

Lebenszykluskosten- bewertung von Schutzeinrichtungen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 341

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Lebenszykluskosten- bewertung von Schutzeinrichtungen

von

Stefan Eckert
Aline Hendrich
Stefan Horlacher

thinkstep AG
Leinfelden-Echterdingen

Thorsten Kathmann
Christian Scotti
Emanuel von Heel

DTV-Verkehrsconsult GmbH
Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 341

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 03.0512
Lebenszykluskostenbewertung von Schutzzeineinrichtungen

Fachbetreuung
Susanne Schmitz

Referat
Straßenausstattung

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

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

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-572-9

Bergisch Gladbach, April 2021

Kurzfassung – Abstract

Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen

Mittels einer Lebenszykluskostenanalyse (LCC) wurde eine ökonomische Bewertung von Schutzeinrichtungen durchgeführt. Als funktionale Einheit wurde ein 1,0 km langer Abschnitt einer Schutzeinrichtung der Aufhaltestufe H2 aus Standardelementen an einer Autobahn im Mittelstreifen einer Richtungsfahrbahn definiert. Der Betrachtungszeitraum von 25 Jahren umfasst folgende Lebenszyklusphasen:

- Investition: Ausschreibung, Planung und Beauftragung sowie Herstellung und Errichtung,
- Nutzungsphase über Lebensdauer,
- Kosten am Lebensende: Abriss, Rückbau und Entsorgung.

Anhand einer Literaturrecherche, einer Datenerhebung bei Interessensvertretern und beteiligten Akteuren sowie in diversen Expertengesprächen wurden die relevanten Kostenarten sowie deren Höhe für die beispielhaft ausgewählten Systeme ermittelt. Zur einheitlichen Kostenbewertung wurde das Bezugsjahr 2018 definiert und der Nettobarwert bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Investitionen den größten Anteil an den Lebenszykluskosten ausmachen, während die Nutzungskosten weniger relevant sind. Sie sind nur bei freier Strecke wesentlich (> 5 % der Lebenszykluskosten) und werden von den Grünpflegekosten dominiert. Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen erwiesen sich die Ergebnisse als robust. Die Kosten am Lebensende sowie deren Sensitivität schwanken zwischen den Systemen und sollten deshalb immer fallspezifisch berücksichtigt werden.

Zur überschlägigen Abschätzung der Wesentlichkeit der Nutzungskosten gilt: Betragen die jährlichen Nutzungskosten > 0,27 % der Baukosten, sind diese wesentlich (> 5 %). Zur Erstellung einer LCC können die fallspezifischen Randbedingungen in einen Excel-Rechner frei eingegeben werden.

Die Studie identifizierte weiteren Forschungsbedarf hauptsächlich bezüglich einzelner noch nicht ausreichend quantifizierter Kostenarten u. a. auch für

die Aufstellung im Seitenstreifen sowie der Einbezug von externen Umweltkosten wie z. B. Kosten für CO_{2e}-Emissionen.

Life cycle cost analysis of protective devices

By means of a life-cycle cost analysis (LCC), an economic evaluation of protective devices was carried out. As a functional unit, a 1.0 km long section of a protective device of containment level H2 was defined from standard elements in the medial strip of a freeway. The observation period of 25 years includes the following lifecycle phases:

- Investment: tendering, planning and commissioning as well as manufacturing and construction,
- use phase over the lifetime,
- costs at the end of life: demolition, dismantling and disposal.

With the help of a literature search, a data collection together with stakeholder and various expert discussions, the relevant cost types as well as their value for the selected exemplary systems were determined. To make the cost data comparable, the reference year 2018 was defined. The economic evaluation of the protection facilities was based on the net present value of the resulting life cycle costs.

The results show that investment accounts for the largest share of life-cycle costs, while usage costs play a minor role. The latter are only relevant for open tracks (> 5 %) and are dominated by green maintenance costs. The sensitivity analyses proved that the results are robust. The end-of-life costs and their sensitivity vary between the protective devices and should therefore always be considered on a case-specific basis.

The following rule can be used to roughly estimate the materