dies ermöglicht eine vollständige, automatisierte Emissionsberechnung. Im Rahmen des Verfahrens werden die o.g. Schadstoffe separat für die Fahrzeugschichten des motorisierten Individualverkehrs sowie für den Schwerverkehr ausgewertet:

Die Emissionsfaktoren werden streckenbezogen aus dem Datenpool des HBEFA ausgewählt. Die Auswahl erfolgt in Abhängigkeit von der Verkehrssituation und der Fahrzeugkombination (Schwerverkehr und Leichtverkehr mit den eingesetzten Emissionskonzepten) der Strecke. Die tabellierten Emissionsfaktoren weisen dabei erhebliche Unterschiede auf. Insofern haben die strecken- und fahrzeugbezogenen Parameter einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der emittierten Schadstoffe. Folgende Aspekte werden bei der Berechnung der Emissionskennwerte berücksichtigt.

- Streckenklasse (z. B. Autobahn oder Kreisstraße) mit Geschwindigkeitsprofil
- Lage (städtisch oder ländlich)
- Streckenauslastung (Level of Service) mit vordefinierten Klassengrenzen
- Nachfragesegmentspezifische Belastung
- Verkehrszusammensetzung für die Nachfragesegmente Schwer- bzw. Leichtverkehr mit Bezug zur Kraftstoffart, Größenklasse, Emissionsstufe.

Aus dem aktuellen Level of Service (Auslastung), der Lage (städtisch oder ländlich) und der im Vorfeld definierten, den Strecken zugeordneten HBEFA-Streckenklasse (bzw. der aus dem eingestellten Streckenattribut ermittelte Geschwindigkeitsklasse) ergibt sich für jede angewendete Fahrzeugkombination ein Emissionsfaktor. Dieser Faktor entspricht der spezifischen Verkehrssituation und wird mit der aktuellen nachfragespezifischen Streckenbelastung und der Länge der Strecke multipliziert und als relevante Schadstoffemission für jede Strecke ausgegeben. Als Ergebnis werden die absoluten Emissionswerte in Tonnen über alle Straßen summiert.

### Wertansätze

Die Werte zur Monetarisierung der Klimagas- und Luftschadstoffemissionen wurden dem Methodenhandbuch des BVWP 2030 entnommen (vgl. Tabelle 1). Zur Monetarisierung der Emissionen werden die einzelnen Werte mit den Schadenskostensätzen multipliziert und aufaddiert.

Schadstoffart	Spezifische Schadenskosten [€/t] beim Betrieb von Verbrennungsmotoren	
	innerorts	außerorts
NO <sub>x</sub>	15.400	15.400
CO	62	62
CO <sub>2</sub>	145	145
HC	1.700	1.700
Partikel (PM)	364.100	122.800
SO	13.200	13.200

Tabelle 1: Spezifische Schadenskosten für Abgasemissionen beim Betrieb von Verbrennungsmotoren (Quelle: [38], S. 111)

### Berechnung

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{t\ NO_x} \times \text{Schadenskostensatz NO}_x \text{ (BVWP)} + \\
 & \quad + \\
 & \mathbf{t\ CO} \times \text{Schadenskostensatz CO (BVWP)} \\
 & \quad + \\
 & \mathbf{t\ CO_2} \times \text{Schadenskostensatz CO}_2 \text{ (BVWP)} \\
 & \quad + \\
 & \mathbf{t\ HC} \times \text{Schadenskostensatz HC (BVWP)} \\
 & \quad + \\
 & \mathbf{t\ SO} \times \text{Schadenskostensatz SO (BVWP)} \\
 & \quad + \\
 & \mathbf{t\ PM (innerorts)} \times \text{Schadenskostensatz PM - innerorts (BVWP)} \\
 & \mathbf{t\ PM (außerorts)} \times \text{Schadenskostensatz PM - außerorts (BVWP)}
 \end{aligned}$$

**Rot: Output Verkehrsmodell**

### 3.2.2.4 Unfallgeschehen → Wirkungsbereich „Schutz von menschlichem Leben und Schutzgütern“

#### Definition

Trotz rückläufiger Unfallzahlen auf Deutschlands Straßen in den letzten Jahrzehnten, ereigneten sich 2017 immer noch rd. 2,6 Mio. Unfälle mit ca. 390.000 verletzten und über 3.000 getöteten Verkehrsteilnehmern [17]. Durch Unfälle werden gesamtwirtschaftliche Kosten z. B. im Gesundheitssystem verursacht.

Im Zuge der hier betrachteten Fragestellungen ergibt sich ein verändertes Unfallgeschehen aus der veränderten Fahrleistung sowie der Nutzung unfallträchtigerer Straßenkategorien (Landstraßen, Innerortsstraßen) auf Alternativrouten in Folge einer Bauwerks(teil)sperrung. Das Unfallgeschehen lässt sich nach Unfällen mit Personenschäden und solchen mit Sachschäden unterteilen.

In der BVWP-Bewertungsmethodik erfolgt die Berechnung der Unfallkosten über streckentypspezifische, fahrleistungsbezogene Unfallkostenraten.

#### Wertansätze für das Unfallgeschehen

Im BVWP 2030 erfolgt die Berechnung der Nutzenkomponente „Veränderung der Verkehrssicherheit (NS)“ über fahrleistungsbezogene Unfallkostenraten [€/Tsd. Fz-km]. Die fahrleistungsbezogenen Unfallkostenraten basieren auf differenzierten Wertansätzen für Personen- und Sachschäden. Die Wertansätze für unfallbedingte Personenschäden umfassen.

(1) den Ressourcenverzehr und

(2) die Risk-Value-Komponente,

also

(1) die Kosten für die Bewältigung der Unfallfolgen und den Produktionsausfall der geschädigten Personen und

(2) die durchschnittliche Zahlungsbereitschaft der Bevölkerung für die Senkung des Risikos, selbst bei einem Unfall zu sterben oder verletzt zu werden oder dass dies Freunden und Verwandten geschieht.

Die Wertansätze für Sachschäden umfassen die entsprechenden Schadenskosten.

Die Unfallkostenraten werden unter Berücksichtigung des Streckentyps (planfrei, plangleich oder Tunnelstrecke mit/ohne Fahrtrichtungstrennung; Kennziffer 1), der räumlichen Lage der Strecke (innerhalb von bebauten Gebieten oder außerhalb; Kfz-Straße) und dem Vorhandensein eines Seitenstreifens (Kennziffer 2) sowie der Anzahl der Fahrspuren je Richtung (Kennziffer 3) ermittelt (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 9).

Streckentyp:		2. Ziffer = →		3. Ziffer Fahrspuren je Richtung													
		1. Ziffer = ↓															
		1	1	21,92	25,66	21,92	25,66								4		
		2	2	20,67	25,66	20,67	25,66									3	
			3	3	21,92	25,66	21,92	25,66								3	
			4	4	20,67	25,66	20,67	25,66									2
				3	3	37,84		82,62		37,84				82,62			4
				2	2	31,63	31,63	82,62	82,62	31,63	31,63	82,62	82,62				
		1	1											82,62		4	
		4	4											120,44			
			3	3					31,63					120,44			
			2	2	31,63	31,63	120,44	120,44	31,63	31,63	120,44	120,44					
				1	1	57,40	66,17	101,20	101,20	57,40	66,17	101,20	101,20				
				4	4	9,11		9,11								17,57	
		3	3	9,11	14,36	9,11	14,36						17,57				
		2	2	9,11	14,36	9,11	14,36							17,57			
			1	1													
			4	4													
		3	3														
		2	2			17,657	17,57					17,57	17,57				
				8,83	10,29	15,09	15,09	8,83	10,29	15,09	15,09					1	

Abbildung 8: BVWP 2030: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values in €/Tsd. Fzg-km (Quelle: [38] S. 149)



Zur Berechnung des Kriteriums wurde den im PTV Validate-Verkehrsmodell zugrundeliegenden Streckentypen jeweils der am besten passende BVWP-Streckentyp zugewiesen. Da zur realitätsnahen Abbildung der Verkehrsverlagerungen im ausgewählten Untersuchungsraum mit überregionaler und internationaler Bedeutung ein möglichst großes Teilnetz ausgeschnitten wurde, umfasst dieser Netzausschnitt auch angrenzende holländische und belgische Straßensegmente. Für diese Straßenelemente werden die gleichen Unfallkostenraten angesetzt, die auch für das deutsche Straßennetz verwendet wurden.

### 3.3 Anwendungsbeispiel: Verkehrsmodellierung und Bewertungsmethodik

#### 3.3.1 Aufbereitung des Verkehrsmodells

Aus dem Verkehrsmodell wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Teilnetz generiert (vgl. Abbildung 10). Der Untersuchungsraum wurde so ausgeschnitten, dass die Verkehrsverlagerungseffekte auf Ausweichrouten weiträumig abgebildet werden können. Insgesamt besteht der Netzmodellausschnitt aus etwa 1,4 Millionen Streckenabschnitten, die etwa 170.000 km Netzlänge entsprechen. So können alle Ausweichrouten, die die Verkehrsteilnehmer wegen eines Bauwerks(teil)ausfalls wählen, realitätsnah abgebildet werden. Das Netzmodell umfasst das Hauptstraßennetz; Straßen des untergeordneten Verkehrsnetzes, die reinen Erschließungscharakter haben, sind im Modell nicht enthalten. Das Modell umfasst neben dem Bundesland Nordrhein-Westfalen die angrenzenden Bereiche aus den benachbarten Bundesländern sowie Teile der Nachbarstaaten Niederlande und Belgien.

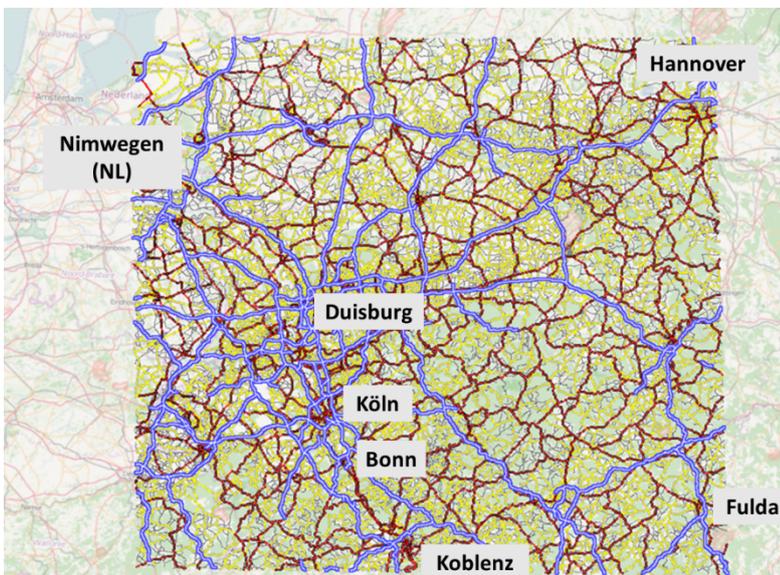


Abbildung 10: Teilnetz (PTV Group)

Die automatisierte Ausführung der im Projekt anzuwendenden Verfahren setzt eine Verortung der Bauwerke im Netzmodell voraus. So wurden alle auf den Nachrechnungslisten des Bundes dargestellten Bauwerke in Nordrhein-Westfalen über die in SIB-Bauwerke hinterlegten Geokordinaten im Verkehrsmodell verortet (vgl. Abbildung 11). Darunter befanden sich auch die für das Anwendungsbeispiel detailliert zu untersuchenden Bauwerke (vgl. Kapitel 2.4).

Die Verortung der Bauwerke erfolgte teilautomatisiert. Es kam der Mapmatching-Algorithmus von PTV Visum zur Anwendung. Ein händisches Nacharbeiten war jedoch insbesondere an Bauwerken im Zuge von Autobahnkreuzen o. ä. erforderlich.

Je Bauwerk wurde eine Strecke des Netzmodells als „Brückenstrecke“ gekennzeichnet. Auf diesen Strecken wurden zunächst einige ausgewählte Informationen (Inhalte aus SIB-Bauwerke) in Form benutzerdefinierter Attribute hinterlegt.

Zusätzlich wurden punktförmige „Points of Interest“ (PoI) an den jeweiligen Brückenstandorten definiert. Die Bauwerksinformationen können auch auf diesen PoI hinterlegt werden (vgl. Abbildung 12).

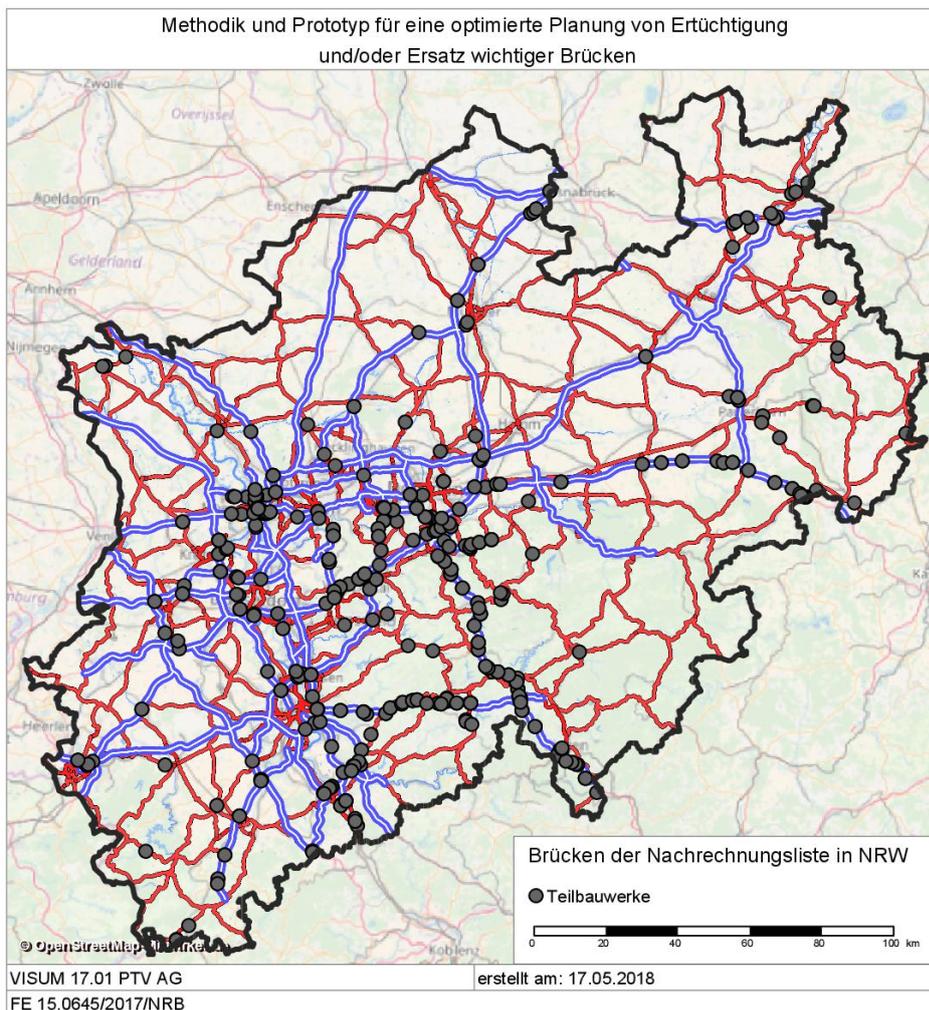


Abbildung 11: Im Netzmodell verortete Bauwerke: Bauwerke der Nachrechnungsliste Nordrhein-Westfalen (PTV Group)

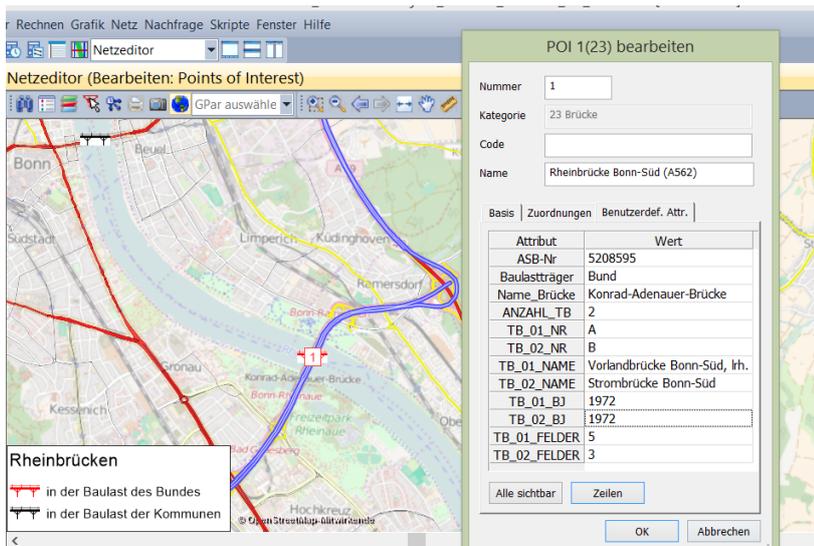


Abbildung 12: Im Netzmodell hinterlegte Bauwerksinformationen (PTV Group)

## 4 Vorselektion relevanter Bauwerke

### 4.1 Einführung

Bei der Auswertung einer durch die BASt in den Jahren 2008/2009 durchgeführten bundesweiten Erhebung der Bestands- und Zustandsdaten von Brücken in der Baulast des Bundes wurden ca. 2.200 Teilbauwerke (davon rd. 1.260 an Bundesautobahnen und 930 an Bundesstraßen) identifiziert, die mit höchster Priorität nachzurechnen bzw. im Hinblick auf ihre Tragfähigkeit zu überprüfen sind. Entsprechend der Nachrechnungsrichtlinie nachgerechnet ist bislang nur ein kleiner Teil dieser Bauwerke, und es ist absehbar, dass die Nachrechnung aller Bauwerke sich über einen Zeitraum von mehreren Jahren erstrecken wird. Um nun Entscheidungen darüber treffen zu können, welche Bauwerke prioritär nachzurechnen wären bzw. um frühzeitig auch andere besonders kritische Bauwerke (z. B. kommunale bzw. mit der BASt-Liste nicht berücksichtigte Bauarten) identifizieren und in ein Verfahren zur Maßnahmenplanung auf Teilnetzebene einbeziehen zu können, benötigen die Baulastträger ein entsprechendes Verfahren zur Vorselektion relevanter Bauwerke. Dieses Verfahren soll neben rein baulichen auch gesamtwirtschaftliche bzw. netzbezogene Aspekte berücksichtigen.

Das Ziel der Vorselektion besteht in der Einschätzung des Ausfallrisikos einer Brücke, d. h. der Kombination aus der Wahrscheinlichkeit eines vollständigen oder teilweisen Ausfalls einer Brücke im Sinne einer zu erwartenden Ertüchtigungsmaßnahme mit entsprechender Verkehrseinschränkung (auf Basis baulicher Kriterien in Verbindung mit verkehrlicher Belastung) und dem damit verbundenen gesamtwirtschaftlichen Schaden (auf Basis einer verkehrlichen Wirkungsbeziehung). Sofern bereits verkehrliche Einschränkungen aufgrund baulicher Randbedingungen (z. B. eingeschränkte Tragfähigkeit, schlechte Zustandsbewertung) vorliegen, werden diese berücksichtigt. Prognostiziert werden diesbezügliche verkehrliche Einschränkungen im Rahmen der Vorselektion jedoch nicht.

## 4.2 Verkehrliche Vorselektion

### 4.2.1 Kriterien zur Bewertung der verkehrlichen Kritikalität

Dem Verfahren zur Planung optimierter Ertüchtigungsprogramme ist die sogenannte verkehrliche Vorselektion der Bauwerke im Teilnetz, mit der die verkehrliche Kritikalität der Bauwerke bewertet wird, vorgelagert. Dafür werden die folgenden Kriterien herangezogen:

- die verkehrliche Bedeutung des Bauwerks im Netz sowie
- die Auswirkungen bestehender tragfähigkeitsbedingter Verkehrseinschränkungen.

Diese vorangestellte Analyse soll dem Anwender des Verfahrens einen ersten Eindruck davon geben, wo in seinem Teilnetz die unter verkehrlichen Aspekten problematischen Bauwerke sind. Auf diese kann dann im weiteren Verlauf der Planung ein besonderes Augenmerk gelegt werden.

#### 4.2.1.1 Verkehrliche Bedeutung des Bauwerks im Netz

Ein Bauwerk ist verkehrlich umso bedeutender, je höher die Verkehrsnachfrage ist und je eingeschränkter die Verlagerungsmöglichkeiten im Falle des Ausfalls des Bauwerks sind. D. h.:

- Ein Bauwerk mit niedrigem Verkehrsaufkommen ist unter verkehrlichen Aspekten weniger kritisch einzustufen als ein Bauwerk mit hohem Verkehrsaufkommen.
- Ein Bauwerk, für das gute Umfahrungsmöglichkeiten im umliegenden Verkehrsnetz (d. h. ohne das Erfordernis großer Umwege und mit ausreichender Kapazität, um zusätzlichen Verkehr aufzunehmen) bestehen, ist unter verkehrlichen Aspekten weniger kritisch einzustufen als ein Bauwerk mit eingeschränkten Umfahrungsmöglichkeiten.

Für verkehrlich bedeutsame Bauwerke gilt eine höhere Priorität im Hinblick auf Ertüchtigungs- und Erneuerungsmaßnahmen, um das Risiko tragwerksbedingter Verkehrseinschränkungen zu reduzieren. Jedoch ist bei verkehrlich bedeutenden Bauwerken während der Maßnahmendurchführung aufgrund der erforderlichen Verkehrseinschränkungen auch mit starken Beeinträchtigungen und Folgewirkungen zu rechnen.

Zur Bewertung der verkehrlichen Bedeutung kommt das in Kapitel 3.2 und 3.2.2 dargestellte gesamtwirtschaftliche Bewertungsverfahren zum Ansatz. Dazu wird der hypothetische Planfall (das Bauwerk steht nicht zur Verfügung) dem Bezugsfall (das Bauwerk steht ohne verkehrliche Einschränkungen zur Verfügung) gegenübergestellt. Berechnet werden die aufgrund der negativen Wirkungen durch das nicht zur Verfügung stehende Bauwerk entstehenden gesamtwirtschaftlichen Kosten, die sich aus den Komponenten Reisemehrzeiten, Schadstoff- und Klimagasemissionen sowie Unfälle zusammensetzen. Der Bauwerksausfall wird grundsätzlich für den Betrachtungszeitraum eines Tages bewertet, eine Hochrechnung auf einen längeren Zeitraum ist nicht erforderlich, um einen Vergleich zwischen Bauwerken zu ermöglichen.

#### 4.2.1.2 Zustandsbedingte Verkehrseinschränkungen am Bauwerk

Bei bereits stark in ihrer Tragfähigkeit eingeschränkten Bauwerken werden, um weitere Schäden am Bauwerk zu vermeiden bzw. um die Verkehrssicherheit nicht zu gefährden, teilweise verkehrliche Kompensationsmaßnahmen angeordnet. Die Auswirkungen relevanter verkehrlicher

Kompensationsmaßnahmen werden im Rahmen des zweiten verkehrlichen Kriteriums bewertet, das aus zwei Teilkriterien besteht.

### **a) Gesamtwirtschaftliche Folgen verkehrlicher Kompensationsmaßnahmen**

Mit dem ersten Teilkriterium werden die gesamtwirtschaftlichen Folgen verkehrlicher Kompensationsmaßnahmen bewertet. Dazu kommt wiederum das in Kapitel 3.2 und 3.2.2 dargestellte Bewertungsverfahren zum Ansatz. Der Planfall repräsentiert die Situation mit der verkehrlichen Kompensationsmaßnahme. Dieser wird dem Bezugsfall (Situation ohne verkehrliche Einschränkung) gegenübergestellt. Berechnet werden die aufgrund der negativen Wirkungen durch die verkehrliche Kompensationsmaßnahme entstehenden gesamtwirtschaftlichen Kosten, die sich aus den Komponenten Reisemehrzeiten, Schadstoff- und Klimagasemissionen sowie Unfälle zusammensetzen. Der Betrachtungszeitraum umfasst wiederum einen Tag.

Insbesondere die Sperrung für Lkw hat relevante verkehrliche Auswirkungen durch Verkehrsverlagerungen auf Alternativrouten und die damit verbundenen Effekte. Ein prominentes Beispiel dieser Maßnahme mit weitreichenden, öffentlich diskutierten Folgen stellt die Sperrung der Leverkusener Rheinbrücke für den Lkw-Verkehr dar. Daneben stellt die Einschränkung der Fahrstreifenanzahl auf einem Bauwerk eine verkehrlich relevante Kompensationsmaßnahme dar. Denn dies führt in der Regel zu vermehrter Staubildung im Umfeld des Bauwerks sowie ggf. zu Verlagerungen auf Alternativrouten.

Dieses Kriterium wird für solche Bauwerke berechnet, für die bereits entsprechende verkehrliche Kompensationsmaßnahmen angeordnet wurden bzw. eine solche Anordnung unmittelbar bevorsteht.

### **b) Anzahl baulich kritischer Bauwerke auf Alternativrouten bei verkehrlichen Kompensationsmaßnahmen**

Vor dem Hintergrund einer netzweiten Betrachtung der Ertüchtigungsplanung spielen unter verkehrlichen Aspekten auch die aufgrund einer Bauwerkssperrung durch die Verkehrsteilnehmer gewählten Alternativrouten – und insbesondere die auf diesen Alternativrouten liegenden Bauwerke mit Tragfähigkeitsdefiziten – eine Rolle. Unter Tragfähigkeitsaspekten ist insbesondere eine Erhöhung des Schwerlastverkehrs problematisch, hingegen ist eine höhere Belastung mit Pkw in der Regel unkritisch.

Vor diesem Hintergrund wird mit dem zweiten Teilkriterium für diejenigen Bauwerke im Teilnetz, für die verkehrliche Kompensationsmaßnahmen angeordnet wurden, berechnet, auf wie vielen Bauwerken mit Tragfähigkeitsdefiziten<sup>2</sup> auf dessen Alternativrouten sich die Anzahl der Lkw um einen bestimmten Schwellwert erhöht.

---

<sup>2</sup> Standardmäßig werden alle Bauwerke betrachtet, welche auf der Nachrechnungsliste der BAST verzeichnet sind. Denn für diese Bauwerke ist davon auszugehen, dass sie tragfähigkeitsbedingte Defizite aufweisen können.

## 4.2.2 Maßzahl zur Bewertung der verkehrlichen Kritikalität im Rahmen der Vorselektion

Die verkehrliche Kritikalität kann also anhand der folgenden drei Größen beschrieben werden:

- **A.** Gesamtwirtschaftliche Kosten bei Vollsperrung des Bauwerks  
→ Bewertung der verkehrlichen Bedeutung des Bauwerks im Netz
- **B.** Gesamtwirtschaftliche Kosten bei verkehrseinschränkenden Maßnahmen  
→ Bewertung der Auswirkungen bestehender tragfähigkeitsbedingter Verkehrseinschränkungen
- **C.** Anzahl der baulich kritischen Bauwerke auf Alternativrouten  
→ Bewertung der Netzinterdependenzen im Falle bestehender tragfähigkeitsbedingter Verkehrseinschränkungen

Die Aggregation der drei Kriterien zu einem verkehrlichen Vorselektionsmaß erfolgt durch die folgende Verknüpfung der monetarisierten Größen (gesamtwirtschaftliche Kosten) mit der nicht-monetarisierbaren Größe (Anzahl Bauwerke):

$$A + [B * (C + 1)]$$

Es werden also die durch aktuell bestehende Verkehrseinschränkungen verursachten gesamtwirtschaftlichen Kosten mit der Anzahl der baulich kritischen Bauwerke auf Alternativrouten gewichtet  $[B * (C+1)]^3$ . Dieser Wert wird zu den gesamtwirtschaftlichen Kosten, welche durch einen Bauwerksausfall entstehen würden, hinzuaddiert.

Zusätzlich zu dieser aggregierten Maßzahl wird eine kardinalskalierte Maßzahl gebildet: Dem Bauwerk mit dem höchsten Kritikalitätswert wird der Wert 100 zugeordnet. Alle anderen Bauwerke im untersuchten Teilnetz werden entsprechend der Höhe ihres Kritikalitätsmaßes in die Skala zwischen 0 und 100 eingeordnet.

## 4.2.3 Anwendungsbeispiel: Verkehrliche Vorselektion

Im Anwendungsbeispiel wurden zunächst für alle Projektbauwerke die gesamtwirtschaftlichen Kosten berechnet, welche sich aufgrund einer Vollsperrung pro Tag ergeben würden. (Kriterium A)

Für diejenigen Bauwerke an denen aktuell Verkehrseinschränkungen bestehen, wurden die sich daraus pro Tag ergebenden gesamtwirtschaftlichen Kosten berechnet. Dies trifft im Beispielnetz nur auf die Rheinbrücke Leverkusen zu, für die eine tragfähigkeitsbedingte Sperrung für den Schwerverkehr sowie eine gegenüber dem Basisfall auf 85 % eingeschränkte Kapazität abgebildet wurde. (Kriterium B)

<sup>3</sup> Um das Betrachtungsbauwerk selbst mit einzubeziehen wird als Multiplikationsfaktor die Anzahl der Brücken + 1 zu verwenden. So wird auch vermieden, dass Bauwerke, bei denen sich keine baulich kritischen Bauwerke auf den Alternativrouten befinden, aufgrund der Multiplikation mit Null hinsichtlich ihrer verkehrlichen Kritikalität insgesamt mit „Null“ bewertet werden.

Für die Rheinbrücke Leverkusen wurde zudem berechnet, auf wie vielen Bauwerken sich durch die bestehenden Einschränkungen eine Erhöhung der Schwerverkehrsbelastung im Querschnitt um mehr als 30 % ergibt. (Kriterium C)

Es wurden alle Bauwerke in NRW, welche auf der Nachrechnungsliste verzeichnet sind, in die Betrachtung einbezogen. Kommunale Bauwerke wurden im Rahmen der Beispielrechnungen nicht berücksichtigt. Die Belastungswerte aller zu einer ASB-Nummer gehörenden Strecken wurden aggregiert. Der Schwellenwert für die Lkw-Belastung wurde auf eine Zunahme um mehr als 30 % gesetzt.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 13 bis Abbildung 15 dargestellt.

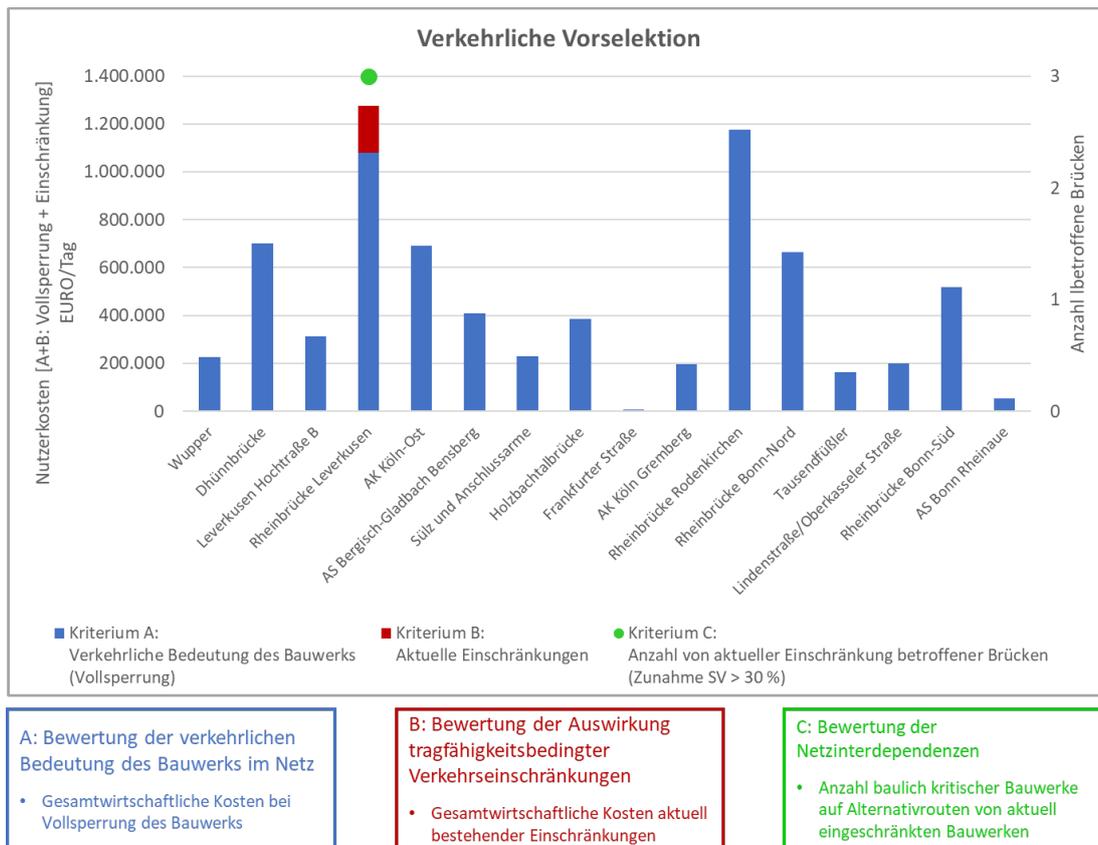


Abbildung 13: Ergebnis der Vorselektion unter verkehrlichen Aspekten: Einzelwerte

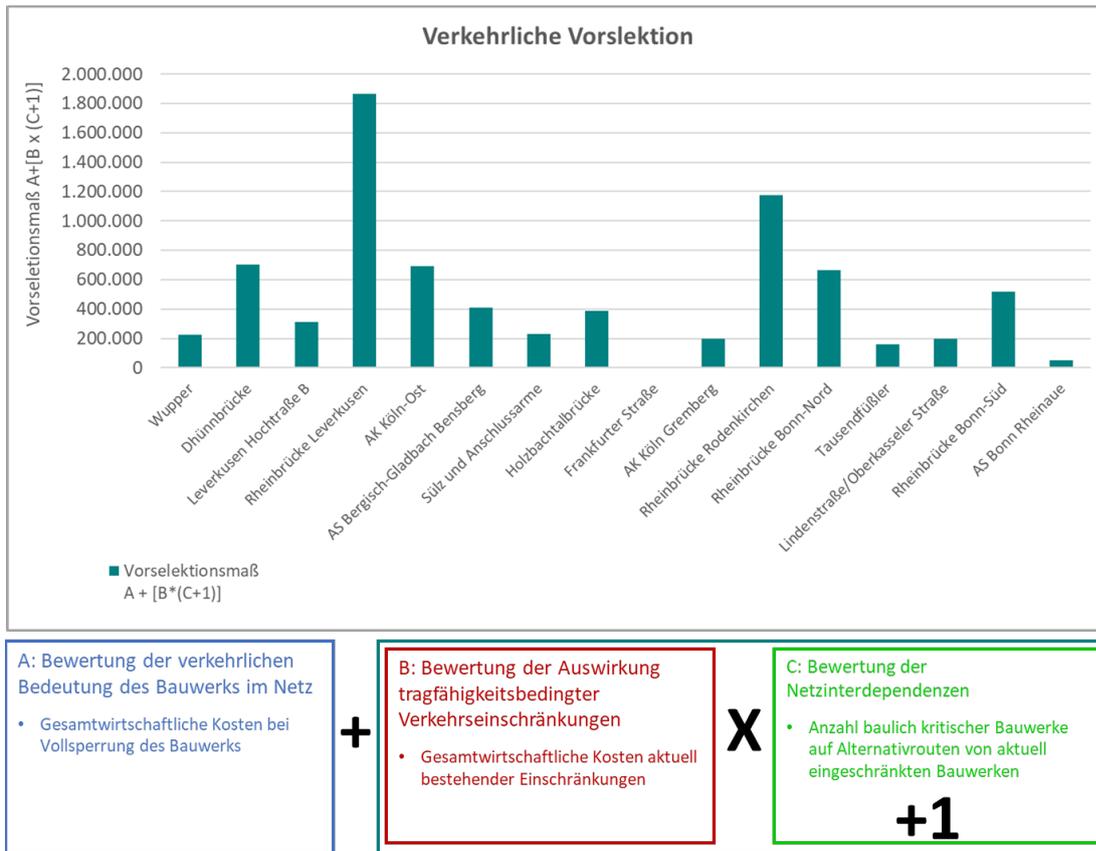


Abbildung 14: Ergebnis der Vorselektion unter verkehrlichen Aspekten: Vorselektionsmaß

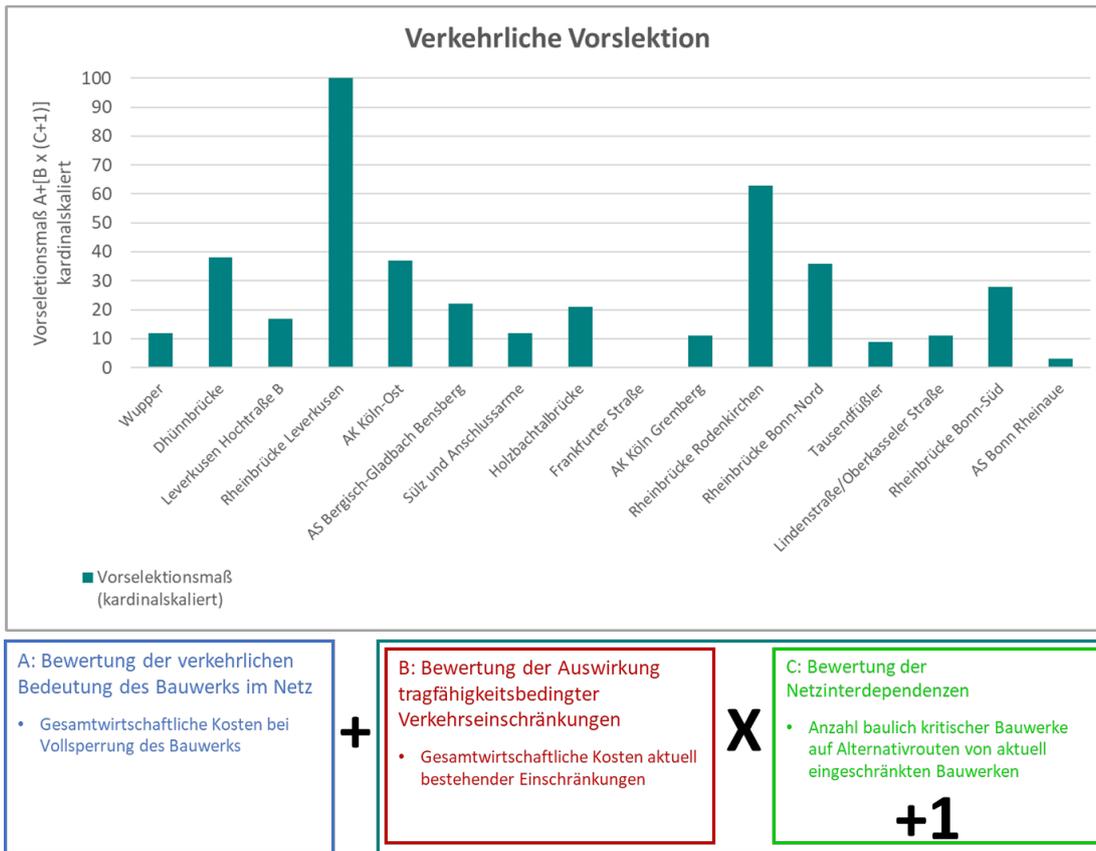


Abbildung 15: Ergebnis der Vorselektion unter verkehrlichen Aspekten: kardinalskaliertes Vorselektionsmaß

Es zeigt sich, dass bei einer reinen Betrachtung der verkehrlichen Bedeutung der Bauwerke (Kriterium A – Vollsperrung) die Rheinbrücke Rodenkirchen den höchsten Wert aufweist, diese also die größte verkehrliche Bedeutung im Netz besitzt. Nimmt man jedoch die Wirkung bestehender Verkehrseinschränkungen (Kriterien B und C) hinzu, ist die Rheinbrücke Leverkusen das verkehrlich kritischste Bauwerk im Teilnetz.

Im Rahmen der Beispielrechnungen wurden die Auswirkungen verschiedener Schwellwertsetzungen beim Kriterium C getestet. Die Ergebnisse sind im Überblick in Tabelle 2 dargestellt.<sup>4</sup> Es zeigt sich, dass die Kritikalität des Bauwerks Rheinbrücke Leverkusen im Vergleich zu den anderen Projektbauwerken deutlich zunimmt, wenn der Schwellenwert herabgesetzt wird und die Anzahl der betroffenen Bauwerke damit zunimmt.

<sup>4</sup> Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist zu beachten, dass eine plausible Abbildung der betroffenen Bauwerke eine passende Zuordnung der Bauwerke zu Visum-Strecken erfordert. Dies ist z. B. bei Strombrücken in der Regel unproblematisch, an Autobahnkreuzen oder Anschlussstellen jedoch zum Teil nur mit Ortskenntnis fehlerfrei umzusetzen. Im Rahmen der Testrechnungen können hier im Einzelfall noch Unplausibilitäten auftreten, da der Fokus auf einem Funktionstest des Verfahrens lag. Zudem ist im Rahmen einer Praxisanwendung ggf. eine teilbauwerkspezifische Betrachtung sinnvoll. Diese Möglichkeiten bietet der Prototyp. Für die Umsetzung sind wiederum tiefere Kenntnisse der Bauwerke erforderlich.

ASB-SNR	Name	Schwellewert Zunahme Lkw-Belastung > 30 %		Schwellewert Zunahme Lkw-Belastung > 15 %		Schwellewert Zunahme Lkw-Belastung > 10 %	
		Vorselektions- maß	Vorselektions- maß (kardinal- skaliert)	Vorselektions- maß	Vorselektions- maß (kardinal- skaliert)	Vorselektions- maß	Vorselektions- maß (kardinal- skaliert)
		A + [B * (C+1)]	[0...100]	A + [B * (C+1)]	[0...100]	A + [B * (C+1)]	[0...100]
4907546	Wupper	225.233	12	225.233	10	225.233	7
4908700	Dhünnbrücke	700.763	38	700.763	31	700.763	23
4907593	Leverkusen Hochstraße B	313.443	17	313.443	14	313.443	10
4907597	Rheinbrücke Leverkusen	1.863.623	100	2.256.150	100	3.041.204	100
5008737	AK Köln-Ost	689.881	37	689.881	31	689.881	23
5008676	AS Bergisch-Gladbach Bensberg	409.993	22	409.993	18	409.993	13
5009688	Sülz und Anschlussarme	229.787	12	229.787	10	229.787	8
5009692	Holzbachtalbrücke	386.960	21	386.960	17	386.960	13
5008644	Frankfurter Straße	6.056	0	6.056	0	6.056	0
5008583	AK Köln Gremberg	196.089	11	196.089	9	196.089	6
5007829	Rheinbrücke Rodenkirchen	1.174.618	63	1.174.618	52	1.174.618	39
5208706	Rheinbrücke Bonn-Nord	665.204	36	665.204	29	665.204	22
5208717	Tausendfüßler	161.578	9	161.578	7	161.578	5
5208687	Lindenstr./Oberkasseler Str.	198.912	11	198.912	9	198.912	7
5208595	Rheinbrücke Bonn-Süd	517.536	28	517.536	23	517.536	17
5208593	AS Bonn Rheinaue	52.540	3	52.540	2	52.540	2
Betroffene Bauwerke		<b>Anzahl: 3</b> 5008510 AS Köln-Mülheim 4907552 AK Leverkusen-West 4907552 AK Leverkusen-West		<b>Anzahl: 5</b> 5008510 AS Köln-Mülheim 4907552 AK Leverkusen-West 4907552 AK Leverkusen-West 5008651 AK Köln OST 5206677 AK Bliesheim		<b>Anzahl: 9</b> 5008510 AS Köln-Mülheim 4907552 AK Leverkusen-West 4907552 AK Leverkusen-West 5008651 AK Köln OST 5206677 AK Bliesheim 5206676 AK Bliesheim 4806675 Fleher Brücke 4907636 AS Worringen 4807500 AK Düsseldorf-Süd	

Tabelle 2: Verkehrliche Vorselektion: Vergleichsrechnungen für verschiedene Schwellenwerte bei Kriterium C

## 4.3 Bauliche Vorselektion

### 4.3.1 Einteilung der Bauwerke in Vorselektionsstufen

Im Rahmen des Projekts wurden Kriterien zusammengestellt, die die Bauwerke hinsichtlich ihres zu vermutenden Ertüchtigungsbedarfs einstufen. Die Einstufung erfolgte basierend auf baulichen Kriterien, wie zum Beispiel Baujahr, Bauart und Tragfähigkeit, aufbauend auf dem Priorisierungssystem der BAST sowie der Normenentwicklung und bereits vorliegenden Nachrechnungsergebnissen.

Die im Rahmen von Forschungsprojekten ([18] und [41]) durchgeführten Auswertungen der Ergebnisse bereits durchgeführter Nachrechnungen bestätigen im wesentlichen diese Grundlagen, so dass zusammenfassend zunächst die folgenden Kriterien für eine Einstufung der Bauwerke in drei Kategorien angegeben werden, mit denen im Rahmen eines automatisierten Ablaufs eine Bauwerkskategorisierung erfolgen kann:

#### Ersatzneubau wahrscheinlich

##### → Vorselektionsstufe 2:

- Plattenbrücken mit Verdrängungskörpern (Hohlkörperplatten)
- Spannbetonbrücken mit Baujahren vor 1967

- Spannbetonbrücken mit spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl ohne Nachweis des Ankündigungsverhaltens
- Stahl- und Verbundbrücken mit Baujahren vor 1970

#### **Ertüchtigung wahrscheinlich / Nachrechnung empfohlen**

##### **→ Vorselektionsstufe 1:**

- Spannbetonbrücken mit Koppelfugen mit Baujahren vor 1980
- Spannbetonbauwerke mit Baujahren zwischen 1967 und 1985
- Stahlbrücken mit Baujahren zwischen 1970 und 1985
- Verbundbrücken mit Baujahren bis 1990
- Stahlbetonbrücken mit Baujahren bis 1972
- Bauwerke mit Brückenklassen  $\leq$  BK 60

#### **Nachweis des Ziellastniveaus LM1 ohne Ertüchtigung wahrscheinlich**

##### **→ Vorselektionsstufe 0:**

- Gewölbe-/Bogenbrücken aus Mauerwerk
- Stahlbetonbrücken bis 20 m Stützweite ab Baujahr 1972
- Spannbetonbrücken mit Baujahren nach 1985

Mittels dieser Vorgehensweise kann ein Großteil der Bauwerke hinsichtlich seiner baulichen Kritikalität und des Maßnahmenbedarfs bewertet werden. Über die Einteilung der Bauwerke in Vorselektionsstufen erhält der Anwender des Verfahrens auf Basis einiger weniger, in SIB-Bauwerke verfügbarer Angaben Hinweise auf die bauliche Kritikalität der betrachteten Bauwerke: Je höher die Vorselektionsstufe, desto kritischer ist das Bauwerk unter baulichen Gesichtspunkten.

### **4.3.2 Einbeziehung des Traglastindex**

Der Traglastindex wird zukünftig in SIB-Bauwerke für die Bauwerke der Bundesfernstraßen verfügbar sein.

Die fünf Stufen des Traglastindex gehen mit einem jeweils unterschiedlichen Abstand zwischen Ziellastniveau und tatsächlicher Brückeneinstufungsklasse einher und bilden die strukturellen Eigenschaften eines Bauwerks – unabhängig von konkreten Schäden – ab (vgl. [1]). Da der Traglastindex auf ähnlichen Grundlagen beruht wie das zuvor vorgestellte Modell der Bauwerkseinteilung in drei Vorselektionsstufen, lässt sich der Tragfähigkeitsindex in das Stufenmodell überführen.

Die nachfolgende Tabelle enthält die Zuordnung des Traglastindex zu den drei erarbeiteten Vorselektionsstufen:

Traglastindex	Beschreibung	Erforderliche Maßnahmen	Vorselektions-Stufe
I	Brückentragfähigkeit entspricht Ziellastniveau	keine Einschränkungen für verkehrl. Nutzung	0
II	Maximal eine Brückeneinstufungsklasse unter Ziellastniveau	Ggf. Einleitung weiterführender Untersuchungen	1
III	Ein bis zwei Brückeneinstufungsklassen unter Ziellastniveau	Ggf. Einleitung weiterführender Untersuchungen	1
IV	zwei bis drei Brückeneinstufungsklassen unter Ziellastniveau	Ggf. Einleitung weiterführender Untersuchungen	2
V	Drei und mehr Brückeneinstufungsklassen unter Ziellastniveau + Sonderregeln	Ggf. Einleitung weiterführender Untersuchungen	2

Tabelle 3: Zuordnung des Traglastindex zu Vorselektionsstufen

Sobald der Tragfähigkeitsindex in SIB-Bauwerke integriert und damit auswertbar sein wird, wird die in 4.3.1 vorgestellte Stufeneinteilung der Bauwerke durch die oben zusammengestellte Stufenzuordnung auf Basis des Traglastindex ersetzt. Der Tragfähigkeitsindex gibt dann hinreichend genaue Auskunft über ein Maßnahmenerefordernis am betrachteten Bauwerk.

### 4.3.3 Anwendungsbeispiel: Bauliche Vorselektion

Die bauliche Vorselektion wird auf der Ebene der Teilbauwerke berechnet. Eine detaillierte Darstellung der Eingangsdaten und der teilbauwerksspezifischen Berechnungsergebnisse erfolgt aufgrund geltender Geheimhaltungsvorschriften nicht<sup>5</sup>.

Zusammengefasst lässt sich das Ergebnis wie folgt darstellen: Von den 32 Teilbauwerken wird ein Teilbauwerk in die Vorselektionsstufe 0, 23 werden in die Vorselektionsstufe 1 und acht in die Vorselektionsstufe 2 eingestuft (vgl. Abbildung 16).

<sup>5</sup> Die im Projekt verwendeten SIB-Bauwerke-Daten wurden beim Auftraggeber als „Verschlussache - nur für den Dienstgebrauch“ eingestuft. Daraus resultierte für die Projektbearbeitung, dass keine Bauwerksdaten weitergegeben sowie publiziert werden durften. Im vorliegenden Projektbericht werden daher keine spezifischen bauwerksbezogenen Daten dargestellt. Sofern in den Software-Prototyp Original-Bauwerksdaten eingelesen werden, wird dieser seitens des Auftragnehmers nur an den Auftraggeber weitergegeben.

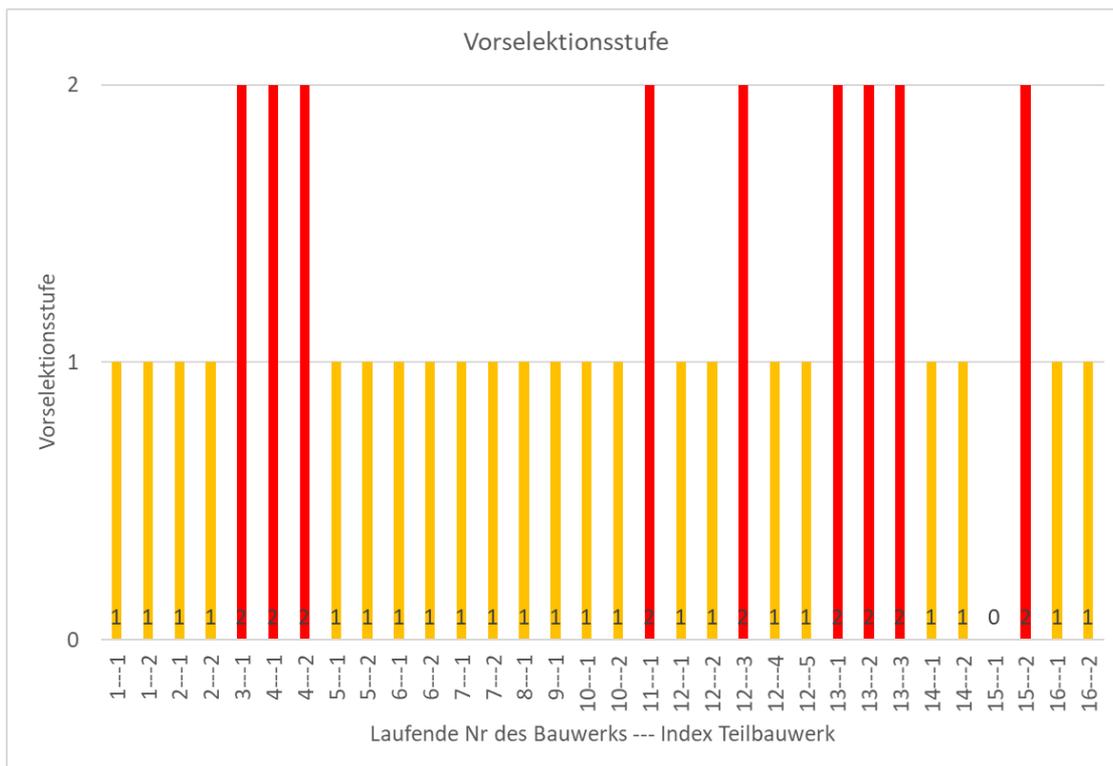


Abbildung 16: Ergebnis der baulichen Vorselektion

## 4.4 Zusammenfassung: Vorselektion von Bauwerken

### 4.4.1 Zusammenschau der Vorselektionsmaße

Aus der Zusammenschau der beiden Vorselektionsmaße ist schließlich eine umfassende Bewertung der Bauwerke sowohl unter baulichen als auch unter verkehrlichen bzw. gesamtwirtschaftlichen Aspekten möglich. Im Hinblick auf die Prioritätenreihung der Bauwerke innerhalb definierter Teilnetze (Bundesländer, Straßenbauverwaltungen o.ä.) kann eine Gewichtung der beiden Maßzahlen (baulich und verkehrlich) jeweils individuell vorgenommen werden.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass alle unter baulichen Aspekten zum Ersatzneubau „vorselektierten“ Bauwerke als kritischer einzuschätzen sind als Bauwerke, die einen Ertüchtigungsbedarf aufweisen. Die weitere Reihung der Dringlichkeit ergibt sich dann über das verkehrliche Vorselektionsmaß.

### 4.4.2 Anwendungsbeispiel: Zusammenschau der Vorselektionsmaße

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Beispiel-Vorselektionsrechnungen in der Zusammenschau dargestellt. Dazu wurde das auf der Teilbauwerksebene generierte Ergebnis der baulichen Vorselektion in ein Ergebnis für das Gesamtbauwerk überführt, indem der jeweils höchste Teilbauwerks-Wert für das Gesamtbauwerk übernommen wurde.

ASB-SNR	Name	Ergebnis der Vorselektion	
		baulich	verkehrlich
4907546	Wupper	1	12
4908700	Dhünnbrücke	1	38
4907593	Leverkusen Hochstraße B	2	17
4907597	Rheinbrücke Leverkusen	2	100
5008737	AK Köln-Ost	1	37
5008676	AS Bergisch-Gladbach Bensberg	1	22
5009688	Sülz und Anschlussarme	1	12
5009692	Holzbachtalbrücke	1	21
5008644	Frankfurter Straße	1	0
5008583	AK Köln Gremberg	1	11
5007829	Rheinbrücke Rodenkirchen	2	63
5208706	Rheinbrücke Bonn-Nord	2	36
5208717	Tausendfüßler	2	9
5208687	Lindenstraße/Oberkasseler Straße	1	11
5208595	Rheinbrücke Bonn-Süd	2	28
5208593	AS Bonn Rheinaue	1	3

Tabelle 4: Ergebnis der Vorselektion unter baulichen und verkehrlichen Aspekten

Das Ergebnis der Vorselektion unterstreicht die Dringlichkeit von Maßnahmen an den Rheinbrücken im Vergleich zu den übrigen Bauwerken im Teilnetz. Für alle Rheinbrücken wurde im Rahmen der baulichen Vorselektion ein Erneuerungsbedarf festgestellt, gleichzeitig zeigt das Ergebnis der verkehrlichen Vorselektion die verkehrliche Bedeutung bzw. Kritikalität der Bauwerke

## 5 Baulicher Maßnahmenbedarf

Aufbauend auf den Vorselektionsstufen wird im folgenden Schritt der bauliche Maßnahmenbedarf inkl. der Eingreifzeiträume eingegrenzt.

### 5.1 Zuordnung von Standardmaßnahmen

Zur Ermittlung der mit einer Maßnahmendurchführung einhergehenden Verkehrseinschränkung und der daraus resultierenden gesamtwirtschaftlichen Kosten wurden zunächst Standardmaßnahmen definiert. Sie können als Hilfsmittel in einem frühen Zeitpunkt eingesetzt werden, zu dem noch keine detaillierten Bauwerksinformationen vorliegen (strategische Planungsebene), und werden mit fortlaufendem Planungsprozess durch „echte“ Maßnahmen aus der Planung ersetzt. Die Standardmaßnahmen ergeben sich mit entsprechenden Belegungen von Dauer und Kosten in Abhängigkeit von der vorliegenden Brückengröße wie folgt:

		<b>Option a) (1) Sofortmaßnahme + (2) Ersatzneubau</b>	<b>Option b) Ertüchtigung</b>	<b>Option c1) Ersatzneubau (zeitig)</b>	<b>Option c2) Ersatzneubau (spät)</b>
<b>1</b>	<b>Kosten</b>	(1) 200,- €/m <sup>2</sup> (2) 2.500,- €/m <sup>2</sup>	1.000,- €/m <sup>2</sup>	2.500,- €/m <sup>2</sup>	
<b>2</b>	<b>Dauer<sup>6</sup></b>	(1) 15 d + $x_1$ *Brückenfläche (2) 45 d + $x_3$ *Brückenfläche	30 d + $x_2$ *Brückenfläche	45 d + $x_3$ *Brückenfläche	
<b>3</b>	<b>Verkehrsführung während der Bauzeit</b>	4+0 oder 2n+2			
<b>4</b>	<b>Dauer der Verkehrsführung</b>	Maßnahmendauer			
<b>5</b>	<b>Verkehrseinschränkung bis zur Maßnahme</b>	keine	Abstandsgebot; Geschwindigkeitsbeschränkung, Optional: Sperrung Lkw/SV		
<b>6</b>	<b>Ermittlung Restnutzungsdauer</b>	Ersatzneubau: 100 Jahre	Differenz zwischen TND (= 100 Jahre) und Alter zum Betrachtungs- zeitpunkt	Ersatzneubau: 100 Jahre	

Tabelle 5: Standardmaßnahmen

<sup>6</sup> Die Faktoren  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  werden in 3 dargestellt

			Faktoren für Dauerberechnung			Beispielhafte resultierende Maßnahmendauern [Tage] gem. Formeln aus Tabelle 5 für <sup>7</sup>		
			x1	x2	x3	Sofort-MN	Ertüchtigung	Ersatzneubau
	Bauwerksgruppe	Brückenfläche [m <sup>2</sup> ]						
A	Bauwerk klein a	0 - 210	0,25	0,50	0,90	68	135	234
B	Bauwerk klein b	211 - 450	0,25	0,50	0,90	128	255	450
C	Bauwerk mittel a	451 - 900	0,13	0,25	0,45	128	255	450
D	Bauwerk mittel b	901 - 1.500	0,13	0,25	0,45	203	405	720
E	Bauwerk groß a	1.501 - 4.500	0,05	0,10	0,18	240	480	855
F	Bauwerk groß b	4.501 - 13.500	0,02	0,03	0,06	240	480	855
G	Bauwerk groß c	> 13.500	0,01	0,03	0,05	278	555	990

Tabelle 6: Faktoren und Maßnahmendauern für unterschiedliche Brückengrößen

Der Maßnahmenbedarf an den Bauwerken wird zunächst über die Zuordnung der Standardmaßnahmen zu den Vorselektionsstufen ermittelt.

### Vorselektionsstufe 0

Bei Bauwerken der Vorselektionsstufe besteht in der Regel kein vordringlicher Maßnahmenbedarf. Diesen Bauwerken wird also keine Maßnahmenoption zugewiesen.

### Vorselektionsstufe 1

Für Bauwerke der Vorselektionsstufe 1 kann sowohl *Maßnahmenoption b) Ertüchtigung* als auch *c2) später Ersatzneubau* in Frage kommen. Die Entscheidung am realen Objekt hängt von unterschiedlichen Randbedingungen, wie dem Bauwerkszustand, Ausbauabsichten im Streckenabschnitt o. ä. ab. Standardmäßig ist im Verfahren für diese Bauwerke die *Maßnahmenoption b) Ertüchtigung* vorgesehen. Dies basiert auf der Überlegung, dass in der Regel Ertüchtigungen grundsätzlich aus Kostengründen vorgezogen werden. Der Anwender des Verfahrens hat jedoch die Möglichkeit einer individuellen Maßnahmensetzung.

### Vorselektionsstufe 2

Den Bauwerken der Vorselektionsstufe 2 wird standardmäßig die *Maßnahmenoption c1) zeitiger Ersatzneubau* zugeordnet. Dies sind Bauwerke, für die in der Regel auch im Ergebnis der Nachrechnung ein Ersatzneubau in Frage käme (z.B. Plattenbrücken mit Hohlkörpern, Spannbetonbrücken mit Baujahren vor 1967 etc.).

### Sonderfall: Bauwerke mit vordringlichem Maßnahmenbedarf

Liegen dem Anwender des Verfahrens Informationen über das Bauwerk vor (z.B. als Ergebnis einer Nachrechnung), die darauf hinweisen, dass ein sofortiger Eingriff erforderlich ist, steht im Verfahren die *Maßnahmenoption a) Sofort-Maßnahme mit späterem Ersatzneubau* – unabhängig von der Vorselektionsstufe – zur Verfügung.

<sup>7</sup> Berechnet für die Klassenobergrenzen und unter Berücksichtigung der in Tabelle 6 dargestellten größenabhängigen Defaultwerte. Für die Bauwerksgruppe G wurde mit einer Brückengröße von 21.000 m<sup>2</sup> gerechnet.

## 5.2 Anpassung des Maßnahmenbedarfs und Konkretisierung des Eingreifzeitraums

In einem zweiten Schritt wird der Bauwerkszustand zur Konkretisierung der Eingreifzeiträume – und gegebenenfalls auch zum Wechsel in eine andere Maßnahmenoption genutzt.

Dabei erfolgt der Abgleich der Substanzkennzahlen für die Bauteilgruppen Überbau, Unterbau und Vorspannung mit festgelegten Grenzwerten. Die Nutzung der Substanzkennzahl stellt gegenüber der Nutzung der Bauwerks- oder Bauteilgruppenzustandsnote sicher, dass nur substanzziell relevante Schäden berücksichtigt werden. Lediglich verkehrssicherheitsrelevante Schäden bleiben bei dieser Betrachtung unberücksichtigt, da sie in der Regel mit geringem Aufwand behoben werden können.

Der folgende Ablauf ist für die Zuordnung der Maßnahmenvarianten in Abhängigkeit der Vorselektionsstufen vorgesehen:

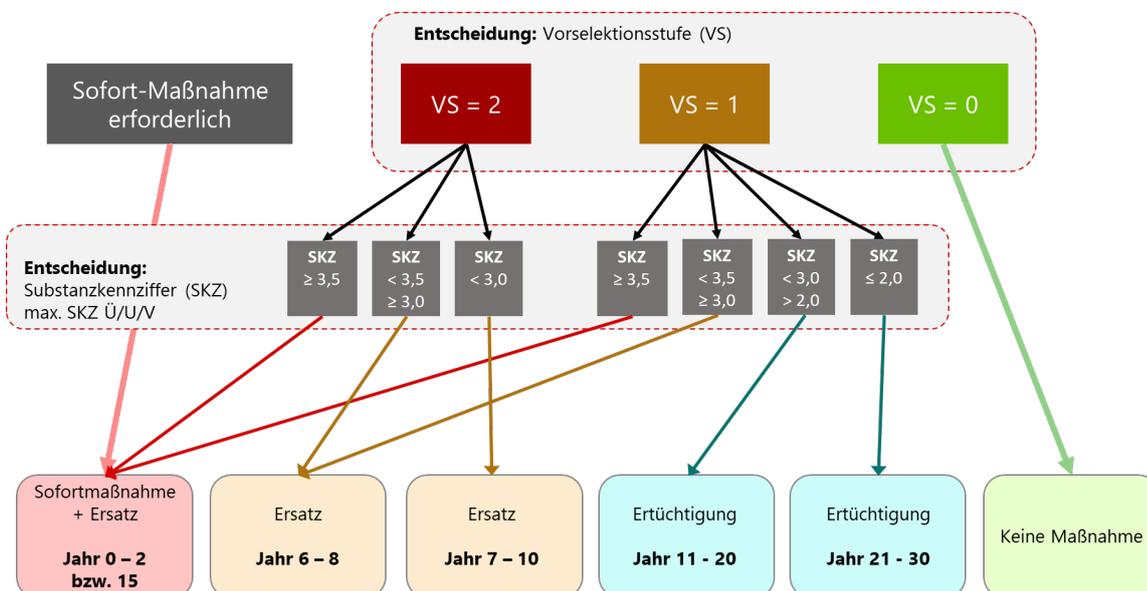


Abbildung 17: Ablauf der Maßnahmenzuordnung

Erläuterung:

1. Auf Basis der Einstufung in eine der drei Kategorien der baulichen Vorselektion erfolgt die Auswahl einer planmäßig zuzuordnenden Standardmaßnahme (vgl. Kapitel 5.1).
2. Im Anschluss daran werden für Bauwerke in den Vorselektionsstufen 0, 1 und 2 die Substanzkennzahlen für Überbau, Unterbau und Vorspannung abgeglichen.  
Für Bauwerke der Vorselektionsstufe 2 gilt:
  - Überschreitet eine der Substanzkennzahlen den Grenzwert 3,5, so erfolgt die Eingruppierung in *Maßnahmenoption a) Sofortmaßnahme mit späterem Ersatzneubau*.
  - Liegt eine der Substanzkennzahlen zwischen 3 und 3,5, so erfolgt die Eingrenzung des Eingreifzeitraums auf die Durchführungsjahre 6 bis 8.
  - Anderenfalls werden Bauwerke der Vorselektionsstufe 2 auf die Durchführungsjahre 7-10 festgelegt.

Für Bauwerke der Vorselektionsstufe 1 und solche Bauwerke aus der Vorselektionsstufe 0, die aufgrund unzureichender geometrischer Eigenschaften oder Ausbauabsichten vom Anwender in die Vorselektionsstufe 1 „gesetzt“ werden, gilt:

- Liegen Substanzkennzahlen  $\geq 3,5$  vor, wird dem jeweiligen Bauwerk die *Maßnahmeoption a) Sofortmaßnahme mit späterem Ersatzneubau* zugeordnet.
- Liegt eine der Substanzkennzahlen zwischen 3 und 3,5, erfolgt die Zuordnung zu *Maßnahmeoption c1) zeitiger Ersatzneubau* mit einem Maßnahmenbeginn in den Jahren 6-8.
- Liegt eine der Substanzkennzahlen zwischen 2 und 3, wird die zugeordnete Maßnahme in den Jahren 11-20 eingeordnet.
- In allen anderen Fällen (Substanzkennzahlen  $\leq 2$ ) wird die zugeordnete Maßnahme in die Jahre 21-30 eingeordnet.

### 5.3 Berücksichtigung des „Vorrangnetzes Brücke“

Mit der Definition des so genannten „Vorrangnetzes Brücke“ hat der Bund festgelegt, entlang welcher Autobahnen bundesweit bis spätestens zum Jahr 2030 alle Brücken durchgehend auf ein bestimmtes Ziellastniveau ertüchtigt sein sollen (vgl. Abbildung 3). Damit wird seitens des Bundes eine Priorisierung im Hinblick auf die Ertüchtigung von Bauwerken der Nachrechnungsliste vorgegeben. Diese Priorisierung wird im Verfahren durch ein Vorziehen der Eingreifzeiträume berücksichtigt: Für Bauwerke im Vorrangnetz wird grundsätzlich ein Maßnahmenbeginn von Jahr 7 bis 10 gesetzt, sofern die Einstufung auf Basis der Standardmaßnahmen nicht ohnehin einen Maßnahmenbeginn in den Jahren 6 bis 8 vorsieht.

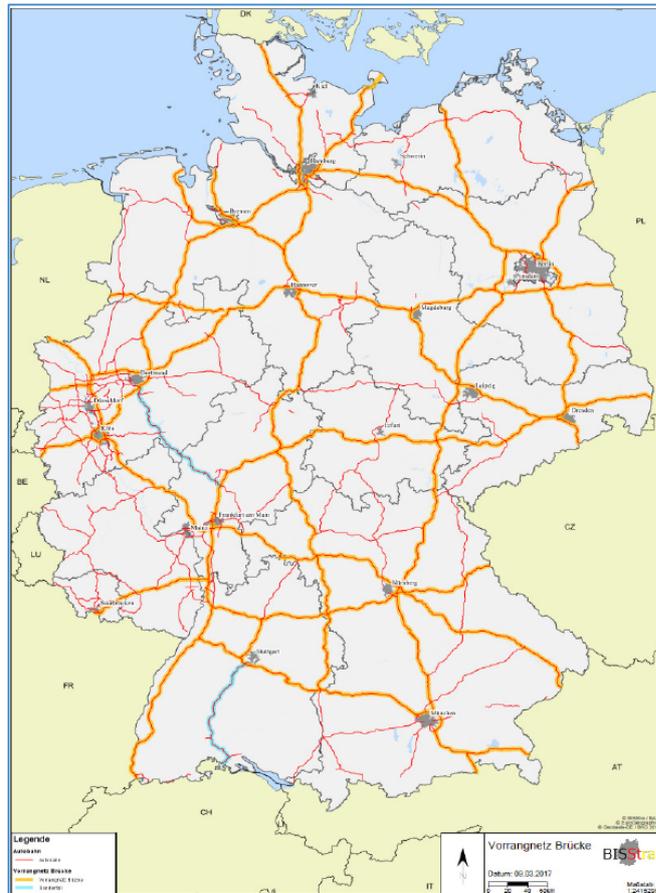


Abbildung 18: Vorrangnetz Brückenertüchtigung (Quelle: Marzahn 2017 [28][15])

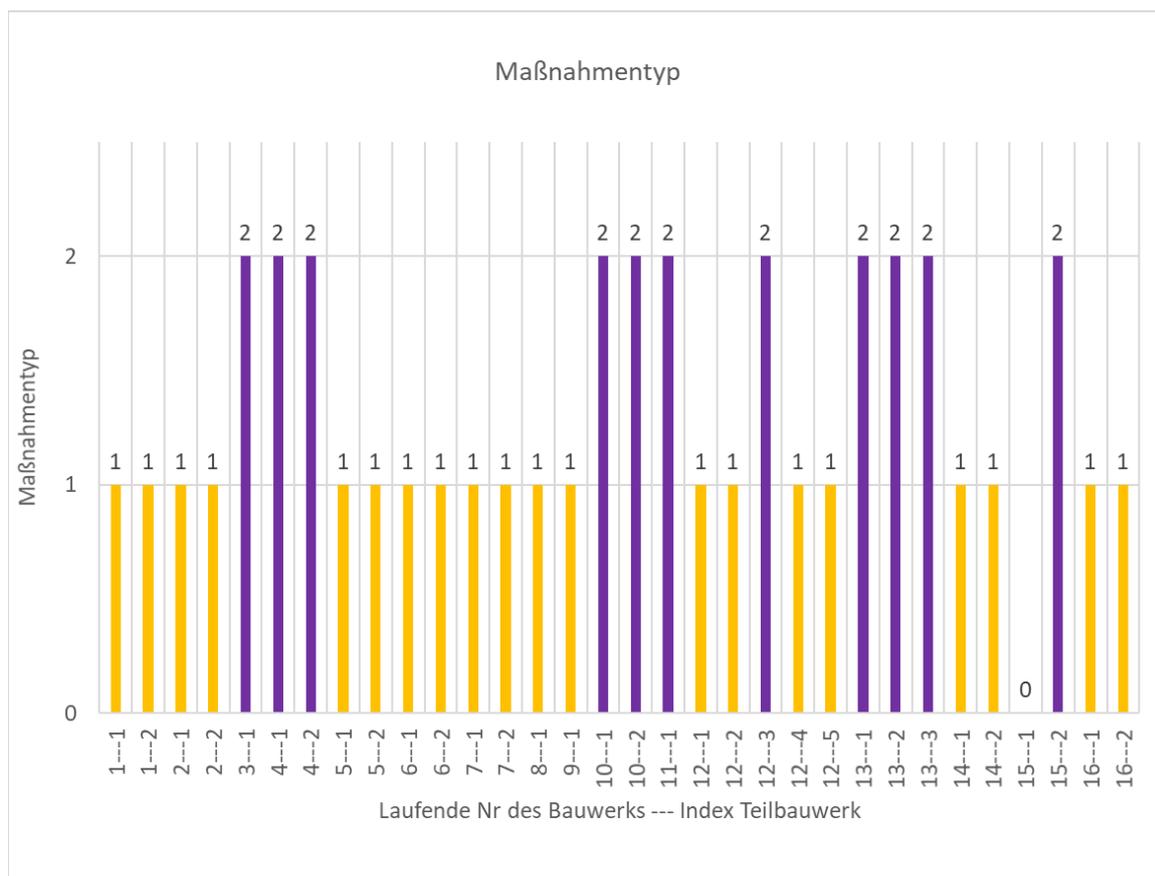
## 5.4 Anwendungsbeispiel: Baulicher Maßnahmenbedarf

### Bestimmung des Maßnahmentyps und des Eingreifzeitraums

Für die 32 Teilbauwerke des Beispiels wurden basierend auf der Vorselektionsstufe (vgl. Kapitel 4.3.3) und den Substanzkennzahlen der Bauwerke für die Bauteilgruppen Überbau, Unterbau und Vorspannung die Maßnahmenart und der Eingreifzeitraum (ausgedrückt in frühester und spätester Maßnahmenbeginn) ermittelt.

Folgendes Ergebnis wurde erzielt (vgl. auch Abbildung 19):

- 20 Teilbauwerken wird der Maßnahmentyp „Ertüchtigung“ zugeordnet,
- 11 Teilbauwerken wird der Maßnahmentyp „Erneuerung“ zugeordnet,
- an einem Teilbauwerk besteht kein Maßnahmenbedarf.



Legende Maßnahmentyp:

1 = Ertüchtigung, spät

2 = Ersatzneubau

Abbildung 19: Bestimmung des Maßnahmentyps

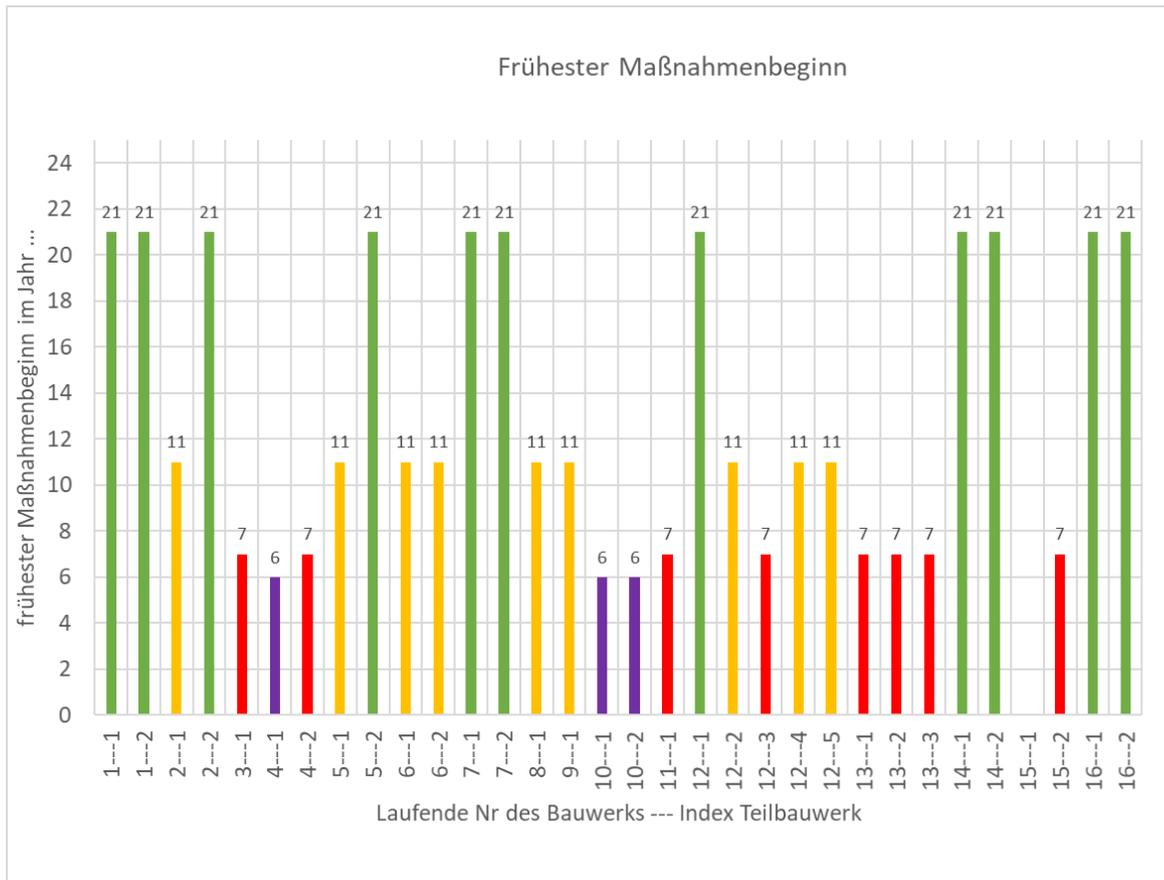


Abbildung 20: Bestimmung des Maßnahmenbeginns auf Basis der Vorselektionsstufe und der Substantanzkenzahlen

Fünf Teilbauwerke befinden sich auf dem „Vorrangnetz Brückenertüchtigung“. Wendet man das Kriterium „Vorrangnetz“ an, so verschieben sich die Eingreifzeiträume von vier Teilbauwerken auf einen Maßnahmenbeginn im Jahr 7 bis 10, ein Teilbauwerk war bereits zuvor in diesen Zeitraum eingeordnet (Abbildung 21).

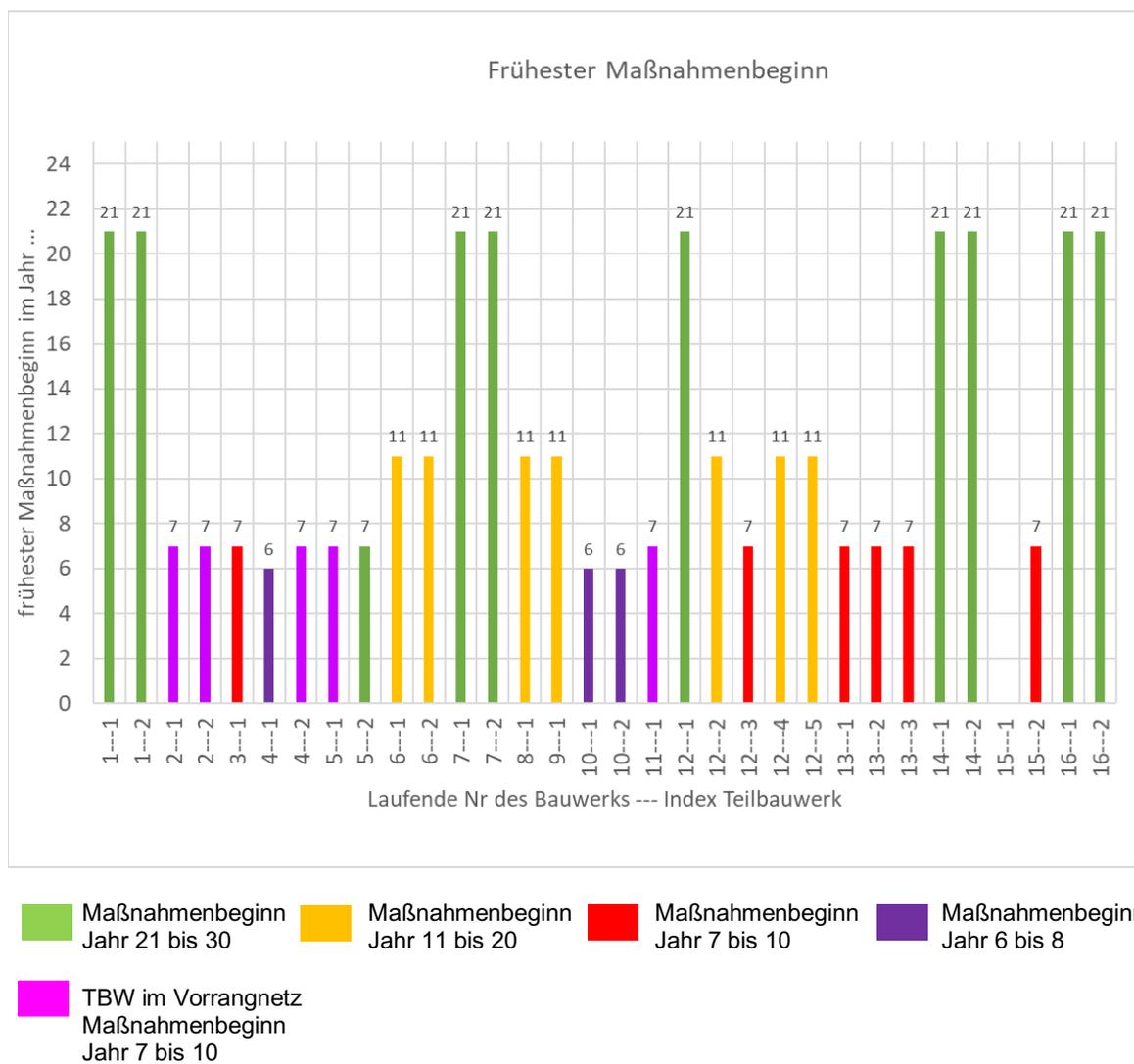


Abbildung 21: Bestimmung des Maßnahmenbeginns unter Berücksichtigung des „Vorrangnetz Brückenertüchtigung“

Schließlich lagen für zehn Teilbauwerke detailliertere Informationen zu geplanten Maßnahmen und Eingreifzeiträumen vor. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte ergibt sich schließlich das in Abbildung 22 dargestellte Bild.

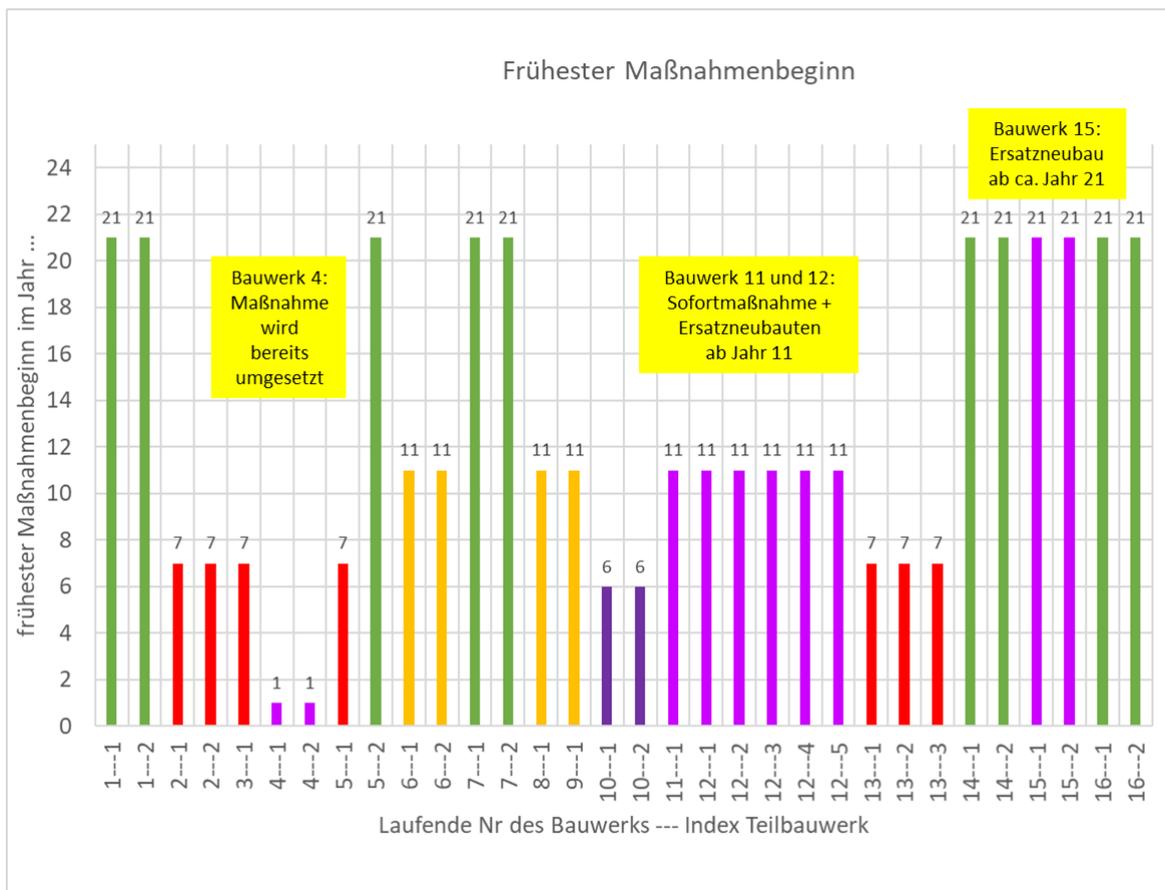


Abbildung 22: Bestimmung des Maßnahmenbeginns unter Berücksichtigung des „Vorrangnetz Brückenertüchtigung“ und nach Nutzereingriff

### Bestimmung der Maßnahmendauer und der Maßnahmenkosten

Die Maßnahmendauer und Kosten wurden zunächst anhand der Standardbelegungen (vgl. Tabelle 5 und Tabelle 6) über die Flächen auf der Teilbauwerksebene berechnet. Standardmäßig werden – sofern nicht Substanzkennziffern > 3,5 vorliegen – keine Sofortmaßnahmen automatisch generiert. Diese sind nur durch einen händischen Nutzereingriff anzulegen. Tabelle 7 zeigt die über die Standardbelegungen berechneten Maßnahmenarten, -dauern und -kosten.

Durch das Aggregieren auf die Bauwerksebene und händische Anpassungen aufgrund von Informationen, die im Rahmen der Rheinbrückenuntersuchung durch Straßen.NRW zur Verfügung gestellt wurden, ergeben sich die in Tabelle 8 dargestellten Maßnahmendauern und -kosten. Diese kamen in der weiteren Beispielbearbeitung zur Anwendung.

Laufende Nr Bauwerk---Index TBW	Typ Maßnahme	Kosten der Maßnahme	Dauer der Maßnahme
	0 = Keine 1=Ertüchtigung 2=Erneuerung	[EURO]	[Anzahl Tage]
1---1	1	1.801.000	210
1---2	1	1.801.000	210
2---1	1	1.149.000	317
2---2	1	1.149.000	317
3---1	2	76.792.500	1581
4---1	2	63.680.000	1319
4---2	2	34.297.500	731
5---1	1	1.235.000	339
5---2	1	1.195.000	329
6---1	1	1.186.000	326
6---2	1	1.186.000	326
7---1	1	1.090.000	302
7---2	1	1.379.000	375
8---1	1	13.113.000	423
9---1	1	568.000	172
10---1	2	1.375.000	293
10---2	2	1.375.000	293
11---1	2	74.000.000	1525
12---1	1	1.914.000	221
12---2	1	1.914.000	221
12---3	2	46.557.500	976
12---4	1	9.397.000	312
12---5	1	9.397.000	312
13---1	2	12.937.500	355
13---2	2	2.207.500	442
13---3	2	2.975.000	581
14---1	1	1.195.000	329
14---2	1	1.174.000	324
15---1	0	0	0
15---2	2	47.040.000	986
16---1	1	1.733.000	203
16---2	1	1.733.000	203

Tabelle 7: Auf der Teilbauwerksebene automatisiert generierte Maßnahmenkosten und -dauern

Name	Maßnahme 1 (Sofortmaßnahme)			Maßnahme 2 (Hauptmaßnahme)		
	Typ	Kosten	Dauer	Typ	Kosten	Dauer
	0 = Keine 1=Ertüchtigung 2=Erneuerung	[EURO]	[Anzahl Tage]	0 = Keine 1=Ertüchtigung 2=Erneuerung	[EURO]	[Anzahl Tage]
Wupper	1	3.602.000	390	0	0	0
Dhünnbrücke	1	2.298.000	260	0	0	0
Leverkusen Hochstraße B	2	76.792.500	1.581	0	0	0
Rheinbrücke Leverkusen	2	748.000.000	2.190	0	0	0
AK Köln-Ost	1	2.430.000	273	0	0	0
AS Bergisch-Gladbach Bensberg	1	2.372.000	267	0	0	0
Sülz und Anschlussarme	1	2.469.000	277	0	0	0
Holzachtalbrücke	1	13.113.000	423	0	0	0
Frankfurter Straße	1	568.000	172	0	0	0
AK Köln Gremberg	2	2.750.000	540	0	0	0
Rheinbrücke Rodenkirchen	1	29.600.000	730	0	74.000.000	1.525
Rheinbrücke Bonn-Nord	1	45.000.000	2.190	2	250.000.000	2.190
Tausendfüßler	2	18.120.000	480	0	0	0
Lindenstraße/Oberkasseler Straße	1	2.369.000	267	0	0	0
Rheinbrücke Bonn-Süd	2	47.040.000	1.638	0	0	0
AS Bonn Rheinaue	1	3.466.000	377	0	0	0

Tabelle 8: Maßnahmenkosten und -dauern nach Nutzereingriff auf der Bauwerksebene

## 6 Bewertung von Ertüchtigungsoptionen

### 6.1 Exemplarische Darstellung der Standardoptionen

Vorbereitend im Hinblick auf die unten dargestellten konzeptionellen Überlegungen skizzieren Abbildung 23 bis Abbildung 26 exemplarisch den Zusammenhang zwischen den baulichen Parametern der Standardoptionen und den verkehrlichen Wirkungen für den Fall von zustands- und maßnahmenbedingten Kapazitätseinschränkungen und damit einige zentrale Aspekte, die im Rahmen des Auswahlverfahrens zu berücksichtigen sind.

Abbildung 23 stellt auf dem Zeitstrahl (x-Achse) die Phasen eines zum Ersatzneubau anstehenden Bauwerks dar. Auf der y-Achse ist die Verkehrsmenge auf dem Bauwerk abgetragen. Die Entwicklung der Verkehrsmenge über die Jahre ist als blaue Linie dargestellt. Die Abbildung geht von einer stetig wachsenden Verkehrsmenge aus. Für die Zukunft ist dies nicht zwangsläufig zu unterstellen, für die Vergangenheit jedoch kann diese Aussage für die meisten Bauwerke getroffen werden.

Zum Zeitpunkt des Baus des ursprünglichen Bauwerks hat das Bauwerk ausreichende Tragfähigkeitsreserven vor dem Hintergrund der zu dem Zeitpunkt über das Bauwerk fahrenden Verkehrsmengen. Ein Tragfähigkeitsdefizit weist das Bauwerk ab dem Zeitpunkt auf, ab dem die Verkehrsmenge auf dem Bauwerk die Tragfähigkeit, für die das Bauwerk ausgelegt war, überschreitet (Kreuzungspunkt zwischen blauer und roter Linie).

In diesem Fall wird entschieden, dem Tragfähigkeitsdefizit zunächst mit einer Sofortmaßnahme zu begegnen. Die damit erzielbare Tragfähigkeit ist jedoch – in dem dargestellten Beispiel – nicht ausreichend, damit das Bauwerk auch die stetig weiter wachsenden Verkehrsmengen

aufnehmen kann (1. grüne Linie). Vor diesem Hintergrund ist zu einem späteren Zeitpunkt ein Ersatzneubau erforderlich, mit dem dann das erforderliche Ziellastniveau erreicht werden kann (2. grüne Linie).

Während der beiden Bauphasen ist die Kapazität des Bauwerks zumindest teilweise eingeschränkt (dargestellt durch die orangefarbenen Linien). Die blau hinterlegten Flächen stellen die dann auf Alternativrouten zu verlagernden Verkehrsmengen dar.

Im Bewertungsverfahren beträgt der Bewertungszeitraum 30 Jahre. Dieser beginnt kurz vor der Sofortmaßnahme und endet nach Fertigstellung des Ersatzneubaus. Mit Fertigstellung des Ersatzneubaus hat das neue Bauwerk eine theoretische Nutzungsdauer von 100 Jahren. In die Bewertung fließt der bis zum Ende des Bewertungszeitraums linear abgeschriebene Restwert des Ersatzneubaus ein (lilafarbene Linie).

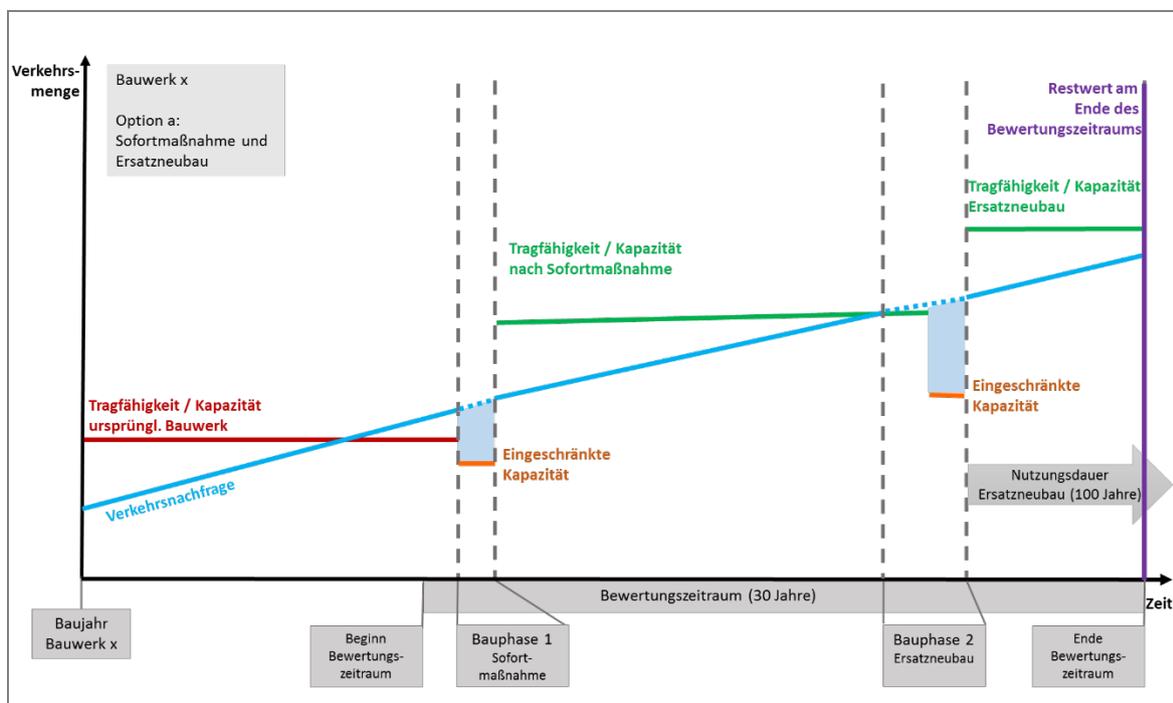


Abbildung 23: Option a (Sofortmaßnahme und Ersatzneubau)

Abbildung 24 zeigt ein Beispiel für ein Bauwerk, bei dem das Ziellastniveau auch mit einer Ertüchtigungsmaßnahme erreicht werden kann. Im Gegensatz zum vorherigen Beispiel hat das Bauwerk nach der Ertüchtigung nur noch eine Restnutzungsdauer, die sich aus der theoretischen Nutzungsdauer des Bauwerks (100 Jahre) abzüglich des Alters des Bauwerks zum Ende der Ertüchtigungsmaßnahme ergibt. Bewertet wird der Restwert des Bauwerks, der sich am Ende des Bewertungszeitraums ergibt.

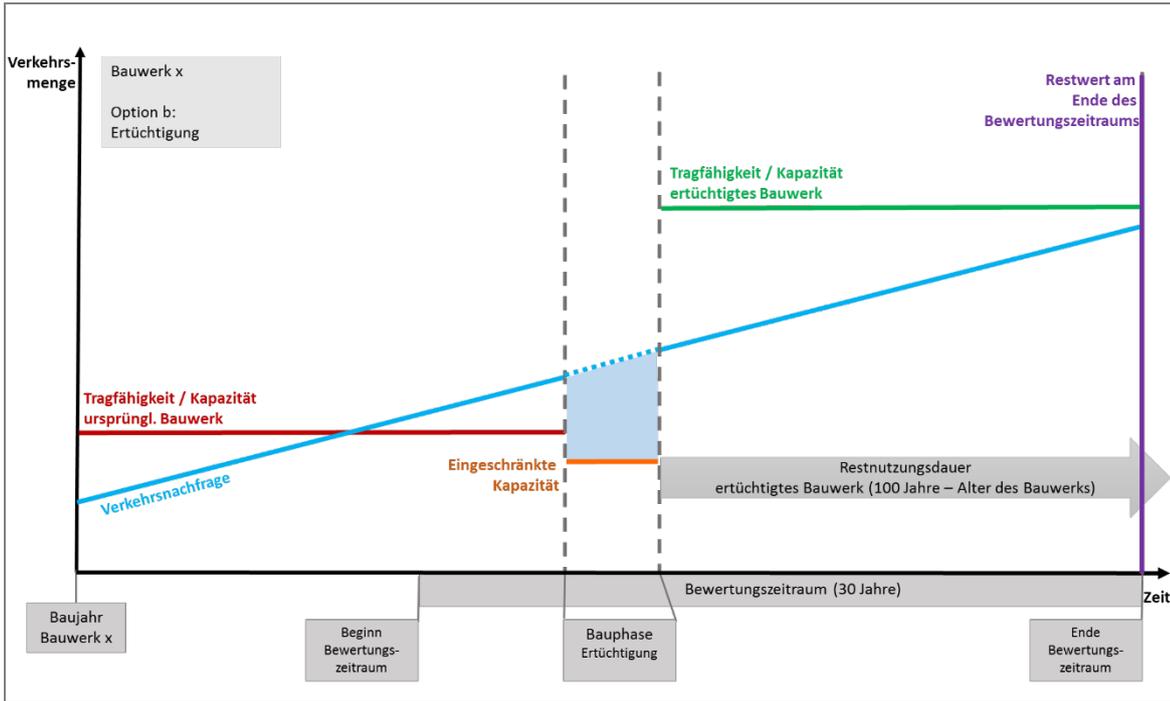


Abbildung 24: Option b (Ertüchtigungsmaßnahme)

Abbildung 25 zeigt analog zur vorherigen Darstellung eine Ersatzneubaumaßnahme. Wie im ersten Beispiel hat das Bauwerk mit Fertigstellung des Ersatzneubaus eine theoretische Nutzungsdauer von 100 Jahren.

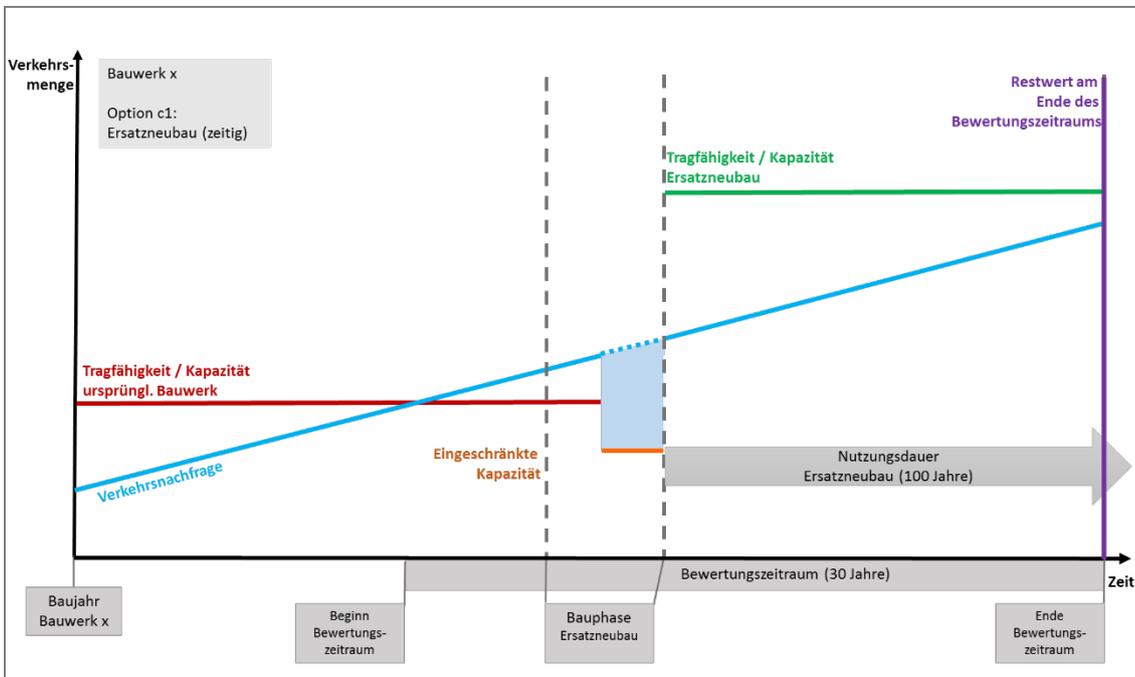


Abbildung 25: Option c1 (Ersatzneubau – zeitig)

Abbildung 26 zeigt ein Beispiel, bei dem ein Ersatzneubau erst vergleichsweise spät durchgeführt wird. Da die Tragfähigkeitsdefizite jedoch im Laufe der Zeit so groß werden, dass das Bauwerk nicht mehr uneingeschränkt nutzbar ist, wird ein Lkw-Verbot auf dem Bauwerk verhängt. Die gelbe Fläche stellt die auf Alternativrouten zu verlagernden Lkw dar.

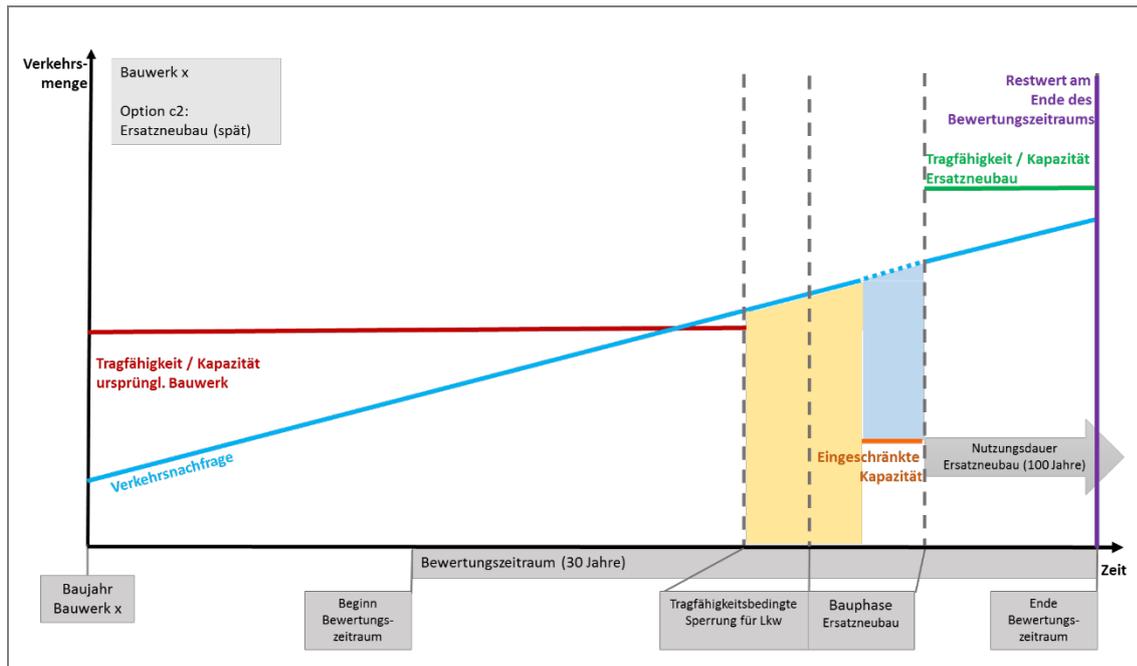


Abbildung 26: Option c2 (Ersatzneubau – spät)

## 6.2 Gesamtwirtschaftliches Verfahren zur Bewertung von Ertüchtigungsmaßnahmen

### 6.2.1 Einführung

Ertüchtigungsmaßnahmen oder die Erstellung von Ersatzneubauten führen zu einem Eingriff in den Verkehrsablauf (vgl. Kapitel 3.1.1). Das hier dargestellte Verfahren dient dazu, die Wirkungen derartiger Eingriffe unter gesamtwirtschaftlichen Gesichtspunkten zu bewerten. Vor dem Hintergrund der Erstellung optimierter Ertüchtigungspläne wird das Verfahren insbesondere dazu eingesetzt, die Wirkungen sich überlagernder Maßnahmen (Maßnahmenkombinationen an mehreren Bauwerken) abzuschätzen, um dann auf dieser Basis mit Hilfe des Optimierungsverfahren die jeweils optimalen Maßnahmenzeiträume der Bauwerke im Teilnetz zu finden.

Im Einzelfall kann das Verfahren auch dafür angewendet werden, verschiedene Handlungsoptionen für ein Bauwerk (z. B. Ertüchtigung oder Erneuerung des Bauwerks) unter gesamtwirtschaftlichen Aspekten zu vergleichen – sofern die baulichen Rahmenbedingungen einen entsprechenden Entscheidungsspielraum zulassen.

Grundsätzlich sind im Rahmen der Ertüchtigungsplanung solche Maßnahmen zu bevorzugen, die nicht nur bei möglichst geringen Kosten eine lange Nutzbarkeit der Brücke ermöglichen, sondern gleichzeitig zu möglichst geringen gesamtwirtschaftlichen Kosten führen. Das bedeutet konkret, dass etwaige bestehende zustandsbedingte Verkehrseinschränkungen (z. B. Einschränkungen für den Schwerverkehr aufgrund von Tragfähigkeitsdefiziten) in möglichst kurzer Zeit beseitigt, Verkehrseinschränkungen während der Durchführung von Maßnahmen (Arbeitsstellen) minimiert und langfristig zustandsbedingte Einschränkungen der Nutzung vermieden werden

(Nachhaltigkeit der Maßnahme, ausreichende Tragfähigkeitsreserven für künftige Verkehrsbelastungen).

## 6.2.2 Definition der Planfälle und des Bezugsfalls

### Vorbemerkungen

Bei der Bewertung von Ertüchtigungs- und Erneuerungsmaßnahmen werden grundsätzlich Planfälle (Maßnahmenoptionen oder Maßnahmenkombinationen) einem Bezugsfall gegenübergestellt.

Die Beschreibung der Planfälle (Maßnahmenoptionen) muss verschiedene verkehrliche Zustände des Bauwerks abbilden (ggf. mehrere Zustände während der Durchführung der Maßnahme, Zustand nach Durchführung der Maßnahme und Zustand vor der Durchführung der Maßnahme während des Planungszeitraums). Dies verdeutlichen auch Abbildung 11 bis Abbildung 14. Diese Zustände ergeben sich aus den baulichen Parametern der Maßnahmenoptionen.

Für die prototypische Entwicklung des Bewertungsverfahrens wird im Sinne eines Funktionalitätstests die Analyseverkehrsmenge verwendet. Für das anwendungsreife Verfahren ist zu prüfen, inwiefern die Prognose der Verkehrsmenge (z. B. BVWP 2030) verwendet werden können muss.

Im Rahmen des Bewertungsverfahrens wird ein im Zuge von Ertüchtigungsmaßnahmen oder Ersatzneubauten stattfindender Infrastrukturausbau (z. B. Kapazitätserweiterungen durch eine Erhöhung der Anzahl der Fahrstreifen) nicht berücksichtigt: Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass, wenn an einem Bauwerk ein Bedarf für einen Ausbau festgestellt wurde, dieser in allen Maßnahmenoptionen Berücksichtigung findet. Dies dürfte z. B. dann der Fall sein, wenn die Ertüchtigung eines Bauwerks im Zuge des Ausbaus einer Autobahn auf sechs Fahrstreifen erfolgt. Der Fall eines Vergleichs von Optionen mit und ohne Kapazitätserweiterung ist insofern nicht relevant für das Verfahren, als die Maßnahme immer gegen die gleiche Grundsituation (also entweder mit oder ohne Erweiterung) bewertet wird. Eine Bewertung des Infrastrukturausbaus, wie sie z. B. im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung erfolgt, ist nicht Gegenstand des Bewertungsverfahrens. In Kauf genommen wird bei der Bewertung von Ertüchtigungsoptionen inkl. Ausbau, dass durch die größeren Baumaßnahmen vermutlich höhere gesamtwirtschaftliche Kosten während der Bauphase entstehen als bei reinen Ertüchtigungsmaßnahmen.

### Planfälle

Basierend auf den in Kapitel 5.1 definierten Standardmaßnahmen werden die drei folgenden Standard-Planfälle definiert:

- **Planfall 1** entspricht der Option a:  
Sofortmaßnahme und späterer Ersatzneubau
- **Planfall 2** entspricht der Option b:  
Ertüchtigungsmaßnahme
- **Planfall 3** entspricht der Option c:  
Ersatzneubau  
(Da bei allen Maßnahmenoptionen der Zeitpunkt der Durchführung der Maßnahme – unter Berücksichtigung der einzuhaltenden Randbedingungen, wie zum Beispiel der erforderlichen

---

Planungszeiträume – variabel ist, wird bei der Definition der Planfälle keine Unterscheidung zwischen den Optionen c1 und c2 getroffen.)

### **Bezugsfall**

Im Rahmen gesamtwirtschaftlicher Bewertungsverfahren repräsentiert der Bezugsfall normalerweise die Situation ohne Durchführung einer Maßnahme. Bei der Bewertung der Handlungsalternativen zur Ertüchtigung von Bauwerken stellt jedoch der Fall des „Nichtstuns“ keine realistische Option dar, wenn ein Ertüchtigungs- oder Erneuerungsbedarf an einem Bauwerk festgestellt wurde. Denn dies würde über kurz oder lang zum Ausfall des Bauwerks führen. Da die Definition eines derartigen Bezugsfalls mit einer Reihe von schwierigen Fragestellungen verbunden wäre (z. B. ab wann steht das Bauwerk nicht mehr zur Verfügung?), wurde entschieden, hier den (ebenfalls) hypothetischen Fall, dass das Bauwerk uneingeschränkt zur Verfügung steht und keine Maßnahme erforderlich ist, als Bezugsfall zu definieren.

Es wurde vereinbart, die verkehrlichen Nutzen über die Formel

### **Planfall – Bezugsfall**

zu berechnen.

## **6.2.3 Definition des Bewertungszeitraums**

Mit dem Bewertungsverfahren sollen Maßnahmen in größeren Teilnetzen mit bis zu 50 Bauwerken bewertet werden. Es ist davon auszugehen, dass deren Durchführung einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen wird. Vor diesem Hintergrund wurde ein Bewertungszeitraum von 30 Jahren gewählt.

Der Bewertungszeitraum umfasst den gesamten Zeitraum der Maßnahmendurchführung inklusive des Planungsvorlaufs. Am Ende des Bewertungszeitraums wird der Restwert des Bauwerks bewertet.

Abbildung 27 verdeutlicht die oben dargestellten Überlegungen zum Bewertungszeitraum an Hand der definierten vier Maßnahmenoptionen.

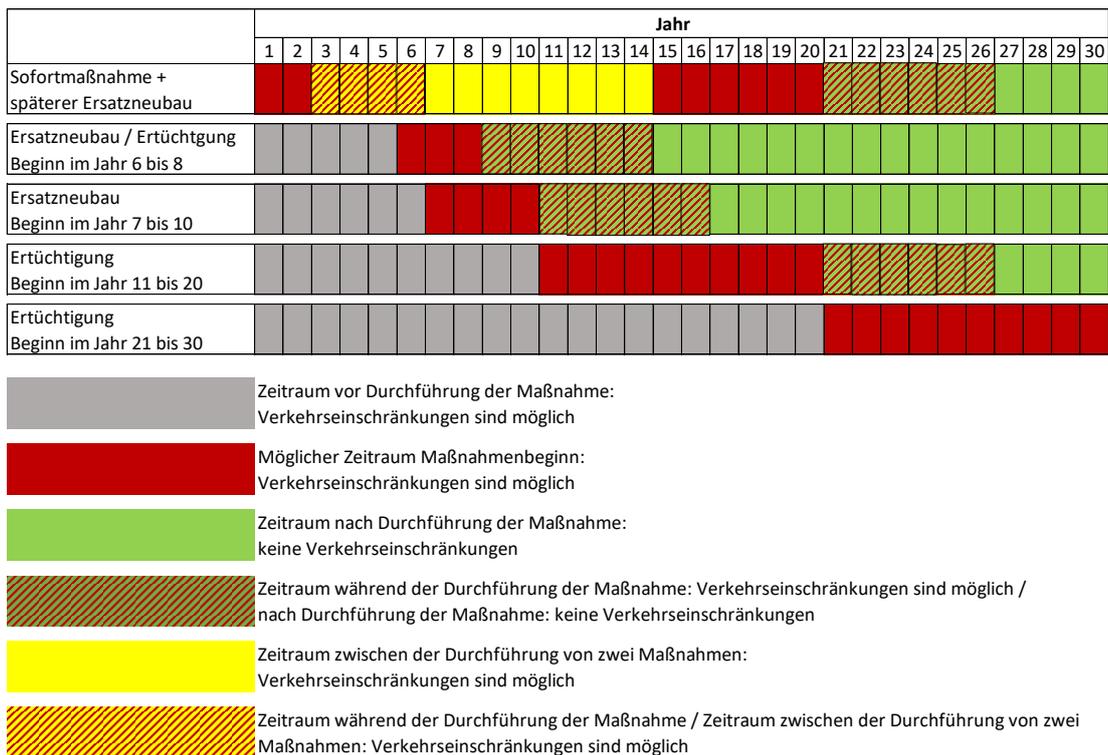


Abbildung 27: Bewertungszeitraum für die Standardoptionen

## 6.2.4 Bewertungskriterien

Im Bewertungsverfahren finden die folgenden Aspekte Berücksichtigung:

- Auf der Kostenseite
  - die Investitionskosten der Ertüchtigungs- oder Erneuerungsmaßnahmen
- Auf der Nutzenseite
  - die negativen verkehrlichen Nutzen (diese entsprechen den zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten), die aufgrund von Verkehrseinschränkungen während der Durchführung der Maßnahme entstehen
  - ggf. negative verkehrliche Nutzen (diese entsprechen den zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten), die aufgrund von tragfähigkeitsbedingten Verkehrseinschränkungen vor der Durchführung der Maßnahme entstehen
  - ggf. vermiedene negative verkehrliche Nutzen (diese entsprechen den zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten) im Bewertungszeitraum aufgrund der durch die Realisierung von Maßnahmen nicht mehr erforderlichen zustandsbedingten Verkehrseinschränkungen
  - die Veränderung des Restwerts des Bauwerks aufgrund von durchgeführten Erneuerungsmaßnahmen

Anlass für die Durchführung einer Maßnahme ist grundsätzlich ein vorhandenes oder zu erwartendes Tragfähigkeitsdefizit am betrachteten Bauwerk. Vor diesem Hintergrund gehen wir davon aus, dass alle betrachteten Maßnahmenoptionen das vorhandene oder zu erwartende

Tragfähigkeitsdefizit beseitigen. Daher ist die Verbesserung der Tragfähigkeit des Bauwerks kein Bewertungskriterium, sondern wird implizit im Rahmen der Auswahl der Maßnahmenoptionen – und damit dem gesamtwirtschaftlichen Bewertungsverfahren vorgeschaltet – betrachtet.

#### 6.2.4.1 Investitionskosten

Zur Bewertung der Investitionskosten wird – auf der Basis der in Kapitel 5.1 dargestellten Pauschalkostenansätze oder auf der Basis einer anderweitigen Kostenschätzung – ein an die RI-WI-BRÜ (vgl. Anhang 1 und [11]) angelehntes Verfahren verwendet. Es wird jedoch vorgeschlagen, entweder vollständig auf eine Diskontierung der Kosten zu verzichten oder anstelle des gemäß RI-WI-BRÜ anzusetzenden Diskontsatzes von 3 % den derzeitigen Diskontsatz der BVWP-Bewertung von 1,7 % zu verwenden. Grundsätzlich sollte ausgeschlossen werden, dass das Verschieben großer Investitionsanteile auf späte Jahre aufgrund der angewendeten Methodik zur Kostensenkung führt und somit positiver bewertet wird als frühere Investitionen.

Für Maßnahmen, die in den Jahren  $x$  und  $y$  durchgeführt werden, berechnen sich die kapitalisierten Investitionskosten wie folgt:

$$K_{BK} = \frac{K_{Bx}}{(1+p)^x} + \frac{K_{By}}{(1+p)^y}$$

Dabei ist:

$K_{BK}$ : Kapitalisierte Baukosten

$K_{Bx}$ : Baukosten im Jahr  $x$

$K_{By}$ : Baukosten im Jahr  $y$

$p$ : Zinssatz (1,7 %)

Wird auf eine Kapitalisierung verzichtet, vereinfacht sich die Berechnung entsprechend:

$$K_B = K_{Bx} + K_{By}$$

Es wird vereinfacht unterstellt, dass sich die Baukosten linear über den Zeitraum der Maßnahmendurchführung verteilen. Dann ist die oben angeführte Barwertbildung für die Zahlungsströme aller Jahre der Maßnahmendurchführung zu wiederholen.

#### 6.2.4.2 Gesamtwirtschaftlicher verkehrlicher Nutzen

Zur Bewertung der gesamtwirtschaftlichen Nutzen kommt das in Kapitel 3.2 dargestellte gesamtwirtschaftliche Bewertungsverfahren zum Ansatz.

Zunächst werden für die Bewertungskriterien Reisezeit, Klimagas- und Luftschadstoffemissionen sowie Unfallgeschehen die absoluten Veränderungen zwischen den Netzzuständen des Bezugsfalls und der Planfälle ermittelt.

Eine Zunahme der Kriterienwerte, die sowohl vor der Durchführung der Maßnahme aufgrund von tragfähigkeitsbedingten Verkehrseinschränkungen auftreten kann als auch baustellenbedingt während der Umsetzung der Maßnahme, wird als negativer Nutzen berücksichtigt.

Für die Planfälle gilt, dass nach der Durchführung der Maßnahme für die Nutzer die gleichen verkehrlichen Rahmenbedingungen (Anzahl Fahrstreifen, zulässige Geschwindigkeit usw.) bestehen, wie im Bezugsfall. Daher entstehen keine positiven verkehrlichen Nutzen, sondern

lediglich vermiedene negative Nutzen aufgrund nicht mehr notwendiger Verkehrseinschränkungen. D. h. der verkehrliche Nutzenbeitrag nach Durchführung der Maßnahme ist grundsätzlich Null. Somit tritt im gesamten Bewertungszeitraum kein positiver verkehrlicher Nutzen auf.

Die verkehrlichen Nutzenbeiträge werden über die Kostensätze des BVWP-Bewertungsverfahrens monetarisiert und für jedes Jahr im Bewertungszeitraum ermittelt. Für Maßnahmen, die beispielhaft in den Jahren 3 und 4 des Bewertungszeitraums durchgeführt werden, berechnet sich der kapitalisierte gesamtwirtschaftliche Nutzen dann wie folgt:

$$N_K = \frac{N_{V1}}{(1+p)^1} + \frac{N_{V2}}{(1+p)^2} + \frac{N_{B3}}{(1+p)^3} + \frac{N_{B4}}{(1+p)^4} + \frac{N_{P5}}{(1+p)^5} + \dots + \frac{N_{Pi}}{(1+p)^i}$$

Dabei ist:

$N_K$ : Kapitalisierter Nutzen gesamt

$N_{V1}, N_{V2}$ : Nutzen vor Durchführung der Maßnahme (in Jahr 1 bzw. 2 des Bewertungszeitraums)

$N_{B3}, N_{B4}$ : Nutzen während der Durchführung der Maßnahme (in Jahr 3 bzw. 4 des Bewertungszeitraums)

$N_{P5}, N_{Pi}$ : Nutzen nach Durchführung der Maßnahme (in Jahr 5 bis  $i$  des Bewertungszeitraums)

$p$ : Zinssatz (1,7 %)

$i$ : letztes Jahr des Bewertungszeitraums und damit Dauer des Bewertungszeitraums

Wird auf eine Kapitalisierung verzichtet, vereinfacht sich die Berechnung entsprechend:

$$N = N_{V1} + N_{V2} + N_{B3} + N_{B4} + N_{P5} + N_{Pi}$$

### 6.2.4.3 Veränderung des Restwerts des Bauwerks

Der Restwert eines Bauwerks wird über dessen Restnutzungsdauer bestimmt. Die Restnutzungsdauer eines Bauwerks wiederum berechnet sich aus der theoretischen Nutzungsdauer des Bauwerks<sup>8</sup> abzüglich des Alters des Bauwerks zum Ende des Bewertungszeitraums.

Die Berechnung des Restwerts des Bauwerks wird vereinfacht auf der Basis der Kosten für einen Ersatzneubau durchgeführt.

So berechnet sich der Restwert eines Bauwerks wie folgt:

$$RW_{Ki} = \frac{K_{Ersatzneubau} * \frac{RND_{i;B}}{ND}}{(1+p)^i}$$

Wird auf eine Kapitalisierung verzichtet, vereinfacht sich die Berechnung entsprechend:

$$RW_i = K_{Ersatzneubau} * \frac{RND_{i;B}}{ND}$$

Dabei ist:

$K_{Ersatzneubau}$ : Kosten für die Erneuerung des Bauwerks

$RND_{i;B}$ : Restnutzungsdauer am Ende des Bewertungszeitraums im Bezugsfall

<sup>8</sup> Gemeinsam mit dem forschungsbegleitenden Arbeitskreis wurde festgelegt, in den Beispielrechnungen bei allen Bauwerken von einer theoretischen Nutzungsdauer von 100 Jahren auszugehen. Der Wert kann im Software-Prototyp ebenso wie der Zinsfaktor geändert werden.

ND: Theoretische Nutzungsdauer des Bauwerks (entspricht 100 Jahre)

p: Zinssatz (1,7 %)

Bewertet wird die Veränderung des Restwerts des Bauwerks, die sich aufgrund der durchzuführenden Maßnahme ergibt.

Da Ertüchtigungsmaßnahmen das Ziel haben, die planmäßige Nutzbarkeit des Bauwerks wiederherzustellen – ohne Durchführung einer Ertüchtigungsmaßnahme würde die Nutzbarkeit des Bauwerks eingeschränkt bzw. verkürzt werden – entspricht die Restnutzungsdauer des Bauwerks im Planfall der Restnutzungsdauer im Bezugsfall. Für Ertüchtigungsmaßnahmen (Standardoption b) ist die Veränderung des Restwerts also grundsätzlich mit „Null“ zu bewerten.

Bei Erneuerungsmaßnahmen (die bei allen anderen Standardoptionen betrachtet werden) entspricht hingegen die Restnutzungsdauer des Bauwerks mit Abschluss der Maßnahme der theoretischen Nutzungsdauer des Bauwerks von 100 Jahren. Bis zum Ende des Bewertungszeitraums werden die Erstellungskosten des Ersatzbauwerks linear abgeschrieben. Bei diesen Optionen berechnet sich die Veränderung des Restwerts aus dem Restwert des Ersatzneubaus am Ende des Bewertungszeitraums abzüglich des Restwerts des ursprünglichen Bauwerks zum Ende des Bewertungszeitraums (entspricht dem Restwert des Bauwerks im Planfall abzüglich dem Restwert des Bauwerks im Bezugsfall), wobei hypothetisch unterstellt wird, dass das Originalbauwerk das Ende des Bewertungszeitraums noch erreicht hätte.

Die Veränderung des Restwerts eines erneuerten Bauwerks berechnet sich also auf Basis der oben dargestellten Formeln wie folgt:

$$\Delta RW_{Ki} = RW_{Ki;Px} - RW_{Ki;B}$$

Wird auf eine Kapitalisierung verzichtet, vereinfacht sich die Berechnung entsprechend:

$$\Delta RW_{i;Px} = RW_{i;Px} - RW_{i;B}$$

Dabei ist:

$R_{Ki;Px}$ : Kapitalisierter Restwert am Ende des Bewertungszeitraums für den Planfall x

$RW_{i;B}$ : Restwert (Bezugsfall)

$RW_{i;Px}$ : Restwert (Planfall x)

## 6.2.5 Syntheseverfahren

Alle Bewertungskriterien liegen originär als monetäre Werte vor (Investitionskosten und Restwert des Bauwerks) oder werden über die Kostensätze des BVWP-Bewertungsverfahrens monetarisiert (verkehrliche Nutzen).

Zur Werthsynthese wird die Nutzen-Kosten-Differenz gebildet, so dass sich die Vorteilhaftigkeit einer Maßnahmenoption über eine Kenngröße ablesen lässt. Die unter gesamtwirtschaftlichen Aspekten beste Maßnahme weist dann den höchsten Wert auf.

$$NKD = R_{Ki} - N_K - K_{BK}$$

oder

$$NKD = R_i - N - K_B$$

Dabei ist:

NKD: Nutzen-Kosten-Differenz

$N_K$ : Kapitalisierter verkehrlicher Nutzen

N: Verkehrlicher Nutzen

$R_{Ki}$ : Kapitalisierte Restwertdifferenz des Bauwerks am Ende des Bewertungszeitraums

$R_i$ : Restwertdifferenz des Bauwerks am Ende des Bewertungszeitraums

$K_{BK}$ : Kapitalisierte Investitionskosten

$K_B$ : Investitionskosten

## 7 Verkehrliche Bewertung gleichzeitiger Maßnahmen bzw. Verkehrseinschränkungen an mehreren Brücken

### 7.1 Zielstellung

Eine Betrachtung von gleichzeitigen (Teil-) Sperrungen von Brücken und den entstehenden Wechselwirkungen im Verkehrsmodell ist von besonderer Bedeutung für die Erarbeitung optimierter Ertüchtigungsprogramme.

Da die zu erarbeitende Methodik für Teilnetze von bis zu 50 Bauwerken geeignet sein soll, ergibt sich theoretisch eine sehr große Anzahl an möglichen Kombinationen von Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Bauwerken:

Konkret errechnet sich die Anzahl von Kombinationen aus  $k$  gleichzeitigen Maßnahmen an  $n$  Brücken mit Hilfe des Binomialkoeffizienten zu

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{(n-k)!k!}.$$

Tabelle 9 und Abbildung 28 zeigen die möglichen Bauwerkskombinationen für ein Teilnetz mit bis zu 50 Bauwerken und bis zu 10 gleichzeitigen Verkehrseinschränkungen.

		Anzahl gleichzeitige Verkehrseinschränkungen (k)					
		2	3	4	5	...	10
		<i>Anzahl möglicher Kombinationen von Bauwerken</i>					
Anzahl Bauwerke im Teilnetz (n)	5	10	10	5	1	...	--
	10	45	120	210	252	...	1
	15	105	455	1.365	3.003	...	3.003
	20	190	1.140	4.845	15.504	...	184.756
	25	300	2.300	12.650	53.130	...	3.268.760
	30	435	4.060	27.405	142.506	...	30.045.015
	35	595	6.545	52.360	324.632	...	183.579.396
	40	780	9.880	91.390	658.008	...	847.660.528
	45	990	14.190	148.995	1.221.759	...	3.190.187.286
	50	1.225	19.600	230.300	2.118.760	...	10.272.278.170

Tabelle 9: Berechnung der Anzahl möglicher Kombinationen von Bauwerken

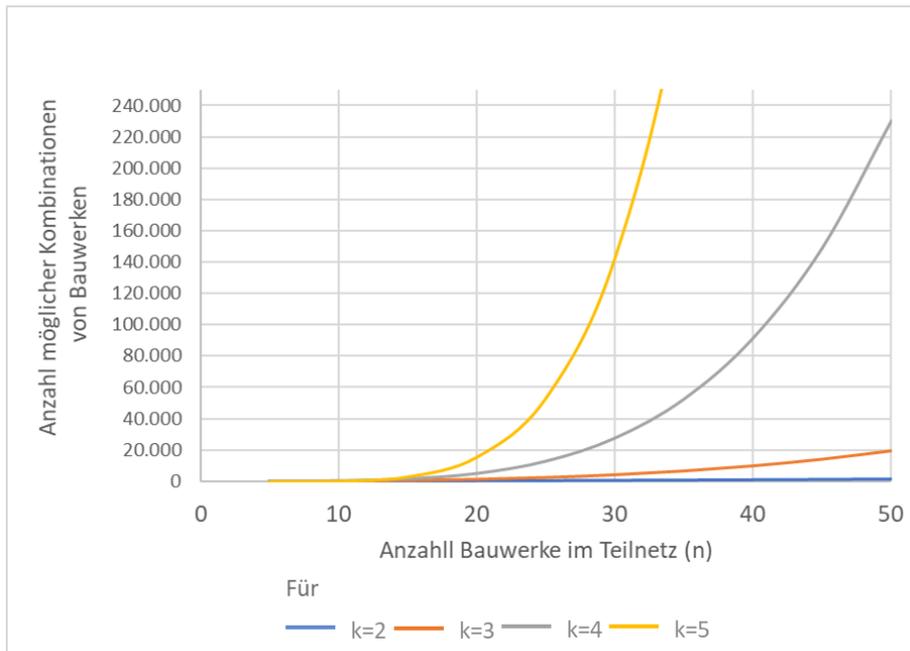


Abbildung 28: Anzahl möglicher Kombinationen von Bauwerken in Abhängigkeit von der Größe des Teilnetzes und der Anzahl gleichzeitiger Verkehrseinschränkungen

Da die verkehrlichen bzw. gesamtwirtschaftlichen Wirkungen nur mit einem Verkehrsmodell zu ermitteln sind, ist es offensichtlich, dass die Anzahl der Kombinationen noch vor der eigentlichen Optimierung der Zielfunktion (vgl. Kapitel 8.1.1) stark reduziert werden muss. Dies gilt auch dann, wenn die Möglichkeiten zur Reduktion der Rechenzeiten ausgeschöpft werden.

## 7.2 Ansatz

Der im Folgenden beschriebene Ansatz geht davon aus, dass keine expliziten allgemeinen Vorgaben wie etwa „wenn eine Brücke aus Streckenzug A saniert wird, werden auch alle anderen Brücken des Streckenzugs saniert“ oder „wenn eine Brücke von Streckenzug A saniert wird, darf keine Brücke von Streckenzug B saniert werden“ zur Bündelung oder zum Ausschluss von Maßnahmen in bestimmten Netzbereichen (Segmentierung) vorliegen. Sollten derartige Vorgaben für das betrachtete Teilnetz existieren oder abgeleitet werden können, so sollten sie selbstverständlich genutzt werden, da über Bündelungsvorgaben die Anzahl der in der Optimierung zu betrachtenden Lösungskandidaten und durch die Ausschlussbedingungen die Anzahl der zulässigen Kombinationen wesentlich reduziert werden kann.

### Kategorisierung von Kombinationen

Betrachtet man die theoretisch möglichen Kombinationen von Maßnahmen bzw. Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Brücken eines Teilnetzes, so lassen sich die folgenden Kategorien unterscheiden:

### 1. Unzulässige Kombinationen

Dies sind Kombinationen, die in einem Ertüchtigungsplan nicht auftreten können und deshalb im Rahmen der Optimierung nicht bewertet werden müssen.

### 2. Ungünstige Kombinationen

Ungünstige oder unvorteilhafte Kombinationen sind solche, bei denen die nicht gleichzeitige Durchführung der enthaltenen Maßnahmen zu wesentlich niedrigeren gesamtwirtschaftlichen Kosten führen würde. Damit sind diese Kombinationen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht Teil eines optimalen Ertüchtigungsplans, auch wenn dies theoretisch nicht ausgeschlossen werden kann.

Im Rahmen einer heuristischen Optimierung, die aufgrund des großen Lösungsraums bei Teilnetzen von bis zu 50 Brücken notwendig ist, würden (Teil-) Lösungen mit derartigen Kombinationen deshalb nicht erzeugt, so dass sich eine gesamtwirtschaftliche Bewertung erübrigt.

### 3. Normale Kombinationen

Bei den Kombinationen, die tatsächlich auftreten können, ist zu unterscheiden zwischen

- Kombinationen, deren gesamtwirtschaftliche Kosten nur durch die Anwendung eines Verkehrsmodells ausreichend genau ermittelt werden können und
- Kombinationen, deren gesamtwirtschaftliche Kosten mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Basis der gesamtwirtschaftlichen Kosten der enthaltenen Einzelmaßnahmen oder Teilkombinationen ausreichend gut approximiert werden können.

## Folgerungen

Um die Zahl der im Verkehrsmodell tatsächlich zu bewertenden Kombinationen gering zu halten, sollten also die verschiedenen Arten von Kombinationen möglichst zuverlässig kategorisiert werden (ohne sie zu berechnen). Außerdem wäre es hilfreich, die gesamtwirtschaftlichen Kosten möglichst vieler „normaler“ Kombinationen ausreichend gut abschätzen zu können und die Bedingungen zu erkennen bzw. zu definieren, unter denen eine Approximation funktioniert. Da die Approximation der gesamtwirtschaftlichen Kosten einer Kombination auf den Ergebnissen für die enthaltenen Teil-Kombinationen beruht, ist es sinnvoll, bei der Berechnung mit Maßnahmen an einzelnen Bauwerken zu beginnen und dann schrittweise zu 2er, 3er und höheren Kombinationen überzugehen.

## 7.3 Verfahren

Das gewählte Verfahren beginnt mit der Bewertung aller geplanten Einzelmaßnahmen (an jeweils genau einem Bauwerk).

Danach werden schrittweise Kombinationen mit Maßnahmen an 2, 3 usw. Bauwerken bis zu einer vorgegebenen Obergrenze betrachtet. In jedem Schritt werden die unzulässigen bzw. (zu) ungünstigen Kombinationen ausgeschlossen und die übrigen in „approximierbare“ und „zu bewertende“ eingeteilt. Danach folgt jeweils die Durchführung der verkehrlichen Bewertung für die zu bewertenden Kombinationen.

Im Folgenden werden die Teilschritte des Verfahrens beschrieben:

1. Ausschluss unzulässiger Kombinationen,
2. Ausschluss ungünstiger Kombinationen,
3. Berechnung der gesamtwirtschaftlichen Kosten einer Kombination und
4. Identifikation der zu berechnenden „normalen“ Kombinationen.

Im Anschluss daran werden die aus den Teilschritten resultierenden Verfahrensparameter zusammengefasst.

In der folgenden Verfahrensdarstellung wird vereinfachend davon ausgegangen, dass je Brücke nur eine Art von Verkehrseinschränkung (z.B. „Teilspernung“) auftritt. Können mehrere Arten von Verkehrseinschränkungen (z.B. „Sperrung für den Schwerverkehr“ oder „Reduktion von 3 auf 2 Fahrstreifen je Richtung“) auftreten, so kann jede Kombination aus Bauwerk und Verkehrseinschränkung formal als eigene Brücke behandelt werden, wobei Kombinationen von Brücken mit demselben Bauwerk ausgeschlossen sind.

### 7.3.1 Bezeichner

Die folgenden Bezeichner werden verwendet:

- $T = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$  bezeichnet die Menge der insgesamt  $n$  Brücken des betrachteten Teilnetzes, für die Ertüchtigungs- oder Erneuerungsmaßnahmen geplant werden sollen.
- Die Menge  $K = \{A, B, \dots\}$  bezeichnet eine Kombination von Verkehrseinschränkungen an den in  $K$  enthaltenen Brücken  $A, B$ , usw. mit  $A, B, \dots \in T$ .
- $GK(K)$  seien die zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten, die in Folge der in  $K$  enthaltenen Verkehrseinschränkungen im Vergleich zum Bezugsfall an den entsprechenden Brücken auftreten.
- $BM(K)$  bezeichnet die Differenz zwischen den zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten der Kombination  $K$  und der Summe der Einzelwirkungen der in  $K$  enthaltenen Verkehrseinschränkungen:

$$BM(K) = GK(\{A, B, \dots\}) - (GK(\{A\}) + GK(\{B\}) + \dots).$$

### 7.3.2 Ausschluss unzulässiger Kombinationen

Unzulässige Kombinationen ergeben sich zunächst aus der baulichen Vorselektion, weil Maßnahmen, deren Eingreifzeiträume sich nicht überschneiden, nicht gleichzeitig durchgeführt werden können. Auch sollten Kombinationen ausgeschlossen werden, die zur Überlastung von Brücken führen, die ihrerseits bereits Tragfähigkeitsdefizite aufweisen oder die zu unverträglichen Verlagerungen in das nachrangige, insbesondere innerörtliche Straßennetz führen. Eine weitere Grenze hinsichtlich der zu betrachtenden Kombinationen ergibt sich aus Budget- und sonstigen Kapazitätsrestriktionen.

Außerdem können Kombinationen durch den Anwender aufgrund von Expertenwissen oder Ortskenntnis ausgeschlossen werden. Dabei kann es sich beispielsweise um lokale Effekte oder um Wirkungen, die mit den vorliegenden Indikatoren nicht oder nicht angemessen berücksichtigt werden, handeln.

Jede Kombination, die eine unzulässige Teilkombination enthält, ist ihrerseits unzulässig und muss deshalb nicht bewertet werden.

### **7.3.2.1 Eingreifzeiträume der Einzelmaßnahmen**

Mit der Spezifizierung des baulichen Maßnahmenbedarfs werden die Eingreifzeiträume für die Maßnahmendurchführung eingegrenzt (vgl. Kapitel 5). Es bilden sich einerseits automatisch Cluster von Bauwerken, welche in den jeweils gleichen Eingreifzeiträumen anzugehen sind. Andererseits können Bauwerkskombinationen a priori ausgeschlossen werden, wenn sich die Eingreifzeiträume der enthaltenen Bauwerke nicht überschneiden. So lässt sich die Vielzahl der möglichen Bauwerkskombinationen bereits deutlich eingrenzen.

### **7.3.2.2 Überlastung betroffener Bauwerke**

Ein anderer Ansatz besteht darin, Kombinationen auszuschließen, die zur Überlastung von Brücken führen, die ihrerseits bereits Tragfähigkeitsdefizite aufweisen. Hierbei spielt insbesondere eine Erhöhung des Schwerverkehrs auf den Bauwerken zu einem Problem. Insofern wird hier geprüft, ob eine 2er Kombination zu einer Erhöhung der Lkw-Belastung von mehr als 30 % auf tragfähigkeitsbedingt kritischen Bauwerken (d.h. Bauwerken der Nachrechnungsliste) führt. In einem solchen Fall würden diese 2er Kombination und alle Kombinationen, die diese 2er Kombination enthalten, als unzulässig definiert. Es ist davon auszugehen, dass dieses Ausschlusskriterium nur dann greift, wenn im Rahmen der Maßnahmendurchführung an mindestens einem Bauwerk eine Sperrung für den Schwerverkehr vorgesehen ist.

### **7.3.2.3 Unvertretbare Verlagerungswirkungen**

Verkehrseinschränkungen auf Bundesfernstraßen können zu starken Verlagerungen in das nachgeordnete Netz und insbesondere auch auf Innerorts-Straßen führen. Die damit verbundenen negativen Wirkungen auf die Einwohner werden jedoch mit der Zielfunktion der Optimierung nur unzureichend bewertet. Deshalb sollten Kombinationen, die zu inakzeptablen Auswirkungen auf das innerörtliche Verkehrsnetz führen, schon vor Beginn der Optimierung ausgeschlossen werden.

### **7.3.2.4 Budgetgrenze**

Das zur Verfügung stehende jährliche Budget begrenzt maßgeblich die Anzahl der Brücken, die in einem Jahr gleichzeitig ertüchtigt oder erneuert werden können. Unter Berücksichtigung von Sonderbudgets für bestimmte Maßnahmen können somit Brücken- bzw. Maßnahmenkombinationen auf Basis der damit verbundenen jährlichen Kosten ausgefiltert werden.

### **7.3.2.5 Ausschluss durch den Anwender**

Den Anwendern des Optimierungstools wird außerdem die Möglichkeit gegeben werden, aufgrund ihrer Erfahrungen bestimmte Bauwerkskombinationen auszuschließen, um so auch Kriterien berücksichtigen zu können, die nicht adäquat im Verkehrsmodell oder in der Zielfunktion der Optimierung abgebildet werden können.

### 7.3.3 Ausschluss ungünstiger Kombinationen

Ungünstige Kombinationen sind solche, die zu besonders hohen Nutzerkosten im Vergleich zur nicht gleichzeitigen Durchführung der Maßnahmen an den enthaltenen Brücken führen. Für derartige Kombination kann zwar nicht ausgeschlossen werden, dass sie Teil eines optimalen Erüchtigungsprogramms sind, dies ist jedoch eher unwahrscheinlich.

#### Kriterien für Kombinationen

Für eine Kombination  $K = \{A, B, \dots\}$  wird also geprüft, ob die Differenz zwischen den zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten einer Kombination  $GK(K)$  und der Summe der gesamtwirtschaftlichen Kosten der enthaltenen Brücken  $GK'(K)$  mit

$$- GK'(K) = GK(\{A\}) + GK(\{B\}) + \dots$$

über einem festzulegenden Schwellwert  $SW_{U \text{ absolut}}$  mit  $SW_{U \text{ absolut}} > 0$  liegt:

$$- BM(K) = GK(K) - GK'(K) > SW_{U \text{ absolut}}?$$

Alternativ oder zusätzlich kann die relative Zunahme durch Vergleich mit einem Schwellwert  $SW_{U \text{ relativ}}$  geprüft werden:

$$- \frac{GK(K) - GK'(K)}{GK(K)} > SW_{U \text{ relativ}}?$$

Die praktische Anwendung der Kriterien setzt zwar voraus, dass die Kombination  $K$  im Verkehrsmodell bereits bewertet worden ist, sie erspart jedoch ggf. die Berechnung von Kombinationen, die  $K$  als Teilmenge enthalten.

### 7.3.4 Bewertung „normaler“ Kombinationen

#### 7.3.4.1 Verfahren

Das Verfahren zur Berechnung der gesamtwirtschaftlichen Kosten der in der Optimierung betrachteten Kombinationen von Brücken beginnt mit der Berechnung der zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten für Verkehrseinschränkungen an jeweils genau einer Brücke:

$$- GK(\{B\}) \text{ für alle Brücken } B \in T$$

im Verkehrsmodell.

Außerdem werden die gesamtwirtschaftlichen Kosten aller 2er-Kombinationen

- $GK(\{A, B\})$  mit  $A, B \in T$  und  $A \neq B$

berechnet, die theoretisch Teil eines optimalen Ertüchtigungsplans sein können, d.h. weder aus baulichen noch aus anderen Gründen ausgeschlossen werden können.

Damit liegt für jede zu betrachtende 2er-Kombination  $\{A, B\}$  auch implizit die Differenz zwischen den zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten der 2er-Kombinationen und den Summen der Kosten der jeweiligen Einzelbrücken vor:

- $BM(\{A, B\}) = GK(\{A, B\}) - (GK(\{A\}) + GK(\{B\}))$  mit  $A, B \in T$  und  $A \neq B$ .

Nach der Berechnung der 2er-Kombinationen werden nacheinander Kombinationen mit 3, 4 und mehr Brücken betrachtet. Sofern diese nicht als nicht möglich oder zu ungünstig ausgeschlossen werden können, werden die zugehörigen gesamtwirtschaftlichen Kosten entweder im Verkehrsmodell berechnet oder mit Hilfe des im Folgenden abgeleiteten Schätzers approximiert.

Die verkehrliche Bewertung endet bei einer vorgegebenen maximalen Anzahl gleichzeitiger Maßnahmen an unterschiedlichen Brücken (Verfahrensparameter, siehe Abschnitt 7.3.6).

### 7.3.4.2 Modellansatz zur Entwicklung eines Approximationsverfahrens

#### Gesamtwirtschaftliche Kosten an unabhängigen Brücken

Die gleichzeitige Maßnahmendurchführung an weitgehend voneinander unabhängigen Bauwerken führt nicht zu zusätzlichen negativen gesamtwirtschaftlichen Effekten, d. h. die Gesamtwirkung der Maßnahmen entspricht der Summe der Einzelwirkungen. Die Unabhängigkeit von Bauwerken setzt mindestens voraus, dass die jeweiligen Alternativrouten bei (Teil-)Sperrung nicht über das jeweils andere Bauwerk bzw. die jeweils anderen Bauwerke führen.

Für eine Kombination  $K$  unabhängiger Brücken  $K = \{A, B, \dots, X\}$  gilt also:

- $GK(K) = GK(\{A, B, \dots, X\}) = GK(\{A\}) + GK(\{B\}) + \dots + GK(\{X\})$ .

Für (bekannt) unabhängige Brücken lassen sich also die damit verbundenen zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten bei Bedarf, also etwa im Rahmen der Optimierung, mit Hilfe der Werte für die einzelnen Brücken direkt berechnen.

#### Gesamtwirtschaftliche Kosten an voneinander abhängigen Brücken

Hingegen ist bei voneinander abhängigen Bauwerken, deren jeweiligen Alternativrouten bei (Teil-)Sperrung über das jeweils andere Bauwerk bzw. die jeweils anderen Bauwerke führen, von zusätzlichen negativen gesamtwirtschaftlichen Effekten auszugehen. Abhängigkeiten zwischen zwei Brücken können sogar bestehen, wenn bei gleichzeitiger Sperrung auch nur abschnittsweise gleiche Alternativrouten benutzt werden, deren Restkapazitäten die umgeleiteten Verkehre beider Bauwerke nicht gleichzeitig aufnehmen können. Dabei muss auf einem solchen Abschnitt nicht notwendigerweise ein Bauwerk verortet sein (vgl. Abbildung 29).

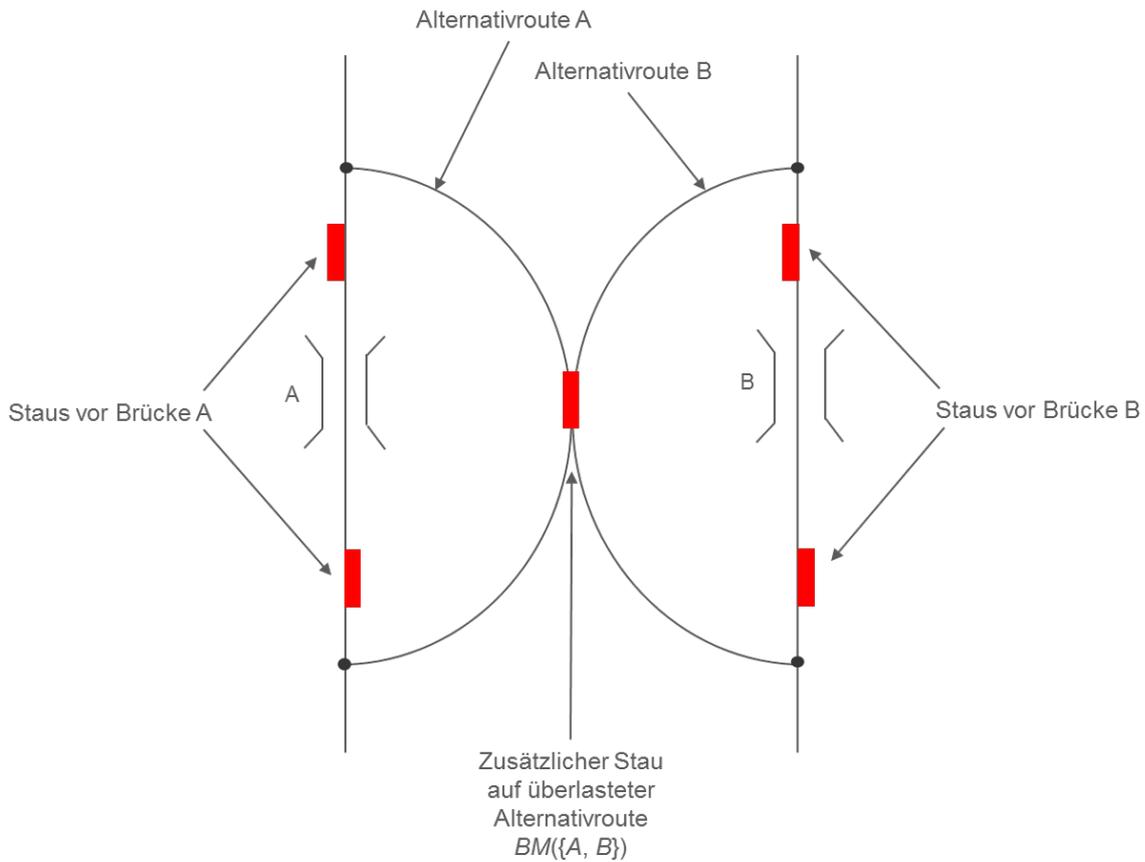


Abbildung 29: Voneinander abhängige Brücken mit gemeinsamer Alternativroute.

Für zwei Brücken  $A$  und  $B$  mit gemeinsamen Alternativrouten ist also der folgende Zusammenhang zu erwarten:

$$- GK(\{A, B\}) > GK(\{A\}) + GK(\{B\}).$$

bzw.

$$- GK(\{A, B\}) = GK(\{A\}) + GK(\{B\}) + BM(\{A, B\})$$

mit einem „Malus“  $BM(\{A, B\})$  größer als 0.

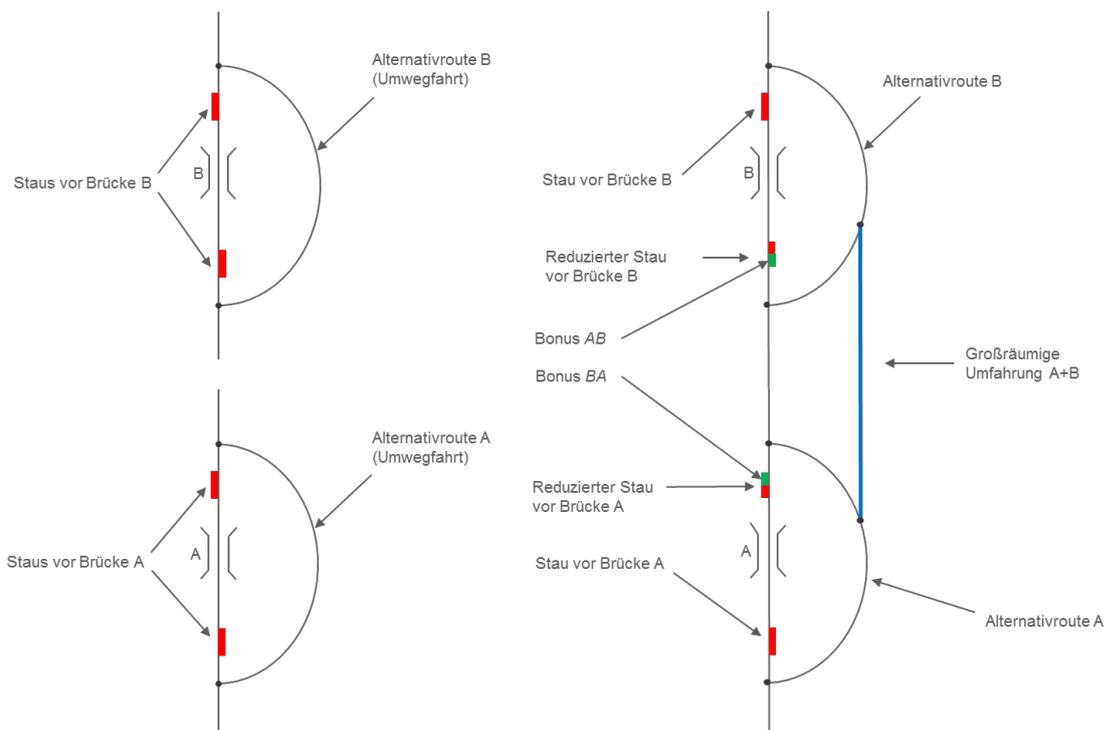


Abbildung 30: Staubildung bei Verkehrseinschränkungen an unabhängigen Brücken (links) und an im Verlauf eines Streckenzugs liegenden Brücken (rechts).

Gleichzeitige Maßnahmen an ebenfalls voneinander abhängigen Bauwerken im Laufe eines Streckenzugs bzw. eines bedeutenden Routenverlaufs können jedoch auch positive gesamtwirtschaftliche Effekte gegenüber einer zeitlich versetzten Maßnahmendurchführung mit sich bringen, wenn aufgrund des Flaschenhalseffektes insgesamt weniger Staukosten als bei einer unabhängigen Maßnahmendurchführung auftreten (siehe Abbildung 30). Daneben können sich auch Kosteneinsparungen bei einer gemeinsamen Einrichtung der Verkehrsführung für die Durchführung der Ertüchtigungsmaßnahmen ergeben.

Es gilt

$$- GK(\{A, B\}) < GK(\{A\}) + GK(\{B\}).$$

bzw.

$$- GK(\{A, B\}) = GK(\{A\}) + GK(\{B\}) + BM(\{A, B\})$$

mit einem „Bonus“  $BM(\{A, B\})$  kleiner als 0.

### Gesamtwirtschaftliche Wirkungen von Verkehrseinschränkungen

Die mit Maßnahmen bzw. Verkehrseinschränkungen an Brücken verbundenen zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten sind vornehmlich auf die folgenden Effekte zurückzuführen:

- Die reduzierte Kapazität im Baustellenbereich führt zu Staus vor der Baustelle. Diese sind nicht nur mit Reisezeitverlusten für die Verkehrsteilnehmer, sondern auch mit erhöhten Emissionen verbunden. Ggf. können Rückstauwirkungen zu zusätzlichen Einschränkungen an weiter davor liegenden Knoten (z.B. BAB-Anschlussstellen) führen.

- Im Bereich der Baustelle selbst treten Reisezeitverluste aufgrund der reduzierten Geschwindigkeit (zulässige Höchstgeschwindigkeit in Autobahnbaustellen i.d.R. 80 km/h) auf.
- Sofern Verkehrsteilnehmer auf Alternativrouten ausweichen, sind Reisezeitverluste durch Umwegfahrten zu erwarten. In Abhängigkeit von der Netztopologie können Alternativrouten allerdings auch kürzer als die Normalrouten sein, was beispielsweise zu einem Rückgang der Emissionen führen kann. Darüber hinaus können Ausweichverkehre zu Überlastungen im nachgeordneten Netz und ggf. zu weiteren, indirekten Verdrängungseffekten führen.

Sofern keine Vollsperrung vorliegt, ist im BAB-Netz bei einer wesentlichen Reduzierung der Kapazität (z.B. Wegfall eines Fahrstreifens) in jedem Fall von Stauwirkungen vor der Baustelle auszugehen.

Nennenswerte Reisezeitverluste treten jedoch nur bei längeren Brücken auf.

Wesentliche räumliche Verlagerungseffekte (Umwegfahrten) sind nur bei deutlichen Verkehrseinschränkungen (vgl. [27]) oder expliziten Sperrungen (z.B. Sperrung für den Schwerverkehr) zu erwarten.

### **Approximation der gesamtwirtschaftlichen Kosten an abhängigen Brücken**

Unter der Hypothese, dass der Bonus primär durch die vermiedenen Stau- bzw. Zeitkosten entsteht, sind verschiedene Ansätze zur Abschätzung der für drei hintereinander liegende Brücken A, B und C zu erwartende „Gewinne“ denkbar. Diese Ansätze werden zur Motivation eines Schätzers für den zu erwartenden Bonus oder Malus dargestellt.

### **Ansätze für im Laufe eines Streckenzugs liegende Brücken**

Betrachtet man zwei voneinander abhängige, im Laufe eines Streckenzugs liegende Bauwerke A und B (siehe Abbildung 30), so können die folgenden Effekte wesentlich zu einem positiven „Bonus“ beitragen:

- **Reduzierte Staukosten**  
Der Flaschenhalseffekt führt dazu, dass nach dem ersten Stau (z.B. an A in Richtung A-B, rot) die Verkehrsbelastung im Baustellenbereich und damit auch im dahinter liegenden Streckenabschnitt zurückgeht, so dass an der Brücke B geringere Staukosten als bei alleiniger Teilsperre von B anfallen („Bonus AB“, grün). In umgekehrter Fahrtrichtung entsteht ein analoger Vorteil vor Brücke A („Bonus BA“, grün).
- **Effizientere Umwegfahrten**  
Bei im Streckenverlauf räumlich eng hintereinander liegenden Baustellen kann es insgesamt günstiger sein, auf großräumige Alternativrouten auszuweichen, anstatt jede einzelne Baustelle kleinräumig zu umfahren. Diese Möglichkeit besteht jedoch nur für den überregionalen Verkehr und besitzt nur dann einen messbaren Einfluss auf die gesamtwirtschaftlichen Kosten, wenn die Verkehrseinschränkungen überhaupt zu nennenswerten Verlagerungseffekten führen (blau markierte Umfahrung für A und B).

Unter der Annahme, dass andere Effekte vernachlässigt werden können, entsprechen die gesamtwirtschaftlichen Synergieeffekte  $BM$  ( $\{A, B\}$ ) also im Wesentlichen der Summe der grün



Neben der Vernachlässigung derartiger „Fernbeziehungen“ zwischen nicht direkt benachbarten Brücken besteht ein zweiter Nachteil des Ansatzes darin, dass die Reihenfolge der Brücken (also z.B. A-B-C und nicht A-C-B) bekannt sein muss. Während dies bei im Verlauf einer Straße (z.B. der A5) liegenden Brücken (Streckenzug im engeren Sinne) kein Problem darstellt, ist die Reihenfolge bei der Betrachtung allgemeiner bedeutender Routenverläufe, auf denen ähnliche Synergieeffekte auftreten können, weniger offensichtlich bzw. müsste explizit aus dem Verkehrsmodell abgeleitet werden.

Ein pragmatischer Ansatz, der zum einen „Fernbeziehungen“ berücksichtigt und zum anderen keine Kenntnis der Reihenfolge der Brücken im Strecken- bzw. Routenverlauf benötigt, besteht darin, als Schätzwert des Bonus  $BM(\{A, B, C\})$  den Mittelwert der gemäß dem obigen Ansatz ermittelten Werte für jede mögliche Reihenfolge zu verwenden:

$$\begin{aligned}
 - \quad BM(\{A, B, C\}) &\approx \overline{BM}(\{A, B, C\}) \\
 &= \frac{1}{6} (\overline{BM}_{SZ}(A, B, C) + \overline{BM}_{SZ}(A, C, B) + \overline{BM}_{SZ}(B, A, C) \\
 &\quad + \overline{BM}_{SZ}(B, C, A) + \overline{BM}_{SZ}(C, A, B) + \overline{BM}_{SZ}(C, B, A)) \\
 &= \frac{1}{6} (BM(\{A, B\}) + BM(\{B, C\}) + BM(\{A, C\}) + BM(\{C, B\}) \\
 &\quad + BM(\{B, A\}) + BM(\{A, C\}) + BM(\{B, C\}) + BM(\{C, A\}) \\
 &\quad + BM(\{C, A\}) + BM(\{A, B\}) + BM(\{C, B\}) + BM(\{B, A\})) \\
 &= \frac{1}{6} (4 BM(\{A, B\}) + 4 BM(\{A, C\}) + 4 BM(\{B, C\})) \\
 &= \frac{2}{3} (BM(\{A, B\}) + BM(\{A, C\}) + BM(\{B, C\})).
 \end{aligned}$$

Dieser Schätzer  $\overline{BM}$  des tatsächlichen Bonus  $BM$  benötigt keine Informationen zur Reihenfolge bzw. Topologie und berücksichtigt alle paarweisen Relationen zwischen den betroffenen Brücken. Allerdings werden so die „wahren“ Verhältnisse nie getroffen, da alle Relationen gleichbehandelt werden.

### Ansatz für Brücken mit sich überschneidenden Alternativrouten

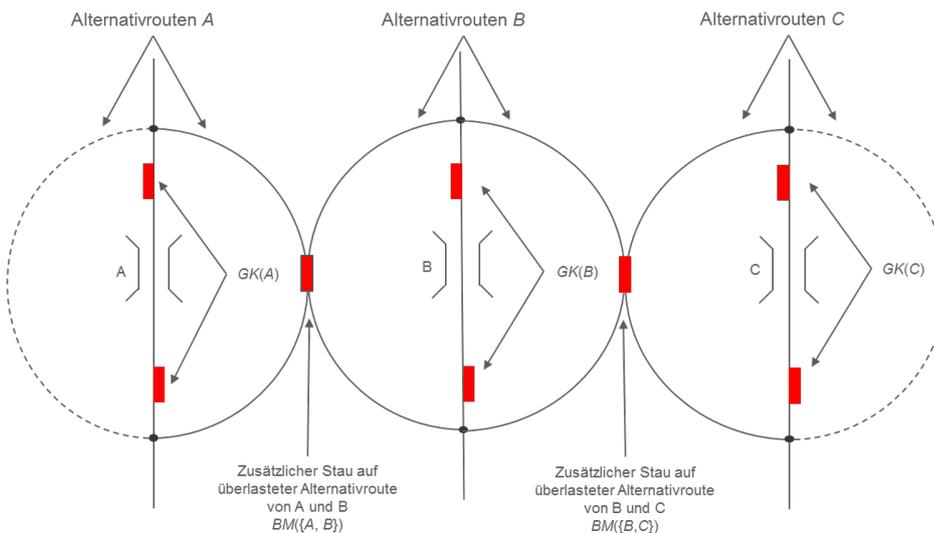


Abbildung 32: Qualitative Darstellung zusätzlicher gesamtwirtschaftlicher Kosten bei Brücken A, B und C mit sich paarweise überschneidenden Alternativrouten.

Analog dem Fall hintereinander liegender Brücken kann man auch bei Brücken mit gemeinsamen Alternativrouten den sich in der Kombination  $K$  ergebenden „Malus“  $BM(K)$  auf Basis der sich paarweise ergebenden Effekte schätzen (vgl. Abbildung 32). Nimmt man an, dass sich im

Wesentlichen nur die direkt benachbarten Brücken beeinflussen, erhält man für drei parallel liegende Brücken  $A$ ,  $B$  und  $C$  mit sich paarweise überschneidenden Alternativrouten:

$$- BM(\{A, B, C\}) \approx \overline{BM}_{AR}(A, B, C) = BM(\{A, B\}) + BM(\{B, C\}).$$

Berücksichtigt man jedoch, dass sich die Alternativrouten aus der Topologie des Netzes und weniger aus den Entfernungen zwischen den Brücken ergeben und nimmt man weiter an, dass die bestehenden Abhängigkeiten implizit in den paarweisen Mehrkosten zwischen den Brücken enthalten sind, ist es plausibel, den Malus  $BM(\{A, B, C\})$  analog dem Fall von im Verlauf einer Route liegenden Brücken als Mittelwert der möglichen Anordnungen, also durch  $\overline{BM}(\{A, B, C\})$  zu schätzen.

### 7.3.4.3 Verfahren zur Approximation der gesamtwirtschaftlichen Kosten

Der im vorhergehenden Abschnitt für drei Brücken motivierte Schätzer  $\overline{BM}(\{A, B, C\})$  wird im Folgenden auf eine Kombination  $K = \{B_1, \dots, B_n\}$  aus  $n$  verschiedenen Brücken erweitert. Das bedeutet, dass als Schätzer des „wahren“ Wertes  $BM(K)$  des mit  $K$  verbundenen Bonus oder Malus der Mittelwert der Schätzungen für alle Permutationen von  $K$  verwendet wird.

Bezeichnet

- $p$  die Anzahl der Permutationen von  $K$ ,
- $\overline{BM}_p(B_{\pi(1)}, \dots, B_{\pi(n)}) = \sum_{i=1}^{n-1} BM(B_{\pi(i)}, B_{\pi(i+1)})$   
den Schätzer für eine Permutation  $\pi$  von  $K$  (bzw. der Indizes  $1 \dots n$ ) und
- $\pi_j$  die  $j$ 'te Permutation von  $K$  mit  $j=1, \dots, p$ ,

so ist der gesuchte Schätzer für  $BM(K)$ :

$$\begin{aligned} - \overline{BM}(K) &= \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \overline{BM}_p(B_{\pi_j(1)}, \dots, B_{\pi_j(n)}) \\ &= \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{n-1} BM(B_{\pi_j(i)}, B_{\pi_j(i+1)}). \end{aligned}$$

Beobachtungen:

- Es existieren  $p = n!$  Permutationen von  $K$ .
- Die innere Summe enthält  $n - 1$  Summanden.
- Damit treten in der Summenformel insgesamt  $n! \cdot (n-1)$  Summanden auf.
- Es existieren insgesamt  $n \cdot (n-1)$  unterschiedliche Summanden bzw. 2er-Kombinationen  $BM(B_i, B_j)$  mit  $i \neq j$ .
- Da jeder Summand bzw. jede 2er-Kombination gleich häufig ist, tritt jeder Summand  $\frac{n!(n-1)}{n(n-1)} = (n-1)!$  mal auf.

Damit erhält man:

$$\begin{aligned} \bullet \quad \overline{BM}(K) &= \frac{1}{n!} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n (n-1)! BM(B_i, B_j) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n BM(B_i, B_j). \end{aligned}$$

Als Schätzer ergibt sich also die Summe der Boni bzw. Mali aller möglichen Zweierkombinationen geteilt durch die Anzahl der Brücken.

Die geschätzten gesamtwirtschaftlichen Kosten einer Kombination  $K$  betragen damit:

$$\begin{aligned} \bullet \quad \overline{GK}(K) &= \sum_{i=1}^{n-1} GK(B_i) + \overline{BM}(K). \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} GK(B_i) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n BM(B_i, B_j). \end{aligned}$$

#### 7.3.4.4 Anwendung des Schätzers

Das im vorhergehenden Abschnitt definierte Verfahren zur Approximation der gesamtwirtschaftlichen Kosten einer Kombination von Verkehrseinschränkungen an verschiedenen Brücken kann rein rechnerisch auf beliebige Kombinationen angewendet werden. Aus der Herleitung des Verfahrens ergeben sich jedoch noch keine Aussagen zur Qualität der Ergebnisse.

Die Güte des Schätzers wird deshalb empirisch im Rahmen von AP 5 „Demonstration und Validierung“ überprüft.

#### 7.3.5 Identifikation der zu berechnenden „normalen“ Kombinationen

Die vorliegenden empirischen Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Schätzung zumindest bei im Verlauf eines Streckenzuges liegenden Brücken (positive Synergieeffekte) und bei sich negativ beeinflussenden Brücken möglich ist, während die Bewertung „gemischter“ Teilmengen problematisch erscheint. Ausgehend von vorliegenden gesamtwirtschaftlichen Werten für 2er-Beziehungen müssen daher die folgenden Arten von Kombinationen *nicht* explizit berechnet werden:

- Kombinationen  $K$ , die ausschließlich „positive“ Zusammenhänge (Synergieeffekte zwischen Brücken) enthalten.
- Kombinationen, die ausschließlich unabhängige Brücken enthalten.  
Hier kann die Schätzung sowohl über die Addition der Werte der einzelnen Brücken als auch mit Hilfe des oben definierten Schätzers erfolgen.
- Kombinationen  $K$ , die ausschließlich „negative“ Zusammenhänge enthalten (Überschneidung der Alternativrouten).  
Diese Kombinationen können nach ersten Ergebnissen approximiert werden, es liegen bislang allerdings nur wenige empirische Daten dazu vor.

Die Unterscheidung der verschiedenen Klassen erfolgt anhand eines Schwellwertes  $SW_U$ , wobei in den Beispielrechnung mit  $SW_U = 10\%$  gerechnet wurde:

- $K$  positiv:  $\frac{BM(A,B)}{GK(A)+GK(B)} < -SW_U$  für alle  $A, B \in K$
- $K$  unabhängig:  $-SW_U \leq \frac{BM(A,B)}{GK(A)+GK(B)} \leq SW_U$  für alle  $A, B \in K$
- $K$  negativ:  $\frac{BM(A,B)}{GK(A)+GK(B)} > SW_U$  für alle  $A, B \in K$ .

Andere Arten von Kombinationen sollten nach den bisherigen Erkenntnissen im Verkehrsmodell berechnet werden, sofern sie nicht als unzulässig oder (zu) ungünstig ausgeschlossen werden können.

Die Approximierbarkeit hängt allerdings auch von den gewählten Indikatoren ab. Problematisch sind Indikatoren, die den Haupteffekten (Zeitverluste, Unfallkosten) entgegenwirken und im Einzelfall überwiegen oder das Gesamtergebnis wesentlich ändern können (z.B. geringere Emissionen aufgrund kürzerer Wege bei Vernachlässigung der Immissionswirkungen im städtischen Bereich).

### 7.3.6 Zusammenfassung der Verfahrensparameter

In Tabelle 10 werden die Parameter der beschriebenen Verfahrensschritte zusammengefasst:

Parameter	Beschreibung
$B$	Maximales Budget pro Jahr [EUR]
$n_{Max}$	Maximale Anzahl gleichzeitiger Maßnahmen im Teilnetz
$SW_{Kap, abs}$	Absoluter Schwellwert für die Verkehrszunahme an betroffenen Bauwerken [Fzg/h]
$SW_{Kap, rel}$	Relativer Schwellwert für die Verkehrszunahme an betroffenen Bauwerken [%]
$SW_V$	Absoluter Schwellwert für die Zunahme des in das innerstädtische Netz verlagerten Verkehrs [Fzg km]
$SW_{N, abs}$	Absoluter Schwellwert für die Zunahme der gesamtwirtschaftlichen Kosten einer 2er-Kombination im Vergleich zur Einzeldurchführung [EUR]
$SW_{N, rel}$	Absoluter Schwellwert für die Zunahme der gesamtwirtschaftlichen Kosten einer 2er-Kombination im Vergleich zur Einzeldurchführung [%]
$SW_U$	(Relativer) Schwellwert zur Unterscheidung unabhängiger Bauwerke [%]

Tabelle 10: Verfahrensparameter

#### Maximale Anzahl gleichzeitiger Maßnahmen an unterschiedlichen Brücken

Das jährliche Budget  $B$  beschränkt die maximalen Kosten von Kombinationen gleichzeitiger Maßnahmen bzw. Verkehrseinschränkungen. Damit begrenzt es zum einen direkt die Menge der zu bewertenden Kombinationen, zum anderen lässt sich daraus eine Grenze für die maximale

überhaupt in der Optimierung zu betrachtende Anzahl von Bauwerken mit gleichzeitigen Maßnahmen  $n_{Max}$  ableiten.

In Fällen, in denen zwar theoretisch Kombinationen mit einer hohen Anzahl gleichzeitiger Maßnahmen auftreten können, jedoch die Rechenkapazität bzw. die zur Verfügung stehende Zeit nicht zur Berechnung aller eigentlich zu bewertenden Kombinationen ausreicht, besteht die Möglichkeit,  $n_{Max}$  pragmatisch zu setzen, so dass für Kombinationen mit einer höheren Anzahl von Maßnahmen auf Näherungslösungen zurückgegriffen wird.

### **Schwellwerte bzgl. Wirkungen auf andere Bauwerke**

Mit Hilfe der Schwellwerte  $SW_{Kap, abs}$  und  $SW_{Kap, rel}$  für die Verkehrszunahme an betroffenen Bauwerken werden Kombinationen ausgeschlossen, die zur Überlastung von Brücken mit bereits existierenden Tragfähigkeitseinschränkungen führen. Der erste Schwellwert  $SW_{W, absolut}$  legt eine Obergrenze für die absolute Zunahme und der zweite Schwellwert  $SW_{W, relativ}$  für die relative Zunahme fest, ab der es möglicherweise zu einer Überlastung des betroffenen Bauwerks kommt.

Nachdem sich im Rahmen von Beispielrechnungen gezeigt hat, dass dieses Kriterium bei „normalen“ Verkehrseinschränkungen nur selten zum Tragen kommt, wird empfohlen, in weiteren Beispielrechnungen insbesondere die Wirkung von Sperrungen für den Schwerverkehr zu untersuchen.

### **Schwellwert zum Ausschluss von Kombinationen mit inakzeptablen Wirkungen**

Mit Hilfe des Schwellwertes  $SW_V$  sollen Kombinationen, die mit inakzeptable Verkehrsverlagerungen in das innerstädtische Netz verbunden sind, ausgeschlossen werden. Damit werden Wirkungen berücksichtigt, die in der Zielfunktion der Optimierung mit den aktuellen Indikatoren nicht angemessen abgebildet werden können.

### **Schwellwerte zum Ausschluss ungünstiger Kombinationen**

Es werde zwei Schwellwerte definiert, anhand derer entschieden wird, ob eine noch nicht bewertete Kombination voraussichtlich *nicht* Teil einer optimalen Lösung ist und deshalb nicht bewertet werden muss. Beide Schwellwerte beziehen sich als Kriterien auf die in der zu bewertenden Kombination enthaltenen Teilkombinationen, für die bereits Werte vorliegen.  $SW_{N, abs}$  stellt eine absolute und  $SW_{N, rela}$  eine relative Obergrenze für die Differenz der Nutzerkosten bei gleichzeitiger bzw. nicht gleichzeitiger Durchführung der enthaltenen Maßnahmen dar.

### **Schwellwerte zur Abgrenzung abhängiger und unabhängiger Brücken**

Der Schwellwert  $SW_U$  dient der Entscheidung, ob aufgrund des Vergleichs der gesamtwirtschaftlichen Kosten der gleichzeitigen bzw. der nicht gleichzeitigen Durchführung der Maßnahmen einer Kombination von der Unabhängigkeit der enthaltenen Brücken ausgegangen werden kann.

## **7.4 Anwendungsbeispiel: Verkehrliche Bewertung gleichzeitiger Maßnahmen**

Im Anwendungsbeispiel ergaben sich auf Basis der möglichen Maßnahmenalternativen für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums mögliche Kombinationen (vgl. Abbildung 33).

Alle baulich möglichen Maßnahmenkombinationen wurden im Hinblick auf ihre Zulässigkeit geprüft.

Dafür wurden die beiden folgenden Kriterien angewendet:

- Verlagerung auf Innerortsstraßen:  
Ein Szenario wird dann als unzulässig eingestuft, wenn sich die Verkehrsleistung auf Innerortsstraßen um mehr als 200.000 Fzg-km erhöht.
- Ungünstige Kombinationen:  
Ein Szenario wird dann als ungünstig und damit unzulässig eingestuft, wenn die gesamtwirtschaftlichen Kosten einer Maßnahmenkombination um mehr als 5 % höher sind als die Summe der Einzelmaßnahmen.
- Indirekte Ausschlüsse:  
Szenarien werden dann ausgeschlossen, wenn sie eine unzulässige oder ungünstige Teilkombination enthalten. Dieses Kriterium wird bei Maßnahmenkombinationen mit drei oder mehr Bauwerken angewendet.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- 2er-Kombinationen (insgesamt 64 Szenarien)
  - Keine unzulässigen Kombinationen aufgrund der Verlagerung auf Innerortsstraßen
  - Sechs ungünstige Kombinationen
- 3er-Kombinationen (insgesamt 155 Szenarien)
  - 22 unzulässige Kombinationen aufgrund der Verlagerung auf Innerortsstraßen
  - 11 ungünstige Kombinationen
  - 4 indirekte Ausschlüsse
- 4er-Kombinationen (insgesamt 110 Szenarien)
  - 39 unzulässige Kombinationen aufgrund der Verlagerung auf Innerortsstraßen
  - 4 ungünstige Kombinationen
  - 51 indirekte Ausschlüsse
- 5er-Kombinationen (insgesamt 187 Szenarien)
  - 112 unzulässige Kombinationen aufgrund der Verlagerung auf Innerortsstraßen
  - 2 ungünstige Kombinationen
  - 154 indirekte Ausschlüsse
- 6er-Kombinationen (insgesamt 158 Szenarien)
  - 110 unzulässige Kombinationen aufgrund der Verlagerung auf Innerortsstraßen
  - 2 ungünstige Kombinationen
  - 157 indirekte Ausschlüsse
- 7er-Kombinationen (insgesamt 64 Szenarien)
  - 59 unzulässige Kombinationen aufgrund der Verlagerung auf Innerortsstraßen

- keine ungünstigen Kombinationen
- 64 indirekte Ausschlüsse
- 8er- und 9er-Kombinationen (insgesamt 19 Szenarien)
  - 19 unzulässige Kombinationen aufgrund der Verlagerung auf Innerortsstraßen
  - keine ungünstigen Kombinationen
  - 19 indirekte Ausschlüsse

Insgesamt wurden 757 baulich mögliche Maßnahmenkombinationen betrachtet. Nach Anwendung der Ausschlusskriterien bleiben davon 261 Kombinationen übrig, um in ein optimiertes Ertüchtigungsprogramm einbezogen zu werden.

Insbesondere die Szenarien mit einer großen Anzahl an Bauwerken führen zu großen Verlagerungen von Verkehrsleistung auf das innerstädtische Straßennetz. Diese in einem optimierten Ertüchtigungsprogramm unerwünschten Szenarien können durch Anwendung des Ausschlusskriteriums von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden.

Trotz der in großen Teilnetzen (mit annähernd 50 Bauwerken) zu erwartenden großen Anzahl theoretischer Kombinationsmöglichkeiten, zeigt dieses Ergebnis, dass es möglich ist, anhand fachlich plausibler Ausschlusskriterien, die Anzahl der Maßnahmenkombinationen deutlich zu reduzieren und so auch größere Projekte zu rechnen.



## 8 Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme

Mit einem optimierten Ertüchtigungsprogramm soll für die Gesamtheit der im Teilnetz erforderlichen Maßnahmen ein möglichst hoher gesamtwirtschaftlicher Nutzen generiert werden, d. h. die negativen Auswirkungen von Verkehrseinschränkungen durch Baustellen sollen für die Verkehrsteilnehmer insgesamt möglichst gering gehalten werden. Die hier dargestellte Methodik hat zum Ziel für Teilnetzen mit bis zu 50 Bauwerken anwendbar zu sein.

Ausgehend von den Ergebnissen der Vorselektion von Bauwerken unter baulichen und verkehrlichen Gesichtspunkten (vgl. Kapitel 4), der Ableitung des baulichen Maßnahmenbedarfs (Kapitel 5) und der Bewertung von Ertüchtigungsoptionen auf der Objektebene (vgl. Kapitel 6) soll für jedes Bauwerk genau eine Alternative gewählt werden, so dass sich insgesamt ein möglichst optimaler Plan ergibt. Ein solcher zeichnet sich einerseits durch hohe (Rest-) Werte der Bauwerke am Ende des Bewertungszeitraums und geringe Baukosten aus und ist andererseits mit möglichst geringen negativen gesamtwirtschaftlichen Wirkungen verbunden. Außerdem muss er verschiedenen Randbedingungen wie etwa Budgetbeschränkungen oder Ausschlüssen gleichzeitiger Verkehrseinschränkungen an bestimmten Bauwerken genügen.

### 8.1 Optimierungsziel

#### 8.1.1 Zielfunktion

Grundsätzlich besteht die Optimierungsaufgabe darin, den durch die zu planenden Ertüchtigungsmaßnahmen erreichten Gesamtnutzen  $GN$  zu maximieren. Dieser setzt sich aus den im Betrachtungszeitraum auftretenden Nutzerkosten und den am Ende des Betrachtungszeitraums vorliegenden Restwerten der Bauwerke zusammen:

$$\text{Max! } GN = \sum \text{Restwert} - \sum \text{Nutzerkosten.}$$

Eine reine Maximierung des Nutzens, unabhängig von der Höhe der dazu erforderlichen Finanzmittel, steht jedoch im Widerspruch zum Grundsatz einer sparsamen und wirtschaftlichen Haushaltsführung, zu der die öffentliche Hand verpflichtet ist. Daher werden, wenn sie nicht als Budgetbeschränkungen oder in anderer Form extern berücksichtigt werden, die Maßnahmenkosten normalerweise in der Zielfunktion des Bewertungsverfahrens erfasst.

Kann also nicht angenommen werden, dass die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen bereits ausreichend in der Bewertung der Ertüchtigungsoptionen sichergestellt wurde, so dass nur noch ausreichend wirtschaftliche Maßnahmen zur Auswahl stehen, so sollte als Zielfunktion anstelle des Gesamtnutzens entweder

- die Nutzen-Kosten-Differenz  $NKD$

$$\text{Max! } NKD = \sum \text{Restwert} - \sum \text{Nutzerkosten} - \sum \text{Baulastträgerkosten oder}$$

- das Nutzen-Kosten-Verhältnis  $NKV$

$$\text{Max! } NKV = (\sum \text{Restwert} - \sum \text{Nutzerkosten}) / \sum \text{Baulastträgerkosten}$$

verwendet werden.

Im Projekt wurde aufgrund der leichteren Interpretierbarkeit die Nutzen-Kosten-Differenz als Zielfunktion gewählt.

Um möglichst flexibel zu sein, wurde im aktuellen Projekt die folgende Fassung mit Gewichtungsfaktoren  $\alpha$  für die einzelnen Komponenten gewählt (vgl. Abschnitt 3.2.2 Bewertungskriterien):

$$\begin{aligned} \text{Max! } NKD = & \alpha_{\text{Restwert}} \quad \sum \text{ Restwert} \\ & - \alpha_{\text{Kosten}} \quad \sum \text{ Baulastträgerkosten} \\ & - \alpha_{\text{Zeit}} \quad \quad \quad \sum \text{ Zeitkosten} \\ & - \alpha_{\text{Emissionen}} \quad \sum \text{ Emissionskosten} \\ & - \alpha_{\text{Unfälle}} \quad \quad \sum \text{ Unfallkosten.} \end{aligned}$$

Die Gewichtungsfaktoren können als Verfahrensparameter frei gewählt werden, so dass beispielsweise auch die eingangs genannte Maximierung des Gesamtnutzens oder eine reine Minimierung der Nutzerkosten ohne Berücksichtigung von Baulastträgerkosten oder Restwerten der Bauwerke gerechnet werden kann.

### 8.1.2 Kapazitätsbeschränkungen

Nimmt man an, dass die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen bereits im Vorfeld, d.h. bei der Auswahl der Maßnahmen, berücksichtigt wurde und die Ertüchtigung wichtiger Brücken eine sehr hohe Priorität besitzt, so kann für die Durchführungsphase das Vorhandensein eines ausreichenden Budgets angenommen werden. Das Fehlen von Budgetrestriktionen führt allerdings dazu, dass für die Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme ein sehr großer Lösungsraum, dessen Größe exponentiell mit der Anzahl der Brücken zunimmt, durchsucht werden muss.

In der Realität treten jedoch andere Kapazitätsbeschränkungen, etwa beim für Planung und Bauüberwachung zur Verfügung stehenden Personal auf, die die jährlichen Schwankungen der Bauintensität bzw. die Höhe der verbaubaren finanziellen Mittel begrenzen. Auch sind beliebige Schwankungen der abgerufenen Mittel verwaltungstechnisch nicht darstellbar, so dass im Verfahren auch Budgetbeschränkungen zu berücksichtigen sind.

### 8.1.3 Optimierungsverfahren

Selbst bei einer deutlichen Reduktion der Anzahl der Alternativen je Bauwerk im Rahmen der Vorselektion ist ein vollständiges Durchsuchen des Lösungsraums unrealistisch, da sich aus der Zielgröße von 50 Brücken selbst unter Annahme von jeweils nur 10 Alternativen je Bauwerk bereits eine Gesamtzahl von  $10^{50}$  Kombinationen ergibt, sofern der Lösungsraum nicht über den Ausschluss von Kombinationen von Alternativen bzw. gleichzeitigen Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Bauwerken verkleinert werden kann.

Der Ansatz des im Vorgängerprojekt implementierten Branch-and-Bound-Verfahrens zielte deshalb darauf ab, nur einen kleinen Teil des Lösungsraums tatsächlich zu durchsuchen, indem bereits Teillösungen (Ertüchtigungsprogramme für eine Teilmenge der Bauwerke) daraufhin geprüft wurden, ob sie Teil einer optimalen Lösung, d.h. einer Lösung mit maximalem Gesamtnutzen, sein können. Als Hauptproblem des Verfahrens erwies sich die Abschätzung des ausgehend von einer vorliegenden Teillösung theoretisch erreichbaren Gesamtnutzens, der aufgrund der Nicht-Additivität der Nutzerkosten systematisch überschätzt wurde, so dass er als Kriterium zur Einschränkung des Suchraums unzureichend war.

Grundsätzlich bestände eine Möglichkeit darin, zu versuchen, das Bound-Kriterium durch ein heuristisches Kriterium zu ersetzen oder um ein solches zu ergänzen, welches versucht, den erreichbaren Nutzen auf Basis von Kennzahlen wie Anzahl oder Dauer gleichzeitiger Verkehrseinschränkungen im Bewertungszeitraum abzuschätzen. Abgesehen davon, dass verschiedene in Frage kommende Kriterien durchprobiert bzw. bezüglich ihrer Wirksamkeit untersucht werden müssten und prinzipiell immer das Risiko bestände, gute Lösungen auszuschließen, ergäbe sich hierbei jedoch das Problem der Kalibrierung der Kriterien in Hinblick auf die Zielfunktion (Maximierung der Summe aus Restwert und (negativen) Nutzerkosten).

### **8.1.4 Folgerungen**

Aufgrund der Größe des Lösungsraums wurde im aktuellen Projekt als Optimierungsverfahren ein heuristischer Ansatz gewählt, mit dem bei akzeptabler Laufzeit zwar nicht unbedingt das Optimum, dafür aber mit hoher Wahrscheinlichkeit zumindest gute Lösungen gefunden werden.

Zur Verkleinerung des Lösungsraums sollte im Vorfeld der Optimierung die Anzahl der Alternativen je Bauwerk durch Einschränkung der Eingreifzeiträume der Maßnahmen auf Basis baulicher Kriterien möglichst weit beschränkt werden.

Eine Verkleinerung des Lösungsraums wird außerdem durch die explizite Berücksichtigung der folgenden Randbedingungen erreicht:

- Beschränkung der nominalen Kosten.

Dabei kann das Budget für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums individuell festgelegt werden. Außerdem kann für jede Maßnahmenvariante angegeben werden, welcher Anteil der Kosten berücksichtigt werden muss, so dass beispielsweise Maßnahmen, die aus „Sondertöpfen“ finanziert werden, nicht budgetwirksam werden.

- Beschränkung der Anzahl gleichzeitiger Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Bauwerken.
- Ausschlüsse von Kombinationen von gleichzeitigen Verkehrseinschränkungen an zwei oder mehr unterschiedlichen Bauwerken aufgrund unzulässiger oder ungünstiger verkehrlicher Wirkungen.

Dabei wird implizit angenommen, dass auch Kombinationen, die eine solche unzulässige Kombination als Teilmenge enthalten, nicht zulässig sind.

## **8.2 Optimierungsverfahren**

Ausgehend vom Optimierungsziel und den festgestellten Randbedingungen wurde für die Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme eine neues Verfahren auf Basis von Tabu Search (vgl. [20] und [21]) implementiert. Bei Tabu Search handelt es sich um ein heuristisches, trajektorienbasiertes Optimierungsverfahren, das häufig bei Problemen im Bereich der Termin- und Ablaufplanung (Scheduling) zum Einsatz kommt und auch in verwandten Anwendungsbereichen wie etwa der Erhaltung von Schieneninfrastruktur bereits erfolgreich eingesetzt wurde (vgl. [2] und [22]).

Es durchsucht den Lösungsraum ausgehend von einer gültigen Startlösung und gibt die beste während der Suche erzeugte Lösung als Ergebnis aus (vgl. Abbildung 34 und Abbildung 35).

## 8.2.1 Allgemeine Verfahrensbeschreibung

```
aktuelleLösung = ErzeugeStartLösung ()
SOLANGE (Abbruchkriterium nicht erfüllt)
    nachbarschaft = ErzeugeNachbarschaft (aktuelleLösung)
    Evaluiere (nachbarschaft)
    nachbarschaft = EntferneTabuZüge (nachbarschaft)
    aktuelleLösung = WähleBestenZug (nachbarschaft)
    Tabuisiere (AusgeführterZug, TabuDauer)
ENDE SOLANGE
```

Abbildung 34: Tabu Search – Pseudocodedarstellung

Das Verfahren beginnt mit einer beliebigen zulässigen Startlösung. Als Startlösung kann theoretisch für jede Brücke eine beliebige Ertüchtigungsalternative gewählt werden. Es ist jedoch unter Umständen zur Beschleunigung des Verfahrens vorteilhaft, zu versuchen, gleich eine möglichst gute Startlösung zu erzeugen, etwa indem je Brücke eine möglichst gute Alternative gewählt wird.

Ausgehend von der Startlösung als aktueller Lösung wird als nächstes versucht, diese in einer Schleife solange schrittweise zu verändern, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erreicht wird. Als Abbruchkriterium kann beispielsweise eine Mindestqualität der Lösung vorgegeben werden, sofern sich diese berechnen oder abschätzen lässt. In der Praxis wird häufig ein Ansatz gewählt, bei dem die Optimierung abgebrochen wird, wenn sich die Qualität der gefundenen Lösungen nicht mehr verbessert oder eine vorgegebene Gesamtrechenzeit erreicht wird.

Als Ergebnis wird die beste im Rahmen der Optimierungsschleife bewertete Lösung ausgegeben.

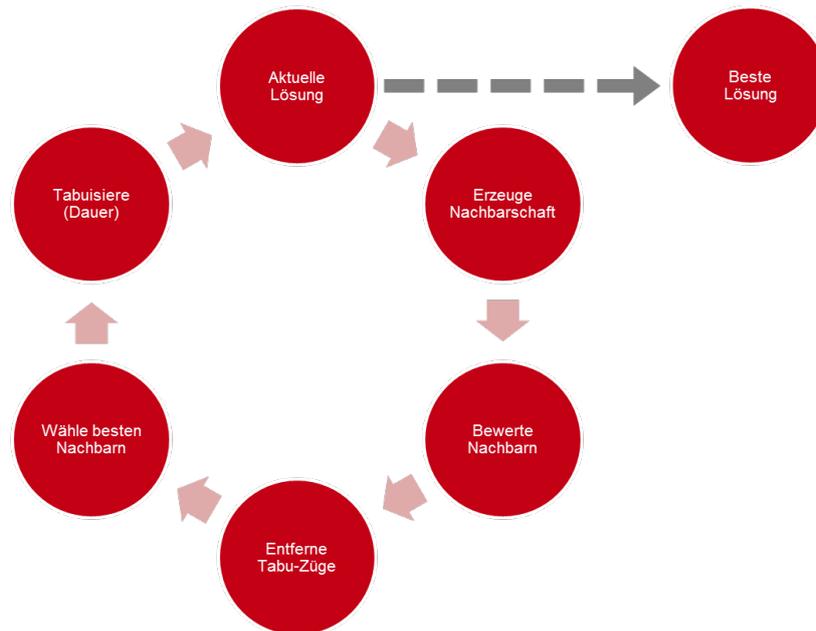


Abbildung 35: Tabu Search – Optimierungszyklus

Die eigentliche Optimierung beginnt mit der Erzeugung einer Nachbarschaft der aktuellen Lösung, die alle Lösungen enthält, die sich aus der aktuellen Lösung durch eine Menge vorgegebener Veränderungen erzeugen lassen. Als zulässige Veränderung könnte beispielsweise das Ersetzen einer Ertüchtigungsalternative an einer einzelnen Brücke gewählt werden.

Anschließend werden die so erzeugten Nachbarlösungen bewertet in der Hoffnung, die aktuelle Lösung durch eine bessere Lösung ersetzen zu können.

Nach der Bewertung werden jedoch zunächst solche Nachbarn, die bestimmten Tabu-Kriterien genügen, entfernt<sup>9</sup>. Durch die Tabu-Kriterien werden permanent oder temporär bestimmte Lösungen von der Suche ausgeschlossen.

Nach der Entfernung nicht erlaubter Nachbarn wird die aktuelle Lösung durch die beste „benachbarte“ neue Lösung ersetzt. Diese Lösung muss nicht zwingend besser als die aktuelle Lösung sein, d.h. es werden temporär auch schlechtere Lösungen betrachtet in der Hoffnung, dass diese als Ausgangspunkt für die Erzeugung neuer, besserer Lösungen dienen können.

Als nächstes wird die Tabu-Liste aktualisiert. Diese dient vor allem dazu, Zyklen beim Durchsuchen des Lösungsraums zu vermeiden, was in der Praxis z.B. dadurch verhindert werden kann, dass das Rückgängig-Machen kürzlich erfolgter Änderungen für einen gewissen Zeitraum verboten (tabuisiert) wird.

<sup>9</sup> Die Reihenfolge hängt von den Details der Problemlösung ab. Ggf. ist es möglich, die Berücksichtigung der Tabu-Kriterien bereits in die Erzeugung der Nachbarschaft oder in die Bewertung zu integrieren.

## 8.2.2 Einordnung

Das Verfahren verbindet eine lokale Optimierung („Hill Climbing“, Auswahl des „besten“ Nachbarn) mit einem Ansatz zur Vermeidung des Verharrens in einem lokalen Optimum (Tabuisierung).

Da das Verfahren mit beliebigen Startlösungen beginnen kann, besteht auch die Möglichkeit, es mit einer systematischen Suche im Lösungsraum oder einer heuristischen Erzeugung von Startlösungen zu kombinieren.

Interessant ist auch die Möglichkeit, mit manuell erzeugten Lösungen zu starten oder a priori über die Tabu-Kriterien bestimmte Teile des Lösungsraums auszuschließen. Beide Ansätze eröffnen die Möglichkeit, durch Interaktion mit dem Anwender (Eingabe einer Startlösung und/oder von Ausschlussbedingungen) Nutzerwissen in das Verfahren einzubringen bzw. gezielt die Qualität bestimmter Lösungen zu überprüfen.

## 8.3 Umsetzung des Verfahrens

Bei Tabu Search handelt es sich weniger um ein konkretes Verfahren als vielmehr um eine Strategie, deren einzelne Elemente aufgabenbezogen umgesetzt werden müssen. Diese Umsetzung wird im Folgenden unabhängig von einer konkreten Implementierung beschrieben.

### 8.3.1 Erzeugung und Repräsentation von Lösungen

#### Repräsentation von Lösungen

Da der Ertüchtigungsplan für jedes Bauwerk genau eine Alternative enthalten soll, lässt sich bei  $n$  Bauwerken jede potenzielle Lösung bzw. jeder Lösungskandidat als  $n$ -dimensionaler Vektor darstellen, der an der  $i$ 'ten Stelle die Nummer der für das  $i$ 'te Bauwerk ausgewählten Alternative enthält.

#### Erzeugung von Startlösungen

Im Software-Prototyp wurden drei einfache Methoden zur Erzeugung neuer Lösungen umgesetzt:

- Wahl der jeweils ersten Alternative für jedes Bauwerk,
- Wahl einer zufälligen Alternative je Bauwerk und
- Vorgabe einer Startlösung durch den Anwender.

Eine weitere sinnvolle Methode wäre z.B.

- die Wahl der objektbezogen besten Alternative je Bauwerk.

### 8.3.2 Gültigkeit von Lösungen

Eine Lösung, d.h. eine Kombination aus jeweils genau einer Alternative je Bauwerk, ist dann gültig, wenn sie den folgenden Bedingungen genügt:

- Die aufaddierten budgetwirksamen nominalen Maßnahmekosten aller gewählten Alternativen dürfen in keinem Jahr des Betrachtungszeitraums das Budget des jeweiligen Jahres überschreiten.
- In keinem Jahr des Betrachtungszeitraums tritt eine unzulässige Kombination von gleichzeitigen Verkehrseinschränkungen an zwei oder mehr Bauwerken auf. Das beinhaltet, dass keine unzulässige Kombination Teil einer auftretenden Kombination ist.
- Die vorgegebene Maximalzahl gleichzeitiger Verkehrseinschränkungen (Verfahrensparameter) wird in keinem Jahr des Betrachtungszeitraums überschritten.

### 8.3.3 Erzeugung der Nachbarschaft einer Lösung

Die Nachbarschaft einer Lösung bzw. eines Ertüchtigungsplans wird durch die ihr ähnlichen Pläne gebildet. Je nach Umsetzung erhält man als Nachbarschaft Mengen mit mehr oder weniger Elementen. Dabei bedeutet eine größere Nachbarschaft, dass im nachfolgenden Schritt zwar mehr Lösungen ausgewertet werden müssen, aber dafür tendenziell größere Sprünge im Lösungsraum möglich sind. Andererseits ist eine Nachbarschaft mit weniger Lösungen schneller ausgewertet, so dass ggf. eher zu einer besseren Lösung gewechselt werden kann.

In den Schritt zur Erzeugung der Nachbarschaft kann prinzipiell auch die Prüfung der Tabu-Kriterien oder der Gültigkeit der erzeugten Lösungen bezogen auf die einzuhaltenden Nebenbedingungen (siehe Abschnitt Abschnitt 8.3.5 bzw. 8.3.2) integriert sein.

#### Untersuchte Varianten

Im Projekt wurden zwei Varianten implementiert:

- „Nächste Alternative“

Die Nachbarschaft besteht aus den Plänen, die sich durch Ersetzen der gewählten Alternative an genau einem Bauwerk durch die nächste nicht durch die Tabuliste ausgeschlossene Alternative in aufsteigender Reihenfolge ergeben. Bei Erreichen der letzten Alternative wird wieder mit der ersten begonnen. Sind alle Alternativen an einem Bauwerk tabuisiert oder steht nur eine Alternative zu Verfügung, so kann für das Bauwerk kein neuer Plan gebildet werden.

Bei  $n$  Bauwerken ergibt sich also eine Menge von bis zu  $n$  neuen Lösungen.

- „Alle Alternativen“

Die Nachbarschaft besteht ebenfalls aus den Plänen, die sich durch Ersetzen der gewählten Alternative an jeweils genau einem Bauwerk ergeben. Es wird jedoch nicht nur die nächste, sondern es werden jeweils alle nicht tabuisierten Alternativen an einem Bauwerk berücksichtigt.

Neben der Prüfung der Tabu-Kriterien wurde auch die Prüfung der Gültigkeit der erzeugten Lösungen in die Nachbarschaftserzeugung integriert.

## Umgang mit einer leeren Nachbarschaft

Im Verlauf der Tabu-Suche kann der Fall eintreten, dass der Bereich um die aktuelle Lösung herum bereits soweit abgesucht wurde, dass durch Änderung der Alternative an nur einem Bauwerk keine nicht tabuisierte gültige Lösung mehr erzeugt werden kann. In diesem Fall kann entweder das Verfahren abgebrochen, die Tabu-Liste verkleinert oder die Nachbarschaft erweitert werden.

Im implementierten Verfahren wird bei Erreichen einer solchen Sackgasse pragmatisch versucht, durch Erzeugung neuer, zufälliger Lösungen eine neue Startlösung zu erzeugen, was als extreme Variante der Erweiterung der Nachbarschaft interpretiert werden kann.

Eine Alternative bestände beispielsweise im gleichzeitigen Ersetzen der gewählten Alternativen an zwei oder mehr Bauwerken durch systematisches Durchprobieren bis zum Finden eines oder mehrerer gültiger Nachbarn.

### 8.3.4 Bewertung von Lösungen

Die Bewertung der in einer Nachbarschaft enthaltenen Lösungen entsprechend der definierten Zielfunktion (vgl. Abschnitt 8.1.1) beinhaltet die Berechnung von Restwerten, Kosten und Nutzerkosten.

#### Berechnung von Restwerten

Der aus einer Lösung bzw. einem Ertüchtigungsplan resultierende Bauwerkwert am Ende des Bewertungszeitraums entspricht der Summe der Restwerte der gewählten Strategien. Die Restwerte der Alternativen werden vor Beginn der Optimierung einmalig ermittelt und entsprechend dem vorgegebenen Zinssatz abgezinst.

#### Berechnung der Kosten

Die Kosten einer Lösung ergeben sich aus der Summe Kosten der gewählten Strategien. Auch die Kosten der Strategien können vor der Optimierung einmalig ermittelt werden indem die in jedem Jahr des Bewertungszeitraums anfallenden abgezinsten Kosten aufaddiert werden.

#### Berechnung der Nutzerkosten

Vor Beginn der Optimierung werden unter Berücksichtigung von Gewichtungsfaktoren (vgl. Kapitel 8.1.1) die jährlichen Nutzerkosten für jedes Szenario, d.h. für jede zuvor im Verkehrsmodell simulierte Kombination von Verkehrseinschränkungen, berechnet.

Während der Optimierung werden die mit einer Lösung verbundenen zusätzlichen Nutzerkosten durch Aufsummieren der Nutzerkosten über alle Jahre des Bewertungszeitraums berechnet. Dazu wird für jedes Jahr zunächst die aus den gewählten Alternativen resultierende Kombination von Verkehrseinschränkungen ermittelt. Anschließend werden die Nutzerkosten in Abhängigkeit von der Anzahl der gleichzeitigen Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Bauwerken berechnet:

- Tritt in einem Jahr keine Verkehrseinschränkung auf, so betragen die zusätzlichen Nutzerkosten in diesem Jahr 0 €.

- Treten in einem Jahr genau ein oder zwei Verkehrseinschränkungen auf, so entsprechen die Nutzerkosten den Nutzerkosten des zugehörigen Szenarios. Dabei wird vorausgesetzt, dass sowohl für einzelne Verkehrseinschränkungen als auch für alle möglichen Paare von Verkehrseinschränkungen ein Szenario vorliegt. Liegt für eine während der Optimierung auftretende Kombination kein Szenario vor, so ist eine Berechnung nicht möglich und die Optimierung bricht mit einer entsprechenden Meldung ab.
- Treten in einem Jahr mehr als 2 Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Bauwerken auf, so gibt es zwei Möglichkeiten:
  - Bei Vorliegen eines passenden Szenarios werden die entsprechenden Nutzerkosten aus dem Szenario übernommen.
  - Liegt kein der Kombination entsprechendes Szenario vor, so erfolgt eine Schätzung der Nutzerkosten auf Basis der Nutzerkosten der Szenarien der in der Kombination enthaltenen 2er-Kombinationen (vgl. Abschnitt 7.3.4.3 ).

Auch hierbei wird vorausgesetzt, dass sowohl für einzelne Verkehrseinschränkungen als auch für alle sich aus der Kombination ergebenden Paare von Verkehrseinschränkungen ein Szenario vorliegt. Ist dies nicht der Fall, so ist eine Berechnung nicht möglich, und die Optimierung bricht mit einer entsprechenden Meldung ab.

Wird in den Parametern festgelegt, dass eine Schätzung nicht erlaubt ist, so bricht die Optimierung ebenfalls mit einer Fehlermeldung ab.

## Synthese

Nach Vorliegen der Werte für Restwert, Kosten und Nutzerkosten kann der Wert der Zielfunktion (siehe Abschnitt 8.1.1) berechnet und die beste in der betrachteten Nachbarschaft liegende Lösung als nächste Lösung ausgewählt werden.

### 8.3.5 Umsetzung der Tabu-Liste

Tabus dienen dazu, das Rückgängigmachen von während der Suche getroffenen Entscheidungen bzw. „Züge“ temporär zu unterbinden und so Endlosschleifen in der Suche zu vermeiden. Bei der Umsetzung ist insbesondere festzulegen, was unter einem „Zug“ verstanden wird und nach welcher Zeit oder unter welchen Bedingungen ein Tabu wieder aufgehoben werden soll.

#### Tabu-Kriterien

Im Rahmen von Tests wurden drei Varianten von Tabu-Listen realisiert und getestet:

- Bauwerksbezogene Tabus

Hier wird „Zug“ als Entscheidung für eine (neue) Alternative an einem Bauwerk interpretiert. Das bedeutet, dass an diesem Bauwerk für eine bestimmte Anzahl von Zügen keine andere Alternative gewählt werden darf.
- Alternativen-bezogene Tabus

Ein Zug bedeutet das Ausprobieren einer bestimmten Alternative. Die Alternative darf in nachfolgenden Iterationen (im Gegensatz zum obigen Ansatz der bauwerksbezogenen Tabus) durch eine andere am selben Bauwerk ersetzt werden, die Aufnahme der Alternative

in die Tabu-Liste verhindert jedoch, dass die Alternative in absehbarer Zeit ein zweites Mal ausprobiert wird.

- Zustandsbezogene Tabus

Bei diesem Ansatz wird die neue Lösung, also der Vektor aller gewählten Alternativen, in die Tabuliste aufgenommen, so dass dieser Punkt des Lösungsraums für die Tabu-Dauer explizit von der Suche ausgeschlossen ist.

### **Tabuisieren und Enttabuisieren von „Zügen“**

Die Aufnahme eines Zuges in die Tabu-Liste erfolgt entsprechend dem in Abbildung 35 dargestellten Verfahren in jeder Iteration des Optimierungszyklus. Die Tabu-Listen wurden jeweils als Ringlisten mit fester Länge umgesetzt, so dass sich die Tabu-Dauer implizit aus der Länge der Liste ergibt, d.h. bei einer vorgegebenen Listenlänge  $l$  (Verfahrensparameter) bleibt jedes Tabu  $l$  lang Iterationen bestehen, bevor es durch ein neues Tabu überschrieben wird.

### **8.3.6 Abbruchkriterium zum Beenden der Lösungssuche.**

Es wurden drei Abbruchkriterien implementiert.

Das Verfahren wird zum einen nach Erreichen einer vorgegebenen Maximalzahl an Iterationen (Verfahrensparameter) oder der maximal erlaubten Rechenzeit (Verfahrensparameter) und zum anderen dann, wenn keine neue Lösung mehr gefunden wird, beendet.

## **8.4 Anwendungsbeispiel: Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme**

Nach Implementierung des Optimierungsverfahrens (vgl. Kapitel 9.2.5) wurde dieses anhand eines primär manuell erstellten Anwendungsbeispiels getestet. Dazu wurden verschiedene Szenarien definiert und unter Annahme unterschiedlicher Randbedingungen mit verschiedenen Verfahrensparametern optimiert. Mit Hilfe dieser Optimierungsrechnungen konnte im Vorfeld der Prototyp-Erstellung die grundsätzliche Anwendbarkeit des Verfahrens für ein größeres Brückenkollektiv getestet bzw. nachgewiesen werden. Die Ergebnisse wurden zunächst in einem zusätzlichen Zwischenbericht dokumentiert und werden im nachfolgenden Kapitel 8.4.1 beschrieben.

Ausgehend von der Implementierung des Optimierungsverfahrens wurde anschließend der vollständige Prototyp realisiert, der zusätzlich die Verfahren zur baulichen und zur verkehrlichen Vorselektion und zur Ableitung von Standardmaßnahmen enthält. Gleichzeitig wurde das im Verkehrsmodell verwendete Verfahren zur Simulation von Maßnahmenwirkungen sowohl hinsichtlich der Laufzeit (Beschleunigung der Umlegungsverfahren durch Wechsel auf eine neue Version von PTV Visum) als auch bezüglich der Qualität der Ergebnisse (Erhöhung der Iterationszahl im Umlegungsverfahren und damit Verkleinerung der Kenngröße „Gap“) optimiert.

In Kapitel 8.4.2.3 sind die Ergebnisse verschiedener Optimierungsrechnungen, die mit dem vollständigen Prototyp durchgeführt wurden, dokumentiert. Dabei wurde insbesondere der Einfluss der Berücksichtigung von Maßnahmenausschlüssen, bzw. nicht gleichzeitig zulässiger Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Bauwerken auf das Optimierungsergebnis untersucht.

## 8.4.1 Überprüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens

### 8.4.1.1 Definition von Szenarien

Ausgehend von den in Kapitel 2.4 dargestellten Bauwerken wurden insgesamt 6 Szenarien definiert, die sich in Anzahl und Eingreifzeiträumen der je Bauwerk verfügbaren Alternativen unterscheiden.

#### Szenario „KLEIN“

NR	Bauwerk	Alternativen	Kommentar
1	Wupper	1	späte MN
2	Dhünnbrücke	4	
3	Leverkusen Hochstraße B	4	
4	Rheinbrücke Leverkusen	1	MN gesetzt
5	AK Köln-Ost	4	
6	AS Bergisch-Gladbach Bensberg	10	
7	Sülz und Anschlussarme	1	späte MN
8	Holzbachtalbrücke	10	
9	Frankfurter Straße	10	
10	AK Köln Gremberg	3	
11	Rheinbrücke Rodenkirchen	9	
12	Rheinbrücke Bonn-Nord	6	
13	Tausendfüßler	4	
14	Lindenstraße	1	späte MN
15	Rheinbrücke Bonn-Süd	1	späte MN
16	AS Bonn Rheinaue	1	späte MN
	<b>Anzahl Kombinationen:</b>	<b>41.472.000</b>	<b>Produkt</b>

Abbildung 36: Lösungsraum des Szenarios „KLEIN“

Im Szenario „KLEIN“ wurde angenommen, dass die jahresgenaue Optimierung von Maßnahmenzeitpunkten nur in einem überschaubaren Zeitraum von etwa 20 Jahren sinnvoll ist, während für späte Maßnahmen noch keine sicheren Aussagen möglich sind.

Entsprechend wurden die sich aus der baulichen Vorselektion ergebenden Maßnahmen und Eingreifzeiträume aller Bauwerke mit Eingreifzeiträumen, die vor dem 20. Jahr des Betrachtungszeitraums (Jahr 2029) beginnen, übernommen. Bei Bauwerken mit späteren Eingreifzeiträumen wurde jedoch die im 26. Jahr (Jahr 2044) beginnende Alternative gesetzt. Außerdem wurde der Bewertungszeitraum, d.h. der Zeitraum, in dem Zeit-, Emissions- und Unfallkosten berechnet und die Gültigkeit der auftretenden Kombinationen von Verkehrseinschränkungen geprüft wird, auf 25 Jahre begrenzt. Damit werden späte Maßnahmen zwar in den resultierenden Ertüchtigungsplänen ausgewiesen, aber nicht optimiert.

Im Ergebnis stehen bei „frühen“ Bauwerken jeweils bis zu 10 Alternativen zur Auswahl<sup>10</sup>, während bei späten Bauwerken nur eine Alternative vorhanden ist, was einer gesetzten Maßnahme entspricht. Aus den Anzahlen der Alternativen an den einzelnen Bauwerken ergibt sich so insgesamt ein Lösungsraum mit insgesamt 41.472.000 möglichen Kombinationen von Alternativen (vgl. Abbildung 36).

<sup>10</sup> Die Rheinbrücke Leverkusen befindet sich bereits in Bau und kann nicht mehr optimiert werden.

Wie verschiedene Testrechnungen ergaben, kann der Lösungsraum des Szenarios „KLEIN“ problemlos vollständig durchsucht und damit die – bezogen auf die gewählte Zielfunktion – optimale Lösung berechnet werden. Somit ist auch ein Vergleich der mit dem Verfahren „Tabu-Suche“ gefundenen Pläne mit dem Optimum möglich.

### Szenarien „GROSS 2“ bis „GROSS 4“

Bauwerk	Alternativen KLEIN	Alternativen GROSS 2	Alternativen GROSS 3	Alternativen GROSS 4
Wupper	1	9	10	19
Dhünnbrücke	4	4	4	4
Leverkusen Hochstraße B	4	4	4	4
Rheinbrücke Leverkusen	1	1	1	1
AK Köln-Ost	4	4	4	4
AS Bergisch-Gladbach Bensberg	10	10	10	10
Sülz und Anschlussarme	1	10	10	20
Holzbachtalbrücke	10	10	10	10
Frankfurter Straße	10	10	10	10
AK Köln Gremberg	3	3	3	3
Rheinbrücke Rodenkirchen	9	9	9	9
Rheinbrücke Bonn-Nord	6	6	6	6
Tausendfüßler	4	4	4	4
Lindenstraße	1	9	10	19
Rheinbrücke Bonn-Süd	1	8	10	18
AS Bonn Rheinaue	1	9	10	19
<b>Anzahl Kombinationen</b>	<b>41.472.000</b>	<b>2.418.647.040.000</b>	<b>4.147.200.000.000</b>	<b>102.404.321.280.000</b>

Abbildung 37: Lösungsräume der Szenarien

Im Szenario „GROSS 2“ wurde die Optimierung auf die „späten“ Bauwerke erweitert, wobei aber nur solche Alternativen zugelassen werden, die vollständig im Betrachtungszeitraum liegen. Dadurch kann bei den „späten“ Bauwerken jeweils zwischen 6 bis 8 Alternativen gewählt werden, und der Lösungsraum vergrößert sich auf 2.418.647.040.000 Kombinationen. Der Bewertungszeitraum wurde entsprechend dem Betrachtungszeitraum mit 30 Jahren angesetzt.

Bei „GROSS 3“ wurden die Eingreifzeiträume der Maßnahmen der „späten“ Bauwerke fiktiv 10 Jahre nach vorne versetzt, so dass sich die Maßnahmenzeiträume der (nun nicht mehr) „späten“ Bauwerke mit denen der „frühen“ Bauwerke überschneiden.

Bei „GROSS 4“ wurden die Eingreifzeiträume von GROSS 2 und GROSS 3 kombiniert, so dass ein sehr großer Lösungsraum entstand.

#### 8.4.1.2 Optimierungsrechnungen

##### Ergebnisse für das Szenario „KLEIN“

Für das Szenario „KLEIN“ wurden für alle angenommenen Randbedingungen jeweils vier Optimierungsläufe durchgeführt:

- „FULL 50.000.000“:  
Vollständiges Durchsuchen des Lösungsraums. Es wird garantiert das jeweilige Optimum gefunden.
- „RANDOM 1.000.000“:

Auswahl der besten Lösung aus 1.000.000 zufällig erzeugten Kombinationen von Alternativen.

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde der verwendete Pseudo-Zufallszahlengenerator für alle Rechenläufe mit demselben Startwert initialisiert.

- TABU 10.000\_1.000:

Tabu-Suche mit 10.000 Iterationen und einer Tabu-Liste mit 1.000 Elementen.

In der Tabu-Liste wird jeweils die vollständige Lösung gespeichert, und als Nachbarschaft wird an jedem Bauwerk die jeweils nächsten Alternativen erzeugt (vgl. Abschnitt 8.3.5 bzw. 8.3.3). Das Verfahren beginnt mit der jeweils ersten Alternative an jedem Bauwerk.

- TABU 10.000\_1.000 RND:

Tabu-Suche analog „TABU 10.000\_1000“, jedoch Beginn mit einer zufälligen Startlösung.

Optimierungslauf	Laufzeit	Nutzen
FULL 50.000.000	00:57:38	-1.966.701.924
RANDOM 1.000.000	00:01:26	-1.966.701.924
TABU 10.000_1.000	00:00:17	-1.966.701.924
TABU 10.000_1.000 RND	00:00:18	-1.966.701.924

Tabelle 11: Ergebnisse für das Grundszenario „KLEIN“ (41.472.000 Kombinationen)

Wie Tabelle 11 zu entnehmen ist, wurde für das Grundszenario mit allen Verfahren ein gemäß Zielfunktion optimaler Ertüchtigungsplan gefunden, wobei die gefundenen Ertüchtigungspläne identisch waren. Erhebliche Unterschiede sind jedoch im Laufzeitverhalten festzustellen, wo die Tabu-Suche am besten abschneidet. Außerdem ist anzumerken, dass das Zufallsverfahren für andere Startwerte des Pseudo-Zufallszahlengenerators nicht die optimale Lösung finden würde.

Optimierungslauf	Laufzeit	Nutzen	Nutzerkosten prozentual
FULL 50.000.000	01:02:54	-1.032.709.210	100,0%
RANDOM 1.000.000	00:01:25	-1.037.872.199	100,5%
TABU 10.000_1.000	00:00:17	-1.035.166.202	100,2%
TABU 10.000_1.000 RND	00:00:18	-1.035.166.202	100,2%

Tabelle 12: Ergebnisse für die Minimierung der Nutzerkosten im Szenario „KLEIN“

Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse für eine reine Minimierung der Nutzerkosten, bei der die Werte der Gewichtungparameter für Restwerte und Baulastträgerkosten auf „0“ gesetzt wurden. Hier treten im mit Tabu-Suche erzeugten Ertüchtigungsplan etwa 0,2% höhere Nutzerkosten als im optimalen Plan auf.

Optimierungslauf	Laufzeit	Nutzen	Abweichung prozentual
FULL 50.000.000	00:22:55	-1.975.725.535	100,0%
RANDOM 1.000.000	00:00:34	-1.979.578.948	100,2%
TABU 10.000_1.000	00:00:18	-1.997.268.036	101,1%
TABU 10.000_1.000 RND	00:00:20	-1.975.725.535	100,0%

Tabelle 13: Ergebnisse für das Szenario „KLEIN“ mit Ausschlüssen von Kombinationen von Verkehrseinschränkungen

Als nächstes wurde geprüft, wie sich das Verbot einzelner Kombinationen von Verkehrseinschränkungen auswirkt. Wie im Vergleich von Tabelle 13 mit Tabelle 11 zu erkennen ist, stellt der im Grundszenario gefundene optimale Ertüchtigungsplan keine zulässige Lösung dar, so dass das neue Optimum einen geringeren Nutzen aufweist (-1.975.725.535€ statt -1.966.701.924€). Ob die optimale Lösung von der Tabu-Suche gefunden wird, hängt von der Wahl der Startlösung ab. Wird die optimale Lösung nicht gefunden, so kann beispielsweise ein um 1,1% schlechterer Plan erzeugt werden.

### Ergebnisse für die Szenarien „GROSS 2“ bis „GROSS 4“

Da für die großen Szenarien aus Laufzeitgründen kein vollständiges Durchsuchen des Lösungsraums möglich war, wurden ausschließlich Optimierungsläufe mit dem Zufallsverfahren und unterschiedlich parametrisierten Tabu-Suchen durchgeführt:

- „RANDOM 1.000.000“:  
Auswahl der besten Lösung aus 1.000.000 zufällig erzeugten Kombinationen von Alternativen (analog Szenario „KLEIN“).
- TABU 10.000\_1.000:  
Tabu-Suche mit 10.000 Iterationen und einer Tabu-Liste mit 1.000 Elementen.
- TABU 10.000\_10.000:  
Tabu-Suche mit 10.000 Iterationen und einer Tabu-Liste mit 10.000 Elementen.
- TABU 10.000\_2.000 NB:  
Tabu-Suche mit 10.000 Iterationen und einer Tabu-Liste mit 2.000 Elementen unter Verwendung der Strategie „Alle Alternativen“ zur Erzeugung der Nachbarschaft.

Außerdem wurde untersucht, ob das Tabu-Verfahren in der Lage ist, auch bei Budgetrestriktionen Lösungen zu finden.

Optimierungslauf	Laufzeit	Nutzen	Abweichung prozentual
Random 1.000.000	00:01:43	-1.908.661.594	100,0%
Tabu 10.000_1.000	00:00:27	-1.869.049.538	97,9%
Tabu 10.000_10.000	00:01:25	-1.866.957.920	97,8%

Tabelle 14: Ergebnisse für das Szenario „GROSS 2“ (2.418.647.040.000 Kombinationen)

Optimierungslauf	Laufzeit	Nutzen	Abweichung prozentual
Random 1.000.000	00:02:05	-1.716.620.323	100,0%
Tabu 10.000_1.000	00:00:32	-1.706.861.163	99,4%
Tabu 10.000_10.000	00:01:26	-1.706.861.163	99,4%

Tabelle 15: Ergebnisse für das Szenario „GROSS 3“ (4.147.200.000.000 Kombinationen)

Optimierungslauf	Laufzeit	Nutzen	Abweichung prozentual
Random 1.000.000	00:01:57	-1.772.263.884	100,0%
Tabu 10.000_1.000	00:00:32	-1.706.836.697	96,3%
Tabu 10.000_10.000	00:01:40	-1.692.161.024	95,5%
TABU 10.000_2.000 NB	00:34:16	-1.683.083.380	95,0%

Tabelle 16: Ergebnisse für das Szenario „GROSS 4“ (102.404.321.280.000 Kombinationen)

Die obigen Tabellen zeigen, dass mit der Tabu-Suche in kurzer Zeit gültige Lösungen gefunden werden können, die zumindest einem zufälligen Durchsuchen des Lösungsraums überlegen sind. Dabei hängt die mögliche Verbesserung der Lösungsqualität sowohl vom zu optimierenden Szenario als auch von den gewählten Optimierungsparametern ab. Während im Szenario „GROSS 3“ nur eine geringfügige Verbesserung um 0,6% gegenüber dem Zufallsverfahren erzielt werden konnte, wurde im Szenario „GROSS 4“ eine Verbesserung von 5% erreicht (vgl. Tabelle 15 und Tabelle 16).

Anzumerken ist allerdings, dass das Zufallsverfahren im Szenario „GROSS 4“ offensichtlich eine besonders schlechte beste Lösung gefunden hat, die schlechter als die für „GROSS 3“ gefundene ist, welche auch eine Lösung für „GROSS 4“ darstellt (in „GROSS 4“ wurden lediglich die Eingreifzeiträume gegenüber „GROSS 3“ erweitert).

Insgesamt erfreulich ist, dass die Tabu-Suche die Erweiterung des Lösungsraums in „GROSS 4“ tatsächlich zur Erzeugung besserer Lösungen im Vergleich zu „GROSS 2“ und „GROSS 3“ nutzen konnte und sich offensichtlich nicht nur mit dem Durchprobieren sinnloser Kombinationen im vergrößerten Lösungsraum beschäftigte.

Verfahren	jährliches Budget	Nutzen	Abweichung prozentual
Tabu 10.000_10.000	100 Mio. €	-1.692.161.024	100,0%
Tabu 10.000_10.000	55 Mio. €	-1.725.056.199	101,9%
Tabu 10.000_10.000	50 Mio. €	-1.709.155.730	101,0%
Tabu 10.000_10.000	45 Mio. €	-1.709.155.730	101,0%
Tabu 10.000_10.000	40 Mio. €	-1.747.645.630	103,3%
Tabu 10.000_10.000	35 Mio. €	-1.842.920.445	108,9%

Tabelle 17: Ergebnisse für das Szenario „GROSS 4“ mit Budgetrestriktionen (zuzüglich Zusatzbudgets für 1. bis 6. Jahr)

Das Szenario „GROSS 4“ wurde außerdem genutzt, um das Verhalten der Tabu-Suche in Verbindung mit Budgetrestriktionen zu untersuchen. Dazu wurden Rechenläufe mit einem angenommenen jährlichen Budget zwischen 35 und 100 Mio. € durchgeführt, wobei zum Abfangen der

hohen Kosten der Sofortmaßnahmen und des Neubaus der Rheinbrücke Leverkusen für die ersten 6 Jahre jeweils ein zusätzliches Budget in Höhe von 150 Mio. € „bereitgestellt“ wurde.<sup>11</sup>

Wie Tabelle 17 zu entnehmen ist, stellt eine Obergrenze von 100 Mio. € für das Szenario noch keine Einschränkung dar (Ergebnis ist identisch mit Tabelle 16 ohne Obergrenze). Weiterhin ist zu sehen, dass niedriger werdende Budgetgrenzen den Lösungsraum einschränken und tendenziell zu Ertüchtigungsplänen mit geringerem Nutzen führen. Im Einzelfall kann es allerdings passieren, dass offensichtlich nicht die optimale Lösung gefunden wird (vgl. Ergebnisse für 55 und 50 Mio. €). Da das Szenario ein Bauwerk mit einer Maßnahme mit jährlichen Kosten von mehr als 34 Mio. € enthält, stellt die Budgetvorgabe von 35 Mio. € tatsächlich die (bei Rundung auf praxisnahe 1 Mio. €) theoretisch mögliche Untergrenze dar.

## 8.4.2 Anwendungsbeispiel

### 8.4.2.1 Szenario

Für die Berechnungen mit dem vollständigen Prototyp wurde ein neues Szenario „PROTOTYP“ erstellt.

Bauwerk	Alternativen PROTOTYP	Kommentar
Wupper	1	späte MN
Dhünnbrücke	4	
Leverkusen Hochstraße B	4	
Rheinbrücke Leverkusen	1	MN gesetzt
AK Köln-Ost	4	
AS Bergisch-Gladbach Bensberg	10	
Sülz und Anschlussarme	1	späte MN
Holzbachtalbrücke	10	
Frankfurter Straße	10	
AK Köln Gremberg	3	
Rheinbrücke Rodenkirchen	8	
Rheinbrücke Bonn-Nord	6	
Tausendfüßler	4	
Lindenstraße	1	späte MN
Rheinbrücke Bonn-Süd	1	späte MN
AS Bonn Rheinaue	1	späte MN
<b>Anzahl Kombinationen</b>	<b>36.864.000</b>	<b>Produkt</b>

Abbildung 38: Lösungsraum des Szenarios „PROTOTYP“

Analog dem Szenario „KLEIN“ (vgl. Abschnitt 8.4.1.1) wurde angenommen, dass die jahresgenaue Optimierung von Maßnahmenzeitpunkten nur in einem überschaubaren Zeitraum von etwa 20 Jahren sinnvoll ist, während für späte Maßnahmen noch keine sicheren Aussagen möglich sind.

<sup>11</sup> Alternativ hätte man in den Alternativen die Maßnahmenkosten anpassen oder bei jeder Maßnahme die nicht budgetrelevanten Kosten angeben können.

Entsprechend wurden die sich aus der baulichen Vorselektion ergebenden Maßnahmen und Eingreifzeiträume aller Bauwerke mit Eingreifzeiträumen, die vor dem 20. Jahr des Betrachtungszeitraums (Jahr 2029) beginnen, übernommen. Bei Bauwerken mit späteren Eingreifzeiträumen wurde jedoch die im 26. Jahr (Jahr 2044) beginnende Alternative gesetzt. Außerdem wurde der Bewertungszeitraum, d.h. der Zeitraum, in dem Zeit-, Emissions- und Unfallkosten berechnet und die Gültigkeit der auftretenden Kombinationen von Verkehrseinschränkungen geprüft wird, auf 25 Jahre begrenzt. Damit werden späte Maßnahmen zwar in den resultierenden Ertüchtigungsplänen ausgewiesen, aber nicht optimiert.

Das resultierende Szenario „PROTOTYP“, dessen Lösungsraum insgesamt 36.864.000 unterschiedliche Ertüchtigungspläne umfasst, ist insgesamt mit dem Szenario „KLEIN“ der Vorfeld-Untersuchungen vergleichbar jedoch aufgrund anderer Alternativen und abweichender Szenariobewertungen nicht mit diesem identisch.

#### **8.4.2.2 Optimierungsrechnungen**

Anhand des Szenarios „PROTOTYP“ wurde insbesondere der Einfluss der Berücksichtigung von Maßnahmenausschlüssen, bzw. nicht gleichzeitig zulässiger Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Bauwerken auf das Optimierungsergebnis untersucht:

- Rechenläufe „Ohne Einschränkungen“

Zunächst wurde angenommen, dass im Verkehrsnetz beliebige Kombinationen von Verkehrseinschränkungen zulässig sind und ausschließlich entsprechend der Zielfunktion optimiert werden soll.

- Rechenläufe „Mit Einschränkungen“

In einem zweiten Satz von Rechnungen wurden alle unzulässigen oder ungünstigen Kombinationen von Verkehrseinschränkungen (vgl. Abschnitt 7.4) ausgeschlossen, so dass in den resultierenden Ertüchtigungsplänen bestimmte Kombinationen von Alternativen nicht mehr auftreten können.

Beide Problemstellungen wurden mit jeweils vier Verfahren optimiert:

- „Vollständige Suche“

Vollständiges Durchsuchen des Lösungsraums. Es wird garantiert das jeweilige Optimum gefunden.

- RANDOM 1.000.000“:

Auswahl der besten Lösung aus 1.000.000 zufällig erzeugten Kombinationen von Alternativen.

- TABU 10.000\_1.000:

Tabu-Suche mit 10.000 Iterationen und einer Tabu-Liste mit 1.000 Elementen.

In der Tabu-Liste wird jeweils die vollständige Lösung gespeichert, und als Nachbarschaft wird an jedem Bauwerk die jeweils nächsten Alternativen erzeugt (vgl. Abschnitt 8.3.5 bzw. 8.3.3). Das Verfahren beginnt mit der jeweils ersten Alternative an jedem Bauwerk.

- TABU 20.000\_20.000

Tabu-Suche mit 20.000 Iterationen und einer Tabuliste mit 20.000 Elementen.

### 8.4.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen wurden in Tabelle 18 und Tabelle 19 zusammengefasst:

Optimierungslauf	Laufzeit [hh:mm]	Nutzen [€]	Nutzendifferenz [€]	Nutzen relativ [%]
Vollständige Suche	01:45	-2.033.473.489	0	100,0%
RANDOM 1.000.000	00:01	-2.033.974.059	-500.570	100,0%
TABU 10.000_1.000	00:00	-2.041.849.974	-8.376.485	100,4%
TABU 20.000_20.000	00:06	-2.035.061.554	-1.588.065	100,1%

Tabelle 18: Ergebnisse für das Szenario „PROTOTYP“ ohne Einschränkungen

Es konnte jeweils mit allen Verfahren ein gültiger Ertüchtigungsplan gefunden wurde. Im Fall mit Einschränkungen wurde durch die Tabu-Suche mit 20.000 Iterationen sogar der unter den gegebenen Einschränkungen bezogen auf die Zielfunktion optimale Ertüchtigungsplan gefunden. Im Fall ohne Einschränkungen gelang dies erst in einem zusätzlichen Rechenlauf mit 100.000 Iterationen und einer Laufzeit von mehr als 2h.

Offensichtlich können die grundsätzlichen Vorteile der Tabu-Suche im Szenario PROTOTYP nicht zum Tragen kommen, da mit dem „primitiven“ Zufallsverfahren vergleichbare Ergebnisse bei geringerer Laufzeit erzielt werden konnten.

Optimierungslauf	Laufzeit [hh:mm]	Nutzen [€]	Nutzendifferenz [€]	Nutzen relativ [%]
Vollständige Suche	03:39	-2.042.995.252	0	100,0%
RANDOM 1.000.000	00:07	-2.045.073.348	-2.078.095	100,1%
TABU 10.000_1.000	00:03	-2.044.465.588	-1.470.336	100,0%
TABU 20.000_20.000	00:16	-2.042.995.252	0	100,0%

Tabelle 19: Ergebnisse für das Szenario „PROTOTYP“ mit Einschränkungen

Der Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 18 und Tabelle 19 zeigt, dass der Ausschluss von Kombinationen in diesem Fall zu einem geringeren Gesamtnutzen, d.h. insgesamt höheren gesamtwirtschaftlichen Kosten führt. Die Differenz zwischen den Nutzen der beiden rechnerisch optimalen Pläne beträgt 9.521.763€ oder 0,5% bezogen auf den Plan ohne Einschränkungen und liegt damit fast noch im Bereich der Optimierungsergebnisse der Rechnungen ohne Einschränkungen.

### 8.4.3 Bewertung der Optimierung

Die vorgestellten Ergebnisse stellen lediglich das Resultat erster Testläufe dar. Die erzeugten Ertüchtigungspläne erwiesen sich bei einer manuellen Überprüfung als plausibel und konnten – unter der Annahme, dass die Ergebnisse der verkehrlichen Bewertung korrekt sind – nicht durch offensichtliche Änderungen verbessert werden.

Es konnte gezeigt werden, dass mit der Tabu-Suche sowohl bei kleinen als auch bei größeren Szenarien mit unterschiedlichen Arten von Einschränkungen (Budgetrestriktionen,

Maßnahmenausschlüsse) gültige Erhaltungspläne erzeugt werden, die bei kleinen Szenarien nahe dem Optimum liegen. Bei größeren Szenarien war die Tabu-Suche zwar einem einfachen Verfahren überlegen, dies erlaubt jedoch noch keine quantitative Aussage über die zu erwartende Ergebnisqualität im Vergleich zum unbekanntem tatsächlichen Optimum. Rechnungen mit Budgetbeschränkungen zeigten, dass die Tabusuche auch für diesen Anwendungsfall geeignet ist.

Da sich bei verschiedenen Rechnungen zum einen eine Abhängigkeit der Ergebnisqualität von der Anfangslösung gezeigt hat und zum anderen die beste Lösung meist bereits nach relativ wenigen Iterationen gefunden wurde, besteht ein offensichtlicher Ansatz zur Verbesserung des Verfahrens darin, die Optimierung jeweils mit verschiedenen Startlösungen durchzuführen und das insgesamt beste Ergebnis zu wählen. Zusätzlich könnten so möglichst unterschiedliche Lösungen mit ähnlicher Ergebnisqualität erzeugt werden, um dem Anwender neben der besten Lösung sinnvolle Handlungsalternativen aufzuzeigen.

## 9 Prototyp

### 9.1 Überblick

Um die praktische Anwendbarkeit der erarbeiteten Methodik sicherzustellen, wurde diese in einem Software-Prototyp implementiert. Dieser basiert auf der Verkehrsplanungssoftware PTV Visum und dem deutschlandweiten Verkehrsmodell PTV Validate 7.2 sowie auf Microsoft Excel. Die Berechnungen sind in Visual Basic for Applications (VBA) implementiert und werden in den jeweiligen Excel-Tabellenblättern mit Hilfe von Schaltflächen aufgerufen.

Im Software-Prototyp wurden alle beschriebenen Verfahrensschritte abgebildet. Der Prototyp bietet weitreichende Möglichkeiten zur Nutzersteuerung. So sind zahlreiche Parameter sowohl der Bewertungsrechnungen (Kostensätze, Bewertungszeitraum usw.) als auch der Optimierung (z.B. Gewichtung der Komponenten der Zielfunktion, Budgetgrenzen) durch den Verfahrensanwender entsprechend seiner Anforderungen veränderbar.

Im Rahmen der Verfahrensimplementierung wurde deutlich, dass ein Großteil der klassischen Verkehrsmodellierungsarbeiten, wie z. B. die Abbildung der maßnahmenbedingten Verkehrseinschränkungen, auch in einer späteren Softwarelösung nicht über Automatismen zu lösen sein wird, denn praxisnahe, bauwerksspezifische Ansätze erfordern auch auf der hier abzubildenden strategischen Planungsebene verkehrsplanerisches Knowhow und dessen „manuelle“ Umsetzung im Verkehrsmodell. Hingegen konnte die Verknüpfung der Verkehrsplanungssoftware mit dem Exceltool, welche das automatisierte Ein- und Auslesen von Daten von Visum nach Excel und umgekehrt ermöglicht, über entsprechende Skripte gut gelöst werden.

Abbildung 39 zeigt die Grundstruktur des Zusammenspiels zwischen PTV Visum und dem Excel-Tool im Rahmen des Prototyps.

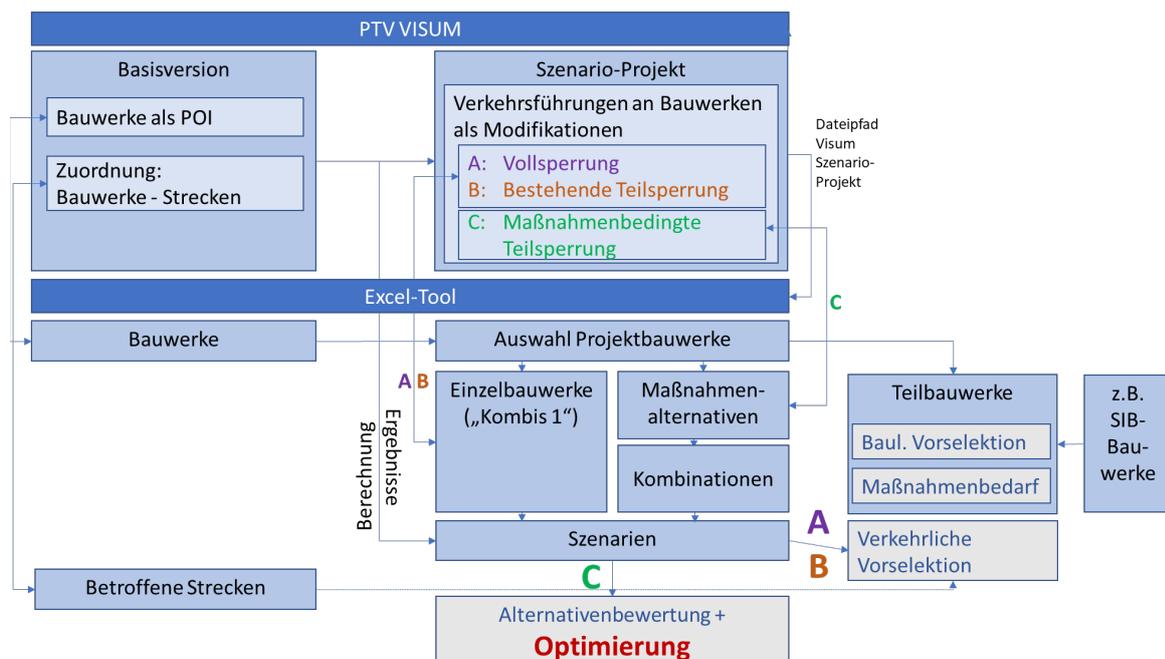


Abbildung 39: Grundstruktur und Ablauf

## 9.2 Implementierung des Verfahrens

Zur Dateneingabe und zur Ausgabe der Berechnungsergebnisse der einzelnen Verfahrensschritte werden innerhalb des Excel-Tools Arbeitsblätter verwendet. Diese dienen gleichzeitig als persistenter Datenspeicher, der eine in einer „realen“ IT-Realisierung zu verwendende Datenbank ersetzt. Die Verfahrensschritte selbst wurden in VBA („Visual Basic for Applications“) realisiert und werden mit Hilfe von Schaltflächen (Buttons) auf den verschiedenen Arbeitsblättern gestartet. Verknüpfungen und Verweise zwischen Zellen werden nicht verwendet, um manuelle Änderungen und den Datenaustausch über die Zwischenablage („Cut & Paste“) zu erleichtern bzw. dabei eine möglichst hohe Robustheit zu erreichen.

### 9.2.1 Überblick

Innerhalb des VBA-Programms wurden die wichtigsten Datentypen als Klassen realisiert:

- Bauwerke,
- Brücken (Teilbauwerke),
- Maßnahmen,
- Alternativen,
- Verkehrsführungen,
- Kombinationen,
- Szenarien,
- Betroffene Strecken und
- Ertüchtigungspläne.

Auch die implementierten Optimierungsverfahren (Vollständige Suche, Zufallssuche und Tabu-Suche) werden durch eine Klasse bereitgestellt.

Die Zuordnung zwischen Datenobjekten, z.B. von Brücken zu Bauwerken, erfolgt über eindeutige Nummern (Spalte „NR“ in Arbeitsblättern), die die Funktion von (Fremd-) Schlüsseln in Datenbanken erfüllen.

Vernachlässigt man die „technischen“ Funktionen zum Lesen und Schreiben von Daten aus bzw. in Arbeitsblätter sowie einfache Berechnungen, so stellt der Prototyp im Wesentlichen die folgenden Verfahren zur Verfügung:

- Datenimport aus dem Verkehrsmodell (PTV Visum),
- Bauliche Vorselektion,
- Verkehrliche Vorselektion,
- Maßnahmengenerierung,
- Definition und Berechnung von Szenarien im Verkehrsmodell und
- Optimierung von Ertüchtigungsplänen.

## 9.2.2 Datenimport aus dem Verkehrsmodell (PTV Visum)

Beim Datenimport wurden problembezogen zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt.

Der Import von Bauwerken, Verkehrsführungen und potenziell von Maßnahmen betroffenen Bauwerken aus dem Verkehrsmodell erfolgt über die von PTV Visum zur Verfügung gestellte COM-Schnittstelle (Component Object Model). Hierüber wird PTV Visum zunächst veranlasst, die Basisversion des Verkehrsmodells zu laden. Ist dies erfolgt, werden die enthaltenen Objekte über die COM-Schnittstelle ausgelesen. Da dieser Datenimport normalerweise eher selten, etwa bei Projektbeginn und bei Änderungen im Verkehrsmodell, erfolgt, stellt das Laden des Verkehrsmodells, das ggf. mehrere Minuten dauern kann, kein Problem dar.

Um zu vermeiden, dass beim Import der Szenarienergebnisse für jedes Szenario das jeweilige angepasste Verkehrsmodell als Versionsdatei geladen werden muss, was zu inakzeptablen Wartezeiten führen würde, wurde hierfür ein Datenaustausch über eine Dateischnittstelle gewählt. Dazu wurde der Verfahrensablauf in PTV-Visum um einen Schritt zum Export der Ergebnisse in Form von Exceldateien erweitert, so dass beim Import vom Prototyp direkt auf den Inhalt dieser Dateien zugegriffen werden kann. Mit dieser Methode können in Abhängigkeit von den Hardware-Voraussetzungen die Ergebnisse von mehr als 1.000 Szenarienberechnungen in wenigen Minuten in den Prototyp übernommen werden.

## 9.2.3 Verfahrensschritte auf Objektebene

Die in den Kapiteln 4 und 5 beschriebenen Verfahren wurden im Prototyp unverändert umgesetzt.

Das Verfahren zur verkehrlichen Vorselektion dient der Berechnung der in Kapitel 4.2 definierten Kriterien und wird im Blatt „VERKEHRLICH“ aufgerufen. Die Ergebnisse werden sowohl in „VERKEHRLICH“ als auch in das Blatt „PROJEKTE“ geschrieben.

Das in Kapitel 4.3 beschriebene Verfahren zur baulichen Vorselektion kann im Tabellenblatt „BAULICH“ gestartet werden und berechnet auf Basis der im Blatt „Brücken“ eingegebenen Bauwerksdaten für jede Brücke die zugehörige Vorselektionsstufe, die in „BAULICH“ und in „PROJEKTE“ angezeigt wird.

Das Verfahren zur Generierung von Maßnahmen kann im Blatt „Maßnahmen“ aufgerufen werden und berechnet basierend auf dem Ergebnis der Vorselektion und dem Bauwerkszustand Standardmaßnahmen und Eingreifzeiträume entsprechend dem in Abbildung 17 bzw. Kapitel 5.2 dargestellten Ablauf.

## 9.2.4 Definition und Berechnung von Szenarien im Verkehrsmodell

Die Definition und Berechnung von Szenarien im Verkehrsmodell erfolgt über die von PTV Visum zur Verfügung gestellte COM-Schnittstelle (Component Object Model). Nach dem Laden des Verkehrsmodells stehen über die Schnittstelle alle wesentlichen Funktionen von PTV Visum zum Szenarienmanagement zur Verfügung.

Verwendet werden insbesondere:

- Hinzufügen bzw. Anlegen eines neuen Szenarios als Kombination von Modifikationen (entsprechend Verkehrsführungen in Excel) und Verfahrensparametern,

- Starten der Berechnung eines Szenarios und
- Abfragen des Berechnungsstatus eines Szenarios.

Weitere Funktionen wie

- das Löschen eines Szenarios oder der
- Abbruch der Berechnung eines Szenarios

können vom Anwender bei Bedarf direkt über die Visumoberfläche aufgerufen werden.

## 9.2.5 Optimierung von Ertüchtigungsplänen

Die Implementierung der Tabu-Suche beschränkte sich auf die möglichst gradlinige Umsetzung der in Abschnitt 8.3 beschriebenen Verfahrensschritte.

### Eingangsdaten

Zunächst werden alle Eingangsdaten in Listen (Datentyp „Collection“) eingelesen. Danach erfolgt die Berechnung von Lookup-Tabellen mit während der Optimierung häufig benötigten Werten (z.B. gewichtete Nutzerkosten aller Szenarien oder addierte abgezinste Kosten aller Alternativen) und die Überführung aller während der Optimierung benötigten Werte in effizientere Datenstrukturen (z.B. Arrays).

### Optimierungszyklus

Der Optimierungszyklus selbst wurde als Do-Loop-Schleife realisiert, die solange durchlaufen wird, bis keine neue Lösung mehr gefunden, die Maximalzahl an Iterationen erreicht oder die vorgegebene maximale Laufzeit überschritten wird.

Im Innern der Schleife wird in Abhängigkeit vom gewähltem Optimierungsverfahren die jeweilige Funktion zur Berechnung der nächsten Lösung aufgerufen.

In der äußeren Schleife erfolgen außerdem die Speicherung der jeweils besten Lösung und die Protokollierung der Verfahrensschritte.

Lösungskandidaten werden innerhalb der Optimierung als Arrays verwaltet, was einen direkten Zugriff auf die enthaltenen Alternativen und eine schnelle Erzeugung „benachbarter“ Lösungen in der Funktion zur Berechnung der nächsten Lösung ermöglicht.

### Berechnung der Nachbarschaft und Bewertung von Lösungen

In der Funktion zur Berechnung der nächsten Lösung werden die benachbarten Lösungen nicht nur erzeugt, sondern auch auf Gültigkeit geprüft und bei Gültigkeit bewertet, so dass die innerhalb der jeweiligen Nachbarschaft beste Lösung berechnet werden kann. Sowohl die Prüfung der Gültigkeit von Lösungen als auch ihre Bewertung erfolgt durch Prüfung bzw. Berechnung der Werte in den einzelnen Jahren des Betrachtungs- bzw. Bewertungszeitraums.

Die Tabu-Liste wurde als einfaches Array implementiert, das bei der Prüfung, ob ein bestimmtes Element in der Liste enthalten ist, sequenziell durchgegangen wird (Laufzeit zum Prüfen, ob Element enthalten ist:  $O(n)$ , Einfügen/Überschreiben eines Elementes in konstanter Zeit). Mit aufwendigeren Datenstrukturen, z.B. durch Verwendung eines Heaps (Laufzeit  $O(\log(n))$ ), könnte

bei großen Tabulisten (mit mehr als 1.000 Elementen) eine nennenswerte Beschleunigung des Verfahrens erreicht werden.

Wird in der Nachbarschaft einer Lösung keine gültige neue Lösung gefunden, so werden innerhalb einer Schleife solange zufällige Lösungen erzeugt und auf ihre Gültigkeit geprüft, bis entweder eine gültige Lösung erzeugt werden konnte oder die Obergrenze an Versuchen (vgl. Parameter „Maximalzahl Reparaturen“) erreicht ist.

Konnte trotz „Reparaturversuchen“ keine neue Lösung berechnet werden, so wird das Optimierungsverfahren beendet.

## 10 Fazit und Ausblick

Mit dem Projekt „Entwicklung einer Methodik einschl. Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen“ wurde ein prototypisches Verfahren entwickelt, das für ein Teilnetz der Bundesfernstraßen mit bis zu 50 Bauwerken erwogene Ertüchtigungs- und/oder Erneuerungsmaßnahmen an Brücken in ein optimiertes Ertüchtigungsprogramm überführt und die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen durch Nichtverfügbarkeit oder beschränkte Nutzbarkeit der Brücken bzw. den damit einhergehenden Anstieg der Nutzerkosten minimiert.

### Ergebnisse

Im Ergebnis entstand eine Methodik, welche die folgenden Aspekte beinhaltet:

Das Verfahren zur Vorselektion von Bauwerken unter baulichen und gesamtwirtschaftlichen Aspekten ermöglicht es den Baulastträgern, frühzeitig besonders kritische Bauwerke zu identifizieren, damit diese dann in ein Verfahren zur Maßnahmenplanung auf Teilnetzebene einbezogen werden können. Mit dem baulichen Vorselektionsmaß kann eine Einschätzung darüber getroffen werden, ob unter baulichen Aspekten ein Maßnahmenbedarf besteht und wenn ja, ob eher von einer Ertüchtigungsmaßnahme oder einem Ersatzneubau auszugehen ist. Bereits über Angaben zum Baujahr und zum Hauptbaustoff sind für viele Bauwerke erste Einstufungen möglich. Die Betrachtungen beziehen die gängigen Verfahren der BAST (Priorisierungssystem und Tragfähigkeitsindex) ein. Das verkehrliche Vorselektionsmaß erlaubt – unter Einbeziehung ggf. bereits bestehender verkehrlicher Einschränkungen – eine Beurteilung darüber, welche Bedeutung das Bauwerk im Straßennetz hat und wie wichtig daher eine Maßnahme unter verkehrlichen Aspekten ist. Es gibt auch Hinweise dazu, ob während der Maßnahmendurchführung mit großen negativen verkehrlichen Wirkungen zu rechnen ist.

Eng verknüpft mit der baulichen Vorselektion ist die Konkretisierung des baulichen Maßnahmenbedarfs. Art der Maßnahme und Eingreifzeitraum werden für jede Brücke auf Basis der baulichen Vorselektionsstufe und des Bauwerkszustands (Substanzkennziffern) ermittelt. Über die Anwendung von Standardmaßnahmenoptionen können bereits in einem frühen Planungsstadium grobe Maßnahmendauern und -kosten geschätzt werden.

Im Fokus stehen schließlich die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen von verkehrlichen Einschränkungen, die als Folge der Ertüchtigungs- und Erneuerungsmaßnahmen an den Bauwerken auftreten. Hierbei finden neben den maßnahmenbedingten Baulastträgerkosten und den veränderten Restwerten der Bauwerke die Veränderungen von Reisezeiten, Emissionen und Unfällen im von Verkehrseinschränkungen direkt oder indirekt betroffenen Teilnetz im Vergleich mit der Situation ohne Einschränkungen Berücksichtigung.

Für die Erarbeitung optimierter Ertüchtigungsprogramme ist insbesondere vor dem Hintergrund der Vielzahl an zu ertüchtigenden Bauwerken im Bundesfernstraßennetz bei aktuell vergleichsweise guter Finanzausstattung des Programms zur Brückenmodernisierung eine Betrachtung von gleichzeitigen (Teil-) Sperrungen von Brücken mit den entstehenden Wechselwirkungen im Verkehrsmodell von besonderer Bedeutung.

Aus der Anforderung, Ertüchtigungsprogramme für Teilnetze von bis zu 50 Bauwerken aufzustellen, ergibt sich theoretisch eine sehr große Anzahl an möglichen Kombinationen von Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Bauwerken: So sind in einem Teilnetz dieser Größe bei einer

angenommenen Obergrenze von 10 gleichzeitigen Verkehrseinschränkungen bereits mehr als 10 Milliarden Kombinationen möglich. Vor diesem Hintergrund werden mit der erarbeiteten Methodik fachlich plausible Wege zur Eingrenzung der theoretischen Kombinationsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt: So grenzen z.B. die auf der Basis der Vorselektionsergebnisse und der Bauwerkszustände definierten Eingreifzeiträume an den Bauwerken die Kombinationsmöglichkeiten deutlich ein. Kritisch sind demzufolge nur noch Kombinationen von Bauwerken mit sich überlappenden Eingreifzeiträumen. Unter verkehrlichen Aspekten können zusätzlich Kombinationen ausgeschlossen werden, welche voraussichtlich zu unzulässigen Verlagerungen auf Innerortsstraßen führen. Auch Kombinationen, welche mit großer Wahrscheinlichkeit höhere gesamtwirtschaftliche Kosten verursachen als die separate Durchführung der jeweiligen Einzelmaßnahmen, können als „ungünstig“ definiert und von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden. Ergänzend wird ein Schätzverfahren bereitgestellt, das es ermöglicht, die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen für ausgewählte Kombinationen valide zu approximieren.

Die Methodik zur Aufstellung von optimierten Ertüchtigungsprogrammen hat zum Ziel, für die Gesamtheit der im Teilnetz erforderlichen Maßnahmen einen möglichst hohen gesamtwirtschaftlichen Nutzen zu generieren, d. h. die negativen Auswirkungen von Verkehrseinschränkungen durch Baustellen sollen für die Verkehrsteilnehmer insgesamt möglichst gering gehalten werden. Daneben können in der Zielfunktion auch die Investitionskosten und die Restwerte der Bauwerke berücksichtigt werden. Die Berechnung erfolgt mittels eines auf dem sogenannten Tabu Search-Verfahren basierenden Optimierungsansatz. Dabei handelt es sich um ein Meta-Verfahren, welches eine lokale Suche (Nachbarschaftssuche) mit einem Ansatz zum Verlassen lokaler Optima (Umsetzung mittels Tabuliste) verbindet. Für das vorliegende Optimierungsproblem wurden verschiedene Möglichkeiten zur Umsetzung von Nachbarschaftssuche und Tabuliste implementiert und am Ende ein problemadäquates Vorgehen gewählt, das durch geeignete Verfahrensparameter gesteuert werden kann. Konkret wird in jedem Iterationsschritt versucht, durch Änderung der gewählten Alternative an genau einem Bauwerk einen möglichst guten neuen Plan zu erzeugen. Dabei wird durch die Tabu-Liste verhindert, dass bereits untersuchte Kombinationen ein zweites Mal geprüft werden, so dass auch Verschlechterungen des aktuellen Plans in Kauf genommen werden. Können aufgrund der Tabuisierung in einer Nachbarschaft keine neuen Lösungen gefunden werden, so wird ein neuer, zufälliger Plan erzeugt und somit nachfolgend ein anderer Bereich des Lösungsraums durchsucht.

Mit diesem Ansatz konnten im Rahmen der Testrechnungen plausible Optimierungslösungen dahingehend erzielt werden, dass diese einerseits nicht – prima vista - durch einfache, manuelle Korrekturen zu verbessern waren und andererseits festgestellt werden konnte, dass das Modell bei Veränderung einzelner Randbedingungen eine Reaktion in die erwartbare Richtung zeigte. So führte etwa die Erweiterung der Eingreifzeiträume von Maßnahmen bzw. Alternativen oder die Lockerung der Budgetrestriktionen zu einer Verschiebung bestimmter Maßnahmen, wenn dadurch eine Erhöhung des Gesamtnutzens erreicht werden konnte. Für ein kleineres, durch vollständiges Durchsuchen des Lösungsraums lösbares Beispiel mit variablen Maßnahmen an 9 Brücken, konnte sogar der Nachweis erbracht werden, dass durch die Tabu-Suche tatsächlich das Optimum gefunden wird, obwohl dabei nur ein Bruchteil des Lösungsraums durchsucht wurde.

Um die praktische Anwendbarkeit der erarbeiteten Methodik sicherzustellen, wurde diese in einem auf Microsoft Excel und VBA sowie der Verkehrsplanungssoftware PTV Visum basierenden Prototyp implementiert. Dieser stellt die Grundlage für eine weitergehende Softwareentwicklung

dar. Im Software-Prototyp wurden alle beschriebenen Verfahrensschritte abgebildet. Der Prototyp bietet weitreichende Möglichkeiten zur Nutzersteuerung. So sind zahlreiche Parameter sowohl der Bewertungsrechnungen (Kostensätze, Bewertungszeitraum usw.) als auch der Optimierung (z.B. Gewichtung der Komponenten der Zielfunktion, Budgetgrenzen) durch den Verfahrensanwender entsprechend seiner Anforderungen veränderbar. Im Rahmen der Verfahrensimplementierung wurde deutlich, dass ein Großteil der klassischen Verkehrsmodellierungsarbeiten, wie z. B. die Abbildung der maßnahmenbedingten Verkehrseinschränkungen, auch in einer späteren Softwarelösung nicht über Automatismen zu lösen sein wird, da praxisnahe, bauwerksspezifische Ansätze auch auf der hier abzubildenden strategischen Planungsebene verkehrsplanerisches Knowhow und dessen „manuelle“ Umsetzung im Verkehrsmodell erfordern. Hingegen konnte die Verknüpfung der Verkehrsplanungssoftware mit dem Exceltool – welche das automatisierte Ein- und Auslesen von Daten von Visum nach Excel und umgekehrt – ermöglicht, über entsprechende Skripte gut gelöst werden.

Mit dem Prototyp konnte das Verfahren am Beispiel getestet und so der Nachweis für die Anwendbarkeit und Durchgängigkeit erbracht werden. Gegenüber einer produktiv einsetzbaren Softwarelösung für einen breiteren Anwenderkreis sind mindestens noch eine komfortable Menüführung sowie eine Verknüpfung der einzelnen Verfahrensschritte mit den dafür erforderlichen Prüfmechanismen für ihre Abhängigkeiten untereinander zu ergänzen.

### **Ausblick**

Auf dem Weg, die entwickelte Methodik einem größeren Nutzerkreis zur Verfügung zu stellen, wäre grundsätzlich der Einsatz des Prototyps im Rahmen eines konkreten Anwendungsfalls im Sinne eines Pilotprojekts zu empfehlen. Die Bearbeitung des Pilotprojekts – welches möglichst ein Teilnetz mit (annähernd) 50 Bauwerken und realen Planungsfragestellungen sowie Planungsdaten umfassen sollte – sollte durch einen potenziellen Endanwender mit entsprechender fachlicher Begleitung erfolgen. Ziel einer derartigen Pilotanwendung wäre es, die Anwendbarkeit des Verfahrens in einem großen Teilnetz zu überprüfen und dabei die konkreten Anforderungen der Endanwender, zum Beispiel im Hinblick auf Datenbereitstellung, Bedienabläufe und Ergebnisausgabe zu spezifizieren. Das begleitende Einbeziehen weiterer möglicher Verfahrensnutzer, insbesondere aus anderen Bundesländern, würde vermeiden, dass die Verfahrensabläufe nur im Anwender-Bundesland umsetzbar sind.

Mit der Pilotanwendung würde also insbesondere der Anwendungskontext einer möglichen Softwarelösung geschärft werden können. Die Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt würden dann die Basis für die Spezifizierung der IT-Struktur, der Soft- und Hardwareanforderungen, des Datenbankkonzepts sowie des Konzepts zur Benutzerführung bilden, auf deren Basis dann die Ausschreibung für die Implementierung einer Endanwender-tauglichen Softwarelösungen erfolgen könnte. Der Vorschlag erfolgt vor dem Hintergrund, dass oft unterschätzt wird, dass die zielgerichtete Spezifizierung von Anforderungen sowie Daten und Programmstruktur mindestens so wichtig und häufig ähnlich aufwendig ist wie die eigentliche Realisierung.

## Literatur

- [1] AG Schwerverkehr, AUG Traglastindex: Grundkonzeption Traglastindex, Stand 04.07.2017
- [2] Budai-Balke, G. (2009): Operations research models for scheduling railway infrastructure. Dissertation, Erasmus Universität Rotterdam, Tinbergen Institute Research Series Nr. 45
- [3] Bundesanstalt für Straßenwesen – BASt (Hrsg.) (2002): Grundlagen zur Optimierung der Erhaltungsplanung von Brücken- und Ingenieurbauwerken auf Netzebene. Schlussbericht zum FE-Vorhaben 15.322/2000/HRB der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- [4] Bundesanstalt für Straßenwesen – BASt (Hrsg.) (2003): Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung der Erhaltungsplanung für Brücken- und Ingenieurbauwerke auf Netzebene. Schlussbericht zum FE-Vorhaben 15.369/2002/HRB der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- [5] Bundesanstalt für Straßenwesen – BASt (Hrsg.) (2006): Weiterentwicklung der Verfahren des BMS zur Optimierung der Erhaltungsplanung auf Netzebene. Schlussbericht zum FE-Vorhaben 15.399/2004/HRB der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- [6] Bundesanstalt für Straßenwesen – BASt (2010a): Brücken im Zuge von Bundesautobahnen. Vordringlich zu untersuchende Brücken.  
Link: [http://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/b4-nachrechnung-bruecken/b4-Brueckenliste-Bundesautobahnen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/b4-nachrechnung-bruecken/b4-Brueckenliste-Bundesautobahnen.pdf?__blob=publicationFile&v=1) ; zuletzt abgerufen am 29.05.2018
- [7] Bundesanstalt für Straßenwesen – BASt (2010b): Brücken im Zuge von Bundesstraßen. Vordringlich zu untersuchende Brücken.  
Link: [http://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/b4-nachrechnung-bruecken/b4-Brueckenliste-Bundesstra%C3%9Fen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/b4-nachrechnung-bruecken/b4-Brueckenliste-Bundesstra%C3%9Fen.pdf?__blob=publicationFile&v=1) ; zuletzt abgerufen am 29.05.2018
- [8] Bundesanstalt für Wasserbau – BAW (2015): Merkblatt Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW). Karlsruhe.  
Link: [http://vzb.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/20151103\\_BAWMerkblatt\\_Tragefaehigkeit\\_Wasserbauwerke\\_TbW\\_2015.pdf](http://vzb.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/20151103_BAWMerkblatt_Tragefaehigkeit_Wasserbauwerke_TbW_2015.pdf) ; zuletzt abgerufen am 18.05.2016
- [9] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – BMVBS (2013): Bericht „Strategie zur Ertüchtigung der Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen“. Vorlage an den Ausschuss für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung des Deutschen Bundestages. 22.5.2013  
Link: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/strategie-zur-ertuechtigung-der-strassenbruecken-be-richt.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/strategie-zur-ertuechtigung-der-strassenbruecken-be-richt.pdf?__blob=publicationFile) ; zuletzt abgerufen am: 19.7.2016
- [10] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – BMVBS (2011): „Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand“. Berlin. Ausgabe 05/2011
- [11] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – BMVBS (2004): Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ)
- [12] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – BMVI (2015a): Bericht „Stand der Ertüchtigung von Straßenbrücken der Bundesfernstraßen“. Vorlage an den Ausschuss für Verkehr und digitale Infrastruktur des Deutschen Bundestages. 26.10.2015.

- Link: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/strategie-zur-ertuechtigung-der-strassenbruecken-be-richt.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/strategie-zur-ertuechtigung-der-strassenbruecken-be-richt.pdf?__blob=publicationFile) ; zuletzt abgerufen am: 19.7.2016
- [13] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – BMVI (Hrsg.) (2015b): Verkehr in Zahlen 2015/2016
- [14] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – BMVI (2014): „Verflechtungsprognose 2030“; Schlussbericht 6.0981/2011, 11. Juni 2014.  
Link: <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/276/1/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf> ; zuletzt abgerufen am 21.07.2016
- [15] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – BMVI (2018): Folien „Brückenerhaltung“ und „Erhaltung der Brücken an Bundesfernstraßen“. (Nicht veröffentlicht)
- [16] DESTATIS (2015): Jahresschätzung Arbeitskosten. Arbeitskosten je geleistete Stunde im Jahr 2015. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Gesamtwirtschaft-Umwelt/VerdiensteArbeitskosten/ArbeitskostenLohnnebenkosten/Tabellen/ArbeitskostenJeStunde.html>
- [17] DESTATIS:  
Link: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Verkehrsunfaelle.html> , zuletzt abgerufen am 27.03.2019
- [18] Fischer, O. et al.; TU München; Büchting + Streit AG (2014): Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke. Schlussbericht zum FE-Vorhaben 15.0524/2011/FRB des Bundesministers für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- [19] Freundt, U.; Böning, S. (2013): Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung. BAST-Bericht B 91. 2013
- [20] Glover, F.; Laguna, M. (1997): Tabu Search. Kluwer Academic Publishers
- [21] Glover, F.; McMillan, C. (1986): The general employee scheduling problem: an integration of MS and AI. In: Computers and Operations Research.
- [22] Gopalakrishnan, M.; Mohan, S.; He, Z. (2001): A tabu search heuristic for preventive maintenance scheduling. Computers & Industrial Engineering 40
- [23] Infas, DLR (2010): Mobilität in Deutschland 2008. Kurzbericht: Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends  
Link: [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008\\_Kurzbericht\\_1.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Kurzbericht_1.pdf) , zuletzt abgerufen am 12.04.2019
- [24] Infas et al. (2019): Mobilität in Deutschland. Kurzreport: Verkehrsaufkommen – Struktur – Trends  
Link: [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/infas\\_Mobilitaet\\_in\\_Deutschland\\_2017\\_Kurzreport.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/infas_Mobilitaet_in_Deutschland_2017_Kurzreport.pdf) , zuletzt abgerufen am 12.04.2019
- [25] Kaschner, R.; Roder, C.; Mayer, T.; Brang, C. (2009): Stellungnahme. Ermittlung relevanter Bauwerke zur Ertüchtigung des Brückenbestandes der Bundesfernstraßen
- [26] Kaschner, R.; Buschmeyer W.; Schnellenbach-Held M.; Lubasch, P.; Grünberg, J.; Hansen, Mi; Liebig, J.O.; Geißler, K. (2009): Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen; BAST-Bericht B 68
- [27] Laffont, S. et al. (2012): Quantifizierung der Verlagerungseffekte bei Bundesautobahnen (BAB) im Rahmen von Bewertungsverfahren für Erhaltungsmaßnahmen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik Heft V 213. Bergisch Gladbach.

- 
- [28] Marzahn, Prof. Dr.-Ing. Gero (2017): Brückenmodernisierung in Deutschland - Anforderungen und Chancen. Vortrag beim VSVI-Seminar „Brücken für die Zukunft“. Friedberg, 24.05.2017.
- [29] Maurer, R.; Zilch, K. et al. (2012): Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke. BAST-Bericht B 89. 2012
- [30] PTV AG (2011a): SKRIBT Schutz kritischer Brücken und Tunnel. Bericht zu AP 3 / Abschlussbericht Gruppe D des FE-Vorhabens FE-Nr.: 13 N 9640 / Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (internes Dokument)
- [31] PTV AG (2011b): SKRIBT Schutz kritischer Brücken und Tunnel. Schlussbericht zum Teilvorhaben „Maßnahmenwirksamkeit“ des FE-Vorhabens FE-Nr.: 13 N 9640 / Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung
- [32] PTV AG et al. (2012a): SeRoN - Security of Road Transport Networks. FP7-ICT-SEC-2007-1 / Grant Agreement no. 225354. Final Report (Date of delivery: 20/12/2012)
- [33] PTV AG et al. (2012b): SeRoN - Security of Road Transport Networks. FP7-ICT-SEC-2007-1 / Grant Agreement no. 225354. Deliverable 400: Importance of the structures for the traffic network (Date of delivery: 04/05/2012)
- [34] PTV AG et al. (2012c): SeRoN - Security of Road Transport Networks. FP7-ICT-SEC-2007-1 / Grant Agreement no. 225354. Broschüre.  
Link: [www.seron-project.eu/download/SeRoN\\_Brochure\\_DE.pdf](http://www.seron-project.eu/download/SeRoN_Brochure_DE.pdf) ; zuletzt abgerufen am 24.02.2016
- [35] PTV AG (2014): SKRIBTPlus Schutz kritischer Brücken und Tunnel. Teilvorhaben „Wirksamkeiten für Nutzer und Verkehr“ Bericht zu AP 6 „Modellsystem Wirksamkeiten – Kritikalitätsverfahren“ zum FE-Vorhaben des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (FE-Nr.: 13 N 9640A); (internes Dokument)
- [36] PTV AG (2015a): SKRIBTPlus Schutz kritischer Brücken und Tunnel. Schlussbericht zum Teilvorhaben „Wirksamkeiten für Nutzer und Verkehr“; FE-Vorhaben des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (FE-Nr.: 13 N 9640A); (internes Dokument)
- [37] PTV AG et al. (2015b): Entwicklung von Bewertungskriterien und einer Optimierungsstrategie zur Priorisierung voneinander abhängiger Bauprojekte an Straßen- und Ingenieurbauwerken. Zwischenbericht zum FE-Projekt 29.0328/2013 des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Zwischenstand AP 1 & 2: Randbedingungen & Priorisierungsparameter, Stand: 20.07.2015 (unveröffentlicht)
- [38] PTV AG et.al (2016): FE-Projekt-Nr.: 97.358/2015 Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030. Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München.  
Link: [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-methodenhandbuch.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-methodenhandbuch.pdf?__blob=publicationFile) ; zuletzt abgerufen am 10.04.2019
- [39] PTV AG et.al (2016): FE 15.0616/2015/NRB Schlussbericht „Entwicklung einer Methodik für eine optimierte Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen. Karlsruhe/Berlin/Leipzig.
- [40] PTV AG (2018): Informationen zu Ihrem Validate-Teilmodell. Karlsruhe (unveröffentlicht)
- [41] Ruhrberg Ingenieurgesellschaft (2016): FE 15.0527/2011/FRB Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke und Erfahrungen aus durchgeführten Nachrechnungen. Entwurf Schlussbericht, Juni 2016

- [42] Schnellenbach-Held, M.; Welsch, T.; Fickler, S.; Hegger, J.; Reißer, K. (2015). Verstärkungen älterer Beton- und Spannbetonbrücken – Erarbeitung einer Erfahrungssammlung. Entwurf des Schlussberichtes Teil 1 zum FE-Vorhaben 15.0570/2012/NRB der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- [43] Schnellenbach-Held, M.; Peeter, M.; Scherbaum, F. (2010): Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand. Bericht zum FE-Vorhaben 89.217/2008/AP der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- [44] Stadler, A.; Freitag, N.; Maerschalk, G. (2015): Optimierungsstrategie zur Priorisierung voneinander abhängiger Bauprojekte von Straßen- und Ingenieurbauwerken, Zwischenbericht 29.0328/2013 (unveröffentlicht). 2015
- [45] Walther, Ch.; Paufler-Mann, D.; Stadler, A.; Waßmuth, V. (2007): Informationen über Alternativrouten als Grundlage für objektbezogene Bewertungsverfahren im BMS. Schlussbericht zu FE 15.0411/2005/HRB. Im Auftrag der BASt. 2007

## Bilder

Abbildung 1:	Prozessablauf bei der Anwendung des Planungsinstrumentes / Prototyps .....	17
Abbildung 2:	Bauwerke im Beispielnetz.....	19
Abbildung 3:	Bauwerke des Rheinbrücken-Beispiels.....	20
Abbildung 4:	Rolle der Ansätze zur Verkehrsmodellierung und der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsansätze im Projekt.....	21
Abbildung 5:	Verkehrliche Effekte einer verkehrlichen Einschränkung am Beispiel der Rheinbrücke Duisburg Neuenkamp .....	23
Abbildung 6:	PTV Validate.....	24
Abbildung 7:	Darstellung der Zielsysteme im Rahmen der gesamtwirtschaftlichen Bewertung.....	26
Abbildung 8:	BVWP 2030: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values in €/Tsd. Fzg-km (Quelle: [38] S. 149) .....	32
Abbildung 9:	BVWP 2030: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk Values differenziert nach der vierten Kennziffer (Qualität) [€/Tsd. Fzg-km] (Quelle: [38] S. 150).....	33
Abbildung 10:	Teilnetz.....	34
Abbildung 11:	Im Netzmodell verortete Bauwerke: Bauwerke der Nachrechnungsliste Nordrhein-Westfalen.....	35
Abbildung 12:	Im Netzmodell hinterlegte Bauwerksinformationen .....	36
Abbildung 13:	Ergebnis der Vorselektion unter verkehrlichen Aspekten: Einzelwerte ...	40
Abbildung 14:	Ergebnis der Vorselektion unter verkehrlichen Aspekten: Vorselektionsmaß.....	41

Abbildung 15: Ergebnis der Vorselektion unter verkehrlichen Aspekten: kardinalskaliertes Vorselektionsmaß.....	42
Abbildung 16: Ergebnis der baulichen Vorselektion.....	46
Abbildung 17: Ablauf der Maßnahmenzuordnung.....	50
Abbildung 18: Vorrangnetz Brückenertüchtigung (Quelle: Marzahn 2017 [28][15]).....	52
Abbildung 19: Bestimmung des Maßnahmentyps.....	53
Abbildung 20: Bestimmung des Maßnahmenbeginns auf Basis der Vorselektionsstufe und der Substantanzkennzahlen.....	54
Abbildung 21: Bestimmung des Maßnahmenbeginns unter Berücksichtigung des „Vorrangnetz Brückenertüchtigung“.....	55
Abbildung 22: Bestimmung des Maßnahmenbeginns unter Berücksichtigung des „Vorrangnetz Brückenertüchtigung“ und nach Nutzereingriff.....	56
Abbildung 23: Option a (Sofortmaßnahme und Ersatzneubau).....	59
Abbildung 24: Option b (Ertüchtigungsmaßnahme).....	60
Abbildung 25: Option c1 (Ersatzneubau – zeitig).....	60
Abbildung 26: Option c2 (Ersatzneubau – spät).....	61
Abbildung 27: Bewertungszeitraum für die Standardoptionen.....	64
Abbildung 28: Anzahl möglicher Kombinationen von Bauwerken in Abhängigkeit von der Größe des Teilnetzes und der Anzahl gleichzeitiger Verkehrseinschränkungen.....	70
Abbildung 29: Voneinander abhängige Brücken mit gemeinsamer Alternativroute.....	76
Abbildung 30: Staubildung bei Verkehrseinschränkungen an unabhängigen Brücken (links) und an im Verlauf eines Streckenzugs liegenden Brücken (rechts). .....	77
Abbildung 31: Zusätzliche gesamtwirtschaftlicher Kosten bei im Verlauf eines Streckenzugs liegenden Brücken A-B-C.....	79
Abbildung 32: Qualitative Darstellung zusätzlicher gesamtwirtschaftlicher Kosten bei Brücken A, B und C mit sich paarweise überschneidenden Alternativrouten.....	80
Abbildung 33: Alternativen und Kombinationsmöglichkeiten.....	87
Abbildung 34: Tabu Search – Pseudocodedarstellung.....	91
Abbildung 35: Tabu Search – Optimierungszyklus.....	92
Abbildung 36: Lösungsraum des Szenarios „KLEIN“.....	98
Abbildung 37: Lösungsräume der Szenarien.....	99
Abbildung 38: Lösungsraum des Szenarios „PROTOTYP“.....	103
Abbildung 39: Grundstruktur und Ablauf.....	107

## Tabellen

Tabelle 1:	Spezifische Schadenskosten für Abgasemissionen beim Betrieb von Verbrennungsmotoren (Quelle: [38], S. 111).....	30
Tabelle 2:	Verkehrliche Vorselektion: Vergleichsrechnungen für verschiedene Schwellenwerte bei Kriterium C .....	43
Tabelle 3:	Zuordnung des Traglastindex zu Vorselektionsstufen.....	45
Tabelle 4:	Ergebnis der Vorselektion unter baulichen und verkehrlichen Aspekten	47
Tabelle 5:	Standardmaßnahmen .....	48
Tabelle 6:	Faktoren und Maßnahmendauern für unterschiedliche Brückengrößen .	49
Tabelle 7:	Auf der Teilbauwerksebene automatisiert generierte Maßnahmenkosten und -dauern .....	57
Tabelle 8:	Maßnahmenkosten und -dauern nach Nutzereingriff auf der Bauwerksebene .....	58
Tabelle 9:	Berechnung der Anzahl möglicher Kombinationen von Bauwerken.....	69
Tabelle 10:	Verfahrensparameter.....	83
Tabelle 11:	Ergebnisse für das Grundszenario „KLEIN“ (41.472.000 Kombinationen) .....	100
Tabelle 12:	Ergebnisse für die Minimierung der Nutzerkosten im Szenario „KLEIN“100	
Tabelle 13:	Ergebnisse für das Szenario „KLEIN“ mit Ausschlüssen von Kombinationen von Verkehrseinschränkungen .....	101
Tabelle 14:	Ergebnisse für das Szenario „GROSS 2“ (2.418.647.040.000 Kombinationen).....	101
Tabelle 15:	Ergebnisse für das Szenario „GROSS 3“ (4.147.200.000.000 Kombinationen).....	102
Tabelle 16:	Ergebnisse für das Szenario „GROSS 4“ (102.404.321.280.000 Kombinationen).....	102
Tabelle 17:	Ergebnisse für das Szenario „GROSS 4“ mit Budgetrestriktionen (zuzüglich Zusatzbudgets für 1. bis 6. Jahr) .....	102
Tabelle 18:	Ergebnisse für das Szenario „PROTOTYP“ ohne Einschränkungen .....	105
Tabelle 19:	Ergebnisse für das Szenario „PROTOTYP“ mit Einschränkungen .....	105

## **Anhang: Literaturstudie sowie Bestandsaufnahme vorhandener Methoden und Ansätze**

### **1 Einführung**

Ziel der Literaturstudie war die Zusammenstellung von vorhandenen Erkenntnissen zur Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme. Dazu wurde eine Literaturrecherche zum Thema Ertüchtigung durchgeführt und es wurde geprüft, welche Erkenntnisse aus verwandten Bereichen ggf. auf die vorliegende Fragestellung übertragen werden können. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Auswertung von Praxiserfahrungen im Hinblick auf die Nachrechnung von Bauwerken gelegt. Dazu wurden durch die Straßenbauverwaltung NRW (Straßen.NRW) Daten zu Nachrechnungen an Brücken im Zuge der BAB 1 zur Verfügung gestellt.

In Kapitel 2 und 3 des Anhangs werden die relevanten Literaturquellen sowie Informationen zu vorhandenen Methoden und Ansätze aus verwandten Bereichen in Form von einseitigen Steckbriefen dargestellt. Diese Steckbriefe enthalten neben den wichtigsten bibliografischen Angaben eine kurze Darstellung der Inhalte der jeweiligen Literaturquelle sowie eine Einschätzung zur Relevanz der Literaturquelle im Hinblick auf die im Rahmen des Projekts zu bearbeitenden Fragestellungen.

In Kapitel 4 sind die zentralen Erkenntnisse aus der Analyse der Nachrechnungsdaten zusammenfassend dargestellt, und in Kapitel 5 wird ein kurzes Fazit im Hinblick auf die Verwertbarkeit der zusammengetragenen Informationen für die Fragestellungen des F+E-Projekts gezogen.

## 2 Literatur: Bauliche Aspekte

Autor	Fischer, O. et al.; TU München, Büchting + Streit AG
Projekttitel	<b>Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke</b>
Dokumente	Schlussbericht zum FE-Vorhaben 15.0524/2011/FRB des Bundesministers für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
Jahr	2014

### Inhalt

Im Rahmen der Untersuchung wird eine Stichprobe von 146 bereits auf Basis der „Nachrechnungsrichtlinie“ nachgerechneten Stahl- und Spannbetonbrücken hinsichtlich der Nachrechnungsergebnisse sowie der gewählten Ertüchtigungsmaßnahmen ausgewertet. Zunächst wird festgestellt, dass die Stichprobe bezüglich Alter, Zustand bzw. Brückenklassen mit den Bauwerken der Nachrechnungsliste der BAST vergleichbar ist.

Im Weiteren werden typische rechnerische Defizite betrachtet und die im Ergebnis der Nachrechnungen festgelegten Ertüchtigungsmaßnahmen (prozentuale Verteilung je Defizit) ausgewertet. Im Anschluss daran werden Hinweise zur weiteren Verbesserung der Nachrechnungsrichtlinie angegeben. Dazu gehört der Hinweis, ggf. weiterführende Nachweismethoden zuzulassen (z. B. erweiterter Hauptzugspannungsnachweis, alternative Ansätze für Querkraftbemessung, Gurtanschlussnachweise etc.). Bei nur 4 der 146 nachgerechneten Bauwerke konnten in Stufe 1 alle Nachweise erbracht werden, bei 19 Bauwerken im Zuge der Nachweisstufe 2. Zu den meisten nachgerechneten Brücken (ca. 70 %) lagen keine abschließenden Angaben zu einer Einstufung vor.

Als häufigstes Defizit wird die rechnerische Querkrafttragfähigkeit von älteren, vor 1966 errichteten Spannbetonüberbauten angegeben.

### Relevanz im Rahmen des bearbeiteten Projektes

Im Ergebnis der Studie werden Hinweise zur weiteren Nachrechnung von Brücken gegeben, aus denen eine Auswahl auch im Rahmen des bearbeiteten Projektes hilfreich erscheint. So wird beispielsweise die grundsätzliche Übereinstimmung der Prioritätszahl der Nachrechnungsliste der BAST (BAST 2010) mit den Ergebnissen der Nachrechnung bestätigt. Als zusätzlicher Parameter für eine Zuschärfung der Vorauswahl von Bauwerken wird die Querschnittsform genannt.

Durch einen Abgleich der in dieser Quelle verwendeten Nachrechnungsergebnisse mit durch Straßen.NRW zur Verfügung gestellten Nachrechnungsergebnissen von Bauwerken im Zuge der A 1 konnten weitere Erkenntnisse für die Vorselektion von nicht nachgerechneten Bauwerken gewonnen werden (vgl. Kapitel 4).

Autor	Kaschner, R., Roder, C., Mayer, T., Brang, C. (Bundesanstalt für Straßenwesen)
Titel	<b>Stellungnahme</b> <b>Ermittlung relevanter Bauwerke zur Ertüchtigung des Brückenbestandes der Bundesfernstraßen</b>
Jahr	2009

### Inhalt

Auf Basis von Datenerhebungen in Bundesländern und Datenbankauswertungen wurden relevante Bauwerksinformationen zusammengetragen, auf Basis derer eine Vorselektion solcher Bauwerke erfolgen konnte, die aufgrund ihres Zustandes, der Verkehrsbelastung bzw. der Bauart als besonders bedeutend hinsichtlich einer objektbezogenen Nachrechnung einzustufen sind.

Es werden zwei Alternativen eines Priorisierungssystems erarbeitet, die beide eine Identifikation relevanter Bauwerke für eine Nachrechnung ermöglichen. Dabei werden die folgenden Einflussfaktoren benannt:

- Verkehr,
- Zustandsnote Überbau,
- Temperaturdifferenz,
- Koppelfugen,
- Querkraft,
- Spannungsrisskorrosion sowie
- Zustand des Teilbauwerks,

die je nach Vorliegen von Parameterausprägungen mit Wertungszahlen belegt werden. Die Summe der (ggf. faktorisierten) Wertungszahlen ergibt die Prioritätszahl. Je höher die Prioritätszahl ausfällt, umso dringlicher ist das Bauwerk einer objektbezogenen Nachrechnung zu unterziehen.

### Relevanz im Rahmen des bearbeiteten Projektes

Das vorgestellte Priorisierungsverfahren stellt eine Grundlage für die Vorauswahl nachzurechnender Bauwerke dar. Dieses sollte auch im vorliegenden Projekt die Basis für die Vorselektion relevanter Bauwerke in AP 2 bilden.

Im Abgleich mit der Literaturquelle Fischer et.al. 2014 wurden Hinweise identifiziert, die die grundsätzliche Eignung des BAST-Priorisierungssystems zur Selektion der nachrechnungsrelevanten Bauwerke bestätigen.

### 3 Literatur: Verkehrliche und gesamtwirtschaftliche Aspekte

Autor	PTV AG
Projekttitel	<b>Verbundprojekt SKRIBT Schutz kritischer Brücken und Tunnel</b>
Dokumente	Bericht zu AP 3 / Abschlussbericht Gruppe D (internes Dokument) / Schlussbericht zum Teilvorhaben „Maßnahmenwirksamkeit“ des FE-Vorhabens FE-Nr.: 13 N 9640 / Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung
Jahr	2011

#### Inhalt

Das vorrangige Ziel des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprogramms „Forschung für die zivile Sicherheit“ geförderten Verbundprojektes SKRIBT lag in der signifikanten Erhöhung der Sicherheit von Brücken- und Tunnelbauwerken sowie deren Nutzern. Dieses Ziel sollte durch die Entwicklung und Anwendung praxistauglicher Untersuchungsmethoden zur Identifizierung möglicher Bedrohungsszenarien, kritischer Bauwerke und wirksamer sowie kosteneffizienter Schutzmaßnahmen erreicht werden. Im Projekt wurde die Kritikalität als Maß für die Konsequenzen bei einem Ausfall von Bauwerken in der Folge von Initialereignissen anhand von vier Wirkungsbereichen ermittelt: (1) Standfestigkeit und Verkehrssicherheit der Bauwerke, (2) Betroffenheit der Nutzer, (3) Verkehrliche Aspekte und (4) Symbolik der Bauwerke. Im Hinblick auf die verkehrlichen Aspekte wurden Mehrreisezeiten als Resultat aus einem reduzierten Angebot, verfügbaren Alternativrouten mit ihren Kapazitäten und der aktuell gegebenen Nachfrage als adäquate Größe identifiziert, um die Kritikalität zu beschreiben. Der Bewertungshintergrund für die Eingangsgrößen „Mehreisezeiten“ wurde aufgrund von Umlegungsberechnungen unter Ansatz eines Verkehrsmodells ermittelt. Basis für diese Berechnungen bildete das Straßennetz in Nordrhein-Westfalen mit den darin verorteten Brückenbauwerken. Neben dem Verkehrsangebot wurde auch die Verkehrsnachfragematrix des Raumes in einem Teilnetz berücksichtigt, die aus dem Straßennetz- und Verkehrsdatenmodell Validate (Stand 2005) generiert werden konnte. Die Betrachtungen der Auswirkungen einer Vollsperrung (Restkapazität 0 %) sowie einer Teilsperrung (Restkapazität 50 %) erfolgten für 150 ausgewählte Verkehrsbauwerke. Entscheidend bei der Teilnetzgenerierung war die Wahl des Ausschnitts, so dass ein weiträumiges Ausweichen des Verkehrs vollständig erfasst werden konnte. Im Rahmen der Bearbeitung wurden Bauwerksdaten aus der Datenbank SIB-Bauwerke NRW-Netz georeferenziert. Die Abbildung der Auswirkung eines Szenarios auf den Verkehrsfluss erfolgt durch eine Beeinflussung der Kapazität und der Geschwindigkeit auf dem Streckenabschnitt, der dem betrachteten Bauwerk zugeordnet wird. So werden die Auswirkungen für den Basis-Fall („Freier Verkehr“) und den jeweiligen Mit-Fall („Voll-/Teil-Sperrung“) durch Umlegungsberechnungen betrachtet. Aus den berechneten Mehrreisezeiten wurde schließlich ein Kritikalitätsmaß abgeleitet.

#### Relevanz für das Projekt:

Siehe Steckbrief zum Projekt SKRIBT<sup>Plus</sup> (siehe unten)

Autor	PTV AG et al.
Projekttitlel	<b>SERON – Security of Road Transport networks</b>
Dokumente	Final Report (Date of delivery: 20/12/2012) Deliverable 400: Importance of the structures for the traffic network (Date of delivery: 04/05/2012) SeRoN Broschüre ( <a href="http://www.seron-project.eu/download/SeRoN_Brochure_DE.pdf">www.seron-project.eu/download/SeRoN_Brochure_DE.pdf</a> ) FP7-ICT-SEC-2007-1 / Grant Agreement no. 225354
Jahr	2012

### Inhalt

Das Forschungsprojekt SeRoN (Security of Road Transport Networks) wurde im siebten Rahmenprogramm der Europäischen Union (FP7/2007-2013) gefördert und begegnet den Herausforderungen einer zunehmenden Anzahl sicherheitsrelevanter Ereignisse im Transportsektor mit der Untersuchung von Auswirkungen möglicher Anschläge auf das Verkehrsnetz. Der Fokus lag auf den regionalen und überregionalen Auswirkungen auf Transportverbindungen und deren wirtschaftlichen Folgen. In SeRoN wurde eine Methode entwickelt, um Straßennetze und die darin befindlichen Elemente wie Brücken und Tunnel zu analysieren und zu klassifizieren. Mit der Methode können kritische Straßeninfrastrukturelemente identifiziert und wirksame sowie wirtschaftliche Schutzmaßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit der Infrastrukturen und deren Nutzer ermittelt werden.

Im Rahmen von SeRoN wurden die im Rahmen des Projekts SKRIBT (siehe oben) entwickelten Verfahren zur Bewertung der verkehrlichen Kritikalität und zur Bewertung von Schutzmaßnahmen so verknüpft, dass eine Bewertung der verkehrlichen Kritikalität auf der Basis einer größeren Anzahl an Bewertungsindikatoren erfolgen konnte.

Das Kritikalitäts-Verfahren wurde im Rahmen des Projekts SKRIBT<sup>Plus</sup> (siehe folgende Seite) weiterentwickelt.

### Relevanz für das Projekt:

Siehe Steckbrief zum Projekt SKRIBT<sup>Plus</sup> (siehe folgende Seite)

Autor	PTV AG
Projekttitel	<b>Verbundprojekt SKRIBT<sup>Plus</sup> Schutz kritischer Brücken und Tunnel</b> <b>Teilvorhaben „Wirksamkeiten für Nutzer und Verkehr“</b>
Dokumente	Bericht zu AP 6 Modellsystem Wirksamkeiten – Kritikalitätsverfahren (internes Dokument) / Schlussbericht zum Teilvorhaben „Wirksamkeiten für Nutzer und Verkehr“ FE-Nr.: 13 N 9640A / Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung
Jahr	2014/2015

### Inhalt

Das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Verbundprojekt SKRIBT<sup>Plus</sup> knüpft direkt an die Ergebnisse des Projektes „SKRIBT – Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen“ an. Das Kritikalitätsverfahren wurde hinsichtlich der berücksichtigten verkehrlichen Wirkungen deutlich erweitert. Das Verfahren basiert nun bei der Ermittlung der Kritikalität nicht allein auf Reisezeiten, sondern zusätzlich auch auf Luft- und Klimagasemissionen sowie dem Unfallgeschehen. Das Verfahren wurde außerdem hinsichtlich der konkreten Berechnungsvorschriften, mittels derer die verkehrlichen Wirkungen quantifiziert werden, aktualisiert. Soweit damals bekannt, wurden dabei die Ansätze aus dem Verfahren zur Bundesverkehrswegeplanung 2030 übernommen. Da das Kritikalitätsverfahren jedoch auf die Berechnung großer Bauwerkskollektive ausgerichtet ist und damit erhöhte Anforderungen an möglichst kurze Berechnungszeiten bestanden, wurden teilweise Vereinfachungen vorgenommen. Die Bewertung der Bauwerke erfolgt im Rahmen des Kritikalitätsverfahrens mittels eines verkehrsmodellgestützten Ansatzes, der die vorhandenen Alternativrouten und ihre (zusätzlichen) Kapazitäten berücksichtigt. Als relevante Bewertungsindikatoren wurden Mehrreisezeiten, Unfälle und Schadstoffemissionen (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und PM) identifiziert.

Bereits im Verbundprojekt SKRIBT wurde die Festlegung getroffen, dass im Rahmen der Wertsynthese der Wirksamkeits-Kosten-Analyse (WKA) ein monetäres Wertegerüst herangezogen werden soll. Das bedeutet, dass alle Indikatorenwerte über entsprechende Kostensätze monetarisiert werden. Es wurde im Weiteren beschlossen, von einer Monetarisierung der Indikatorenwerte, die eine Quantifizierung von Getöteten beinhalten, abzusehen. Diese Vereinbarung wurde auch in SKRIBT<sup>Plus</sup> beibehalten. Damit ergab sich für das Verfahren ein zweidimensionaler Lösungsvektor, der aus den gesamtwirtschaftlichen Kosten und den Getöteten bei Ausfall des betrachteten Bauwerks besteht.

### Relevanz für das Projekt:

Das Kritikalitätsverfahren kann grundsätzlich in entsprechend angepasster Form auf die aktuelle Fragestellung übertragen werden. Insbesondere die Erkenntnisse zur Bauwerksverortung, der Implementierung der SIB-Bauwerke-Daten sowie der Umlegungsalgorithmen können Eingang in die zu entwickelnden Verfahren zur Ermittlung der Kritikalität sowie zur Bewertung der Ertüchtigungsmaßnahmen finden. Auch Aspekte der Bewertung zur Ermittlung der Kritikalität sowie zur Bewertung der Ertüchtigungsmaßnahmen sind anwendbar.

Autor	PTV AG et al.
Projekttitlel	<b>Entwicklung von Bewertungskriterien und einer Optimierungsstrategie zur Priorisierung für voneinander abhängiger Bauprojekte an Straßen- und Ingenieurbauwerken</b>
Dokumente	Zwischenbericht zum FE-Projekt 29.0328/2013 des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Zwischenstand AP 1 & 2: Randbedingungen & Priorisierungsparameter, 20.07.2015
Jahr	2015/2016

### Inhalt

Den Ausgangspunkt des Projektes bilden die derzeit existierenden Verfahren zur Priorisierung von Bauprojekten in den Bereichen Neubau (Bedarfsplanerstellung), mittelfristige Erhaltungsplanung (Strecken und Bauwerke) und Bauwerksertüchtigung (Priorisierungsliste / regelmäßiger Statusbericht).

Die jeweiligen Verfahren beruhen auf unterschiedlichen Zielvorstellungen, die sowohl wirtschaftliche als auch technische Inhalte berücksichtigen, und unterscheiden sich in den Detaillierungsgraden der zu berücksichtigenden Randbedingungen. Daraus resultiert, dass derzeit keine einheitliche und allgemein anwendbare Priorisierungssystematik für die Ermittlung einer optimierten Realisierungsreihenfolge von unterschiedlichen Projekten für einen Streckenabschnitt oder eine Netzmasche vorliegt.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer solchen Vorgehensweise, die auf Netzabschnitte der Bundesfernstraßen anwendbar sein soll und eine insbesondere bezüglich der verkehrlichen Auswirkungen optimierte Abwicklung unterschiedlichster Baumaßnahmen ermöglicht. Der Schwerpunkt des Projektes liegt bei den Erhaltungsmaßnahmen an der Straßenbefestigung sowie an den Großbrücken.

In dem zum Zeitpunkt der Literaturrecherche noch laufenden Forschungsprojekt werden die relevanten Randbedingungen zur Erstellung einer übergreifenden Gesamtpriorisierung identifiziert und die daraus resultierenden Priorisierungsparameter detailliert. Darauf aufbauend wird ein Optimierungsansatz entwickelt, dessen praxistaugliche Anwendbarkeit am Beispiel der A 45 zwischen dem Autobahnkreuz Hagen (Nordrhein-Westfalen) und dem Autobahnkreuz Gambach (Hessen) überprüft bzw. nachgewiesen werden soll.

### Relevanz für das Projekt:

Auch wenn der Schwerpunkt des Projektes nicht auf dem Thema Ertüchtigung, sondern eher im Bereich der Erhaltung liegt, besteht zum einen die Möglichkeit, Erkenntnisse zur Ermittlung und Bewertung verkehrlicher Wirkungen größerer Maßnahmen an Bauwerken auf die Bewertung von Ertüchtigungsmaßnahmen zu übertragen. Zum anderen können Erkenntnisse zur Ermittlung der optimalen Realisierungsreihenfolge bei mehreren Einzelprojekten in die Methodik für die Aufstellung optimierter Ertüchtigungsprogramme einfließen.

Hrsg.	Bundesanstalt für Straßenwesen
Projekttitel	<b>FE-Nr. 15.322/2000/HRB – Grundlagen zur Optimierung der Erhaltungsplanung von Brücken- und Ingenieurbauwerken auf Netzebene</b> <b>FE-Nr. 15.369/2002/HRB – Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung der Erhaltungsplanung für Brücken- und Ingenieurbauwerke auf Netzebene</b> <b>FE-Nr. 15.399/2004/HRB – Weiterentwicklung der Verfahren des BMS zur Optimierung der Erhaltungsplanung auf Netzebene</b>
Dokumente	Schlussberichte Forschungsprojekte
Jahr	2002/2003/2006

### Inhalt

Die drei von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) beauftragten aufeinander aufbauenden Forschungsprojekte bildeten die Grundlage für die Spezifikation und Implementierung des Moduls BMS-EP des Bauwerk-Management-Systems (BMS) zur Erhaltungsplanung auf Netzebene.

Im ersten Projekt wurden zunächst grundlegende Anforderungen an ein Verfahren zur netzweiten Optimierung von Erhaltungsmaßnahmen geklärt und im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche bereits bestehende Managementsysteme untersucht sowie relevante Optimierungsverfahren aus dem Bereich des Operation Research zusammengestellt. Hiervon ausgehend konnte das zu lösende Optimierungsproblem mathematisch als „Rucksackproblem“ dargestellt werden, das nacheinander für die verschiedenen Jahre eines angenommenen Planungszeitraums zu lösen ist.

Im zweiten Projekt wurde ein konkretes Verfahren zur Berechnung von im Rahmen der Spezifikation (nahezu) optimalen netzweiten Erhaltungsplänen angegeben. Das Verfahren wurde außerdem prototypisch implementiert und anhand von Vergleichsrechnungen erprobt.

Im dritten Projekt wurde schließlich das später im BMS implementierte Optimierungsverfahren entwickelt, welches sich durch die Eignung für sehr große Datensätze und besondere Robustheit gegenüber Änderungen an bestimmten Randbedingungen auszeichnet.

### Relevanz für das Projekt:

Im Rahmen des Projektes wird geprüft, inwieweit Prinzipien der Erhaltungsplanung auf Netzebene auf die Erstellung bzw. Optimierung von „Ertüchtigungsplänen“ übertragen werden können. Die genannten Projekte beschreiben insbesondere die Darstellung derartiger Optimierungsprobleme in Form unterschiedlicher Varianten der im Operation Research bekannten „Rucksackprobleme“ und stellen gleichzeitig geeignete Lösungsverfahren zur Verfügung.

Autor	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
Titel	<b>Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ)</b>
Ort, Jahr	2004

### Inhalt

Die Richtlinie befasst sich mit der wirtschaftlichen Beurteilung von Erhaltungsmaßnahmen bei Straßenbrücken. Zu den Erhaltungsmaßnahmen werden Unterhaltungs-, Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen gezählt.

Ziel der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ist es, mittels eines objektbezogenen, am einzelnen Brückenbauwerk orientierten Verfahrens, Maßnahmen zu identifizieren, die mit vertretbarem Mitteleinsatz zu einer möglichst langen Nutzungsdauer der instand gesetzten oder erneuerten Straßenbrücken führen und in der Folge mit möglichst geringen Erhaltungskosten verbunden sind. Da also die Folgekosten in den Nutzungszeiträumen der instand gesetzten oder erneuerten Straßenbrücken zu berücksichtigen sind, erfolgen die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen mittels finanzmathematischer Verfahren. Zentral im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der betrachteten Maßnahmen ist die Definition eines gemeinsamen Bewertungszeitraums.

Die Anwendung der Richtlinie erfolgt bei Erhaltungs- oder Erneuerungsmaßnahmen an Straßenbrücken in der Baulast des Bundes mit einem Auftragsvolumen von mehr als 3 Mio. EURO, also bei größeren Instandsetzungsmaßnahmen und Erneuerungen bestehender Straßenbrücken, oder bei Erhaltungsmaßnahmen, deren Auftragsvolumen 50 % der reinen Baukosten des Bauwerks zum heutigen Preisstand übersteigt.

Das Verfahren soll Aussagen zur wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit verschiedener Arten von Erhaltungsmaßnahmen ermöglichen und als Entscheidungshilfe im Hinblick auf folgende Fragestellungen dienen:

- Abwägung zwischen Instandsetzung oder Erneuerung,
- Abwägung verschiedener Varianten der Instandsetzung und
- Abwägung verschiedener Varianten der Erneuerung, die sich z. B. durch das Bauverfahren und die Bauweise unterscheiden.

### Relevanz für das Projekt:

Grundsätzlich erfolgt die Anwendung des Verfahrens ab einem Auftragsvolumen von mehr als 3 Mio. EURO. Es ist damit auch für einen Großteil der hier zu betrachtenden Ertüchtigungs- und für Erneuerungsmaßnahmen relevant. Im Detail zu prüfen ist, inwiefern der erforderliche Dateninput für die Anwendung der Richtlinie – insbesondere im Hinblick auf die Abschätzung von erforderlichen Zweitmaßnahmen – im Rahmen des zu entwickelnden Verfahrens zur Maßnahmenbewertung zu erbringen ist. Ggf. ist hier ein vereinfachter Ansatz zu wählen.

Autor	PTV AG, PTV Transport Consult GmbH, TCI Röhling, Hans-Ullrich Mann
Projekttitlel	<b>Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030</b>
Dokumente	Arbeitsstand (noch nicht veröffentlicht)
Jahr	2016

### Inhalt

Der Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 mit seinen Aussagen bzgl. des Bedarfs nach Verkehrsinfrastrukturprojekten baut auf den Ergebnissen eines umfassenden Bewertungsverfahrens auf. Dieses Verfahren erfasst die unterschiedlichen, mit Bezug zur Bundesverkehrswegeplanung relevanten Wirkungen der zur Bewertung anstehenden Verkehrsprojekte und führt sie derart zusammen, dass qualifizierte Aussagen zu ihrem Umsetzungsbedarf getroffen werden können.

Das u. a. von der PTV AG aufbereitete Methodenhandbuch enthält eine Beschreibung dieses Bewertungsverfahrens. Mit der Detaillierungstiefe der Beschreibung wird ein vertieftes Verständnis der Quantifizierungs- und Berechnungsansätze des Verfahrens ermöglicht. Wesentliche Berechnungsschritte sind nachvollziehbar dargestellt.

Das Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung wurde mit der Aufstellung des BVWP 2030 weiterentwickelt. Die Weiterentwicklung betrifft im Rahmen der Nutzen-Kosten-Analyse im Wesentlichen die Berechnung der Zeitkosten im Personenverkehr und Güterverkehr, der Verkehrssicherheit und der Umweltwirkungen. Als neue Komponenten wurden die Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs sowie die implizite Nutzendifferenz (zur Berücksichtigung des induzierten Verkehrs) eingeführt.

### Relevanz für das Projekt:

Die aktuelle Bewertungsmethodik der Bundesverkehrswegeplanung 2030 wird – soweit dies aufgrund der Anforderungen des Projekts sinnvoll und unter den Rahmenbedingungen (Datenverfügbarkeit, Rechenzeiten) möglich ist – angewendet.

## 4 Nachrechnungsdaten aus NRW / BAB 1

Zur Gewinnung von Erkenntnissen aus bereits erfolgten Nachrechnungen wurden durch Straßen.NRW, Betriebssitz Gelsenkirchen die Ergebnisse der Bauwerksnachrechnungen von 137 Bauwerken und Teilbauwerken im Zuge der BAB 1 (jeweils die vorliegenden Anlagen 2 und 3 zur Nachrechnung) übergeben. In den Anlagen 2 der Nachrechnungen werden die jeweiligen Ergebnisse der einzelnen Bauwerke tabellarisch und bauteilbezogen zusammengefasst. Diese entsprechen den Vorgaben der Nachrechnungsrichtlinie. Die zur Verfügung gestellten Anlagen 3 fassen verwaltungsintern die Nachrechnungsergebnisse stichpunktartig zusammen und werden ergänzt durch die Angabe ggf. erforderlicher Ertüchtigungsmaßnahmen und eine Kostenschätzung sowie Angaben zu möglichen Verkehrsführungen.

Die wesentlichen Inhalte der Anlagen 2 und 3 der jeweiligen Nachrechnungen wurden zunächst seitens der Auftragnehmer in einer Excel-Tabelle erfasst und anschließend nach verschiedenen Kriterien (Bauart, Bauweise, Baujahr, Nachrechnungsergebnis usw.) ausgewertet.

Es handelt sich um eine sehr heterogene Gesamtheit von nachgerechneten Bauwerken. Ein nennenswerter Anteil der betrachteten Gesamtbauwerke gliedert sich in mehrere Teilbauwerke. Insbesondere durch nachträgliche Fahrbahnverbreiterungen weist so ein Großteil der Brücken bis zu 3 verschiedene Baujahre auf und kombiniert verschiedene Bauweisen, statische Systeme und Querschnitte. Für die Auswertung wurden in der Konstruktion verschiedene (unterschiedliche Bauarten, statische Systeme, Baustoffe) Teilbauwerke als separate Bauwerke betrachtet. Im Gegensatz dazu wurden gleichartige Teilbauwerke, die sich z. B. nur im Baujahr unterscheiden, als ein Gesamtbauwerk erfasst und ausgewertet, wodurch sich eine Anzahl von 137 untersuchten Bauwerken ergibt.

Bei der Mehrzahl der Bauwerke (ca. 92 %) handelt es sich um Betonbrücken (Stahlbeton, Spannbeton, unbewehrter Beton z.T. in Kombination mit Mauerwerk). Im Gegensatz zur Zusammensetzung der Gesamtbrückenfläche des Bundesfernstraßennetzes nehmen die Bauwerke aus Stahlbeton hier den größten Anteil (66 % der Betonbrücken) ein. Die Spannbetonbrücken machen hingegen einen vergleichsweise geringen Anteil (29 % der Betonbrücken) aus.

Des Weiteren sind sechs Verbundbrücken, zwei bereits verdämmte Durchlässe, eine Bogenbrücke über die BAB 1, die Rheinbrücke Leverkusen und ein Bauwerk aus Stahl enthalten, wobei es sich bei letzterem um eine Stabbogenbrücke aus dem Jahre 1965 handelt.

Hinsichtlich ihres statischen Systems bzw. der Querschnitte lässt sich folgendes feststellen:

Bei 71 Bauwerken bzw. Teilbauwerken handelt es sich um Einfeldträgerbauwerke, 21 Bauwerke bzw. Teilbauwerke sind Zwei- und Mehrfeldträger aus Spannbeton. Des Weiteren gibt es 16 Rahmenbauwerke, 14 Gewölbebrücken und vier Bogenbrücken über mehrere Felder.

Von den 126 Betonbrücken wurde für 64 Bauwerke (ca. 50 %) das Ziellastniveau LM1 nachgewiesen. Weitere 2 Brücken wurden in BK60 eingestuft. Bei allen anderen Bauwerken sind Ersatzneubauten (ca. 30 %), Ertüchtigungsmaßnahmen oder Lastbeschränkungen erforderlich. Für 9 der zu ersetzenden Bauwerke ergibt sich der Neubau aus dem 6-streifigen Ausbau.

Die Empfehlung „Ersatzneubau“ wurde bei den untersuchten Spannbetonbrücken für 16 von 36 Bauwerken (ca. 44 %) und bei den Stahlbetonbrücken in 22 von 83 Fällen (ca. 27 %) gegeben. Der Anteil an Spannbetonbrücken, für die das Ziellastniveau LM1 ohne zusätzliche Ertüchtigung nachgewiesen wurde, beträgt etwa 17 % (6 von 36 Bauwerken).

Bei den Stahlbetonbrücken konnten die Nachweise für 53 von 83 (ca. 64 %) Bauwerken erfolgreich geführt werden. Bei 18 von 36 (50 %) Spannbetonbrücken wurden rechnerische Defizite festgestellt. Auffallend ist dabei, dass bei 14 Bauwerken (78 %) die Querkrafttragfähigkeit nicht nachgewiesen werden konnte. Diese Brücken wurden überwiegend vor 1979 (13 Bauwerke) erbaut. Eine Brücke mit Querkraftdefizit besitzt das Baujahr 1985.

Weiterhin wurden bei 10 von 36 (28 %) Spannbetonbrücken Ermüdungsdefizite (außerhalb von Koppelfugen) festgestellt.

Die Nachrechnungen der Stahlbetonbrücken ergaben lediglich für 10 von 83 Bauwerken (ca. 12 %) rechnerische Defizite, die hauptsächlich die Biegetragfähigkeit (7 Bauwerke) und die Ermüdung (3 Bauwerke) betreffen.

Für alle 7 untersuchten Bauwerke aus Mauerwerksbögen bzw. -gewölben konnte das Ziellastniveau LM1 nachgewiesen werden.

## 5 Fazit zur Literaturstudie

Im Ergebnis der Literaturstudie zu den baulichen Aspekten der Ertüchtigungsplanung konnte festgestellt werden, dass insbesondere zu Nachrechnungen, Verstärkungen und Ertüchtigungen von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken umfangreiche Erfahrungen und Grundlagen vorliegen.

Dabei wurde in Fischer, O. et al. (2014) [18] gezeigt, dass aufbauend auf der Nachrechnungsliste der BAST und in weitgehender Übereinstimmung mit dieser in der Regel diejenigen Bauwerke einen hohen Ertüchtigungsbedarf aufweisen, denen eine hohe Prioritätszahl im Rahmen des Priorisierungsverfahrens zugewiesen wurde.

Auch die im Auftrag der BAST durch die Ruhrberg Ingenieurgesellschaft erarbeitete Studie (vgl. [41]), in der die Nachrechnungsergebnisse zu Stahl- und Verbundbrücken ausgewertet werden, lieferte wichtige Erkenntnisse zur Bestimmung der Parameter zur baulichen Vorselektion.

Zusammenfassend ergab sich aus der Literaturstudie zu baulichen Aspekten, dass eine Zusammenführung des BAST-Priorisierungssystems mit den Auswertungsergebnissen von Nachrechnungen geeignet ist, im Rahmen der Vorselektion von Bauwerken Hinweise auf die Notwendigkeit von Ertüchtigungs- bzw. Ersatzmaßnahmen zu geben.

Für das Verfahren zur Vorselektion von Bauwerken unter verkehrlichen und gesamtwirtschaftlichen Aspekten konnte das im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens SKRIBT entwickelte und im Rahmen des EU-Projekts SeRoN sowie insbesondere des BMBF-Fördervorhabens SKRIBT-Plus weiterentwickelte Verfahren zur Bewertung der Kritikalität von Bauwerken als Basis verwendet werden. Es konnte auf die Erfahrungen im Hinblick auf die modellseitige Abbildung von Bauwerks(teil)ausfällen und deren verkehrlichen Auswirkungen auf Basis von PTV Visum und PTV Validate zurückgegriffen werden. Darüber hinaus konnte das entwickelte Bewertungsverfahren als Ausgangsbasis für die Projektarbeiten genutzt werden.

Erkenntnisse zur Ermittlung und Bewertung verkehrlicher Wirkungen größerer Maßnahmen an Bauwerken lieferte das BMVI-Vorhaben „Entwicklung von Bewertungskriterien und einer Optimierungsstrategie zur Priorisierung voneinander abhängiger Bauprojekte an Straßen- und Ingenieurbauwerken“. Diese Erkenntnisse konnten im Hinblick auf die Ermittlung einer Methodik zur

Reihung von Ertüchtigungsoptionen unter baulichen und gesamtwirtschaftlichen Aspekten genutzt werden.

Es standen also insgesamt eine Reihe von Verfahren und methodischen Erkenntnissen, die im Rahmen anderer Fragestellungen entwickelt wurden, zur Verfügung, die für die vorliegende Problematik der Ertüchtigungsplanung genutzt und weiterentwickelt werden konnten. Insbesondere die Optimierung von Maßnahmenoptionen und Durchführungszeitpunkten in einem Teilnetz ohne Berücksichtigung von Budgetrestriktionen und die Betrachtung der parallelen Maßnahmendurchführung an mehreren Bauwerken erforderte jedoch sowohl die Neuentwicklung eines Optimierungsverfahrens als auch die Erarbeitung eines neuen methodischen Ansatzes im Hinblick auf die durchzuführenden verkehrsmodellgestützten Analysen.

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 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**

Lebhardt, Seiler, Gerdas € 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.

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

Staeck, Eilers € 15,50

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

Rill

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

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

Neumann, Brauer

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

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

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rade-  
macher, Ungermann

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

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

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

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

**B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfas-  
sung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträ-  
gern mit Ultraschallsensoren**

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

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

**B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelin-  
nenschalen aus Stahlbeton**

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

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

## 2022

**B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen**

Dudenhöfer, Rückert

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

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

Purtak, Möbius

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

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

Staeck

€ 15,00

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

Freundt, Böning, Fischer, Lau

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

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

Windmann

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

**B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für  
die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutsch-  
land**

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

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

**B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktio-  
nen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung**

Schreck, Decker, Wawrzyniak

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

**B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten**

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

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

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

Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer

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

**B 183: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Über-  
prüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen**

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brennerberger, Zulauf,

Locher

€ 18,00

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

Kindl, Stadler, Walther, Bornmann, Freitag

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

---

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 Web-  
site finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

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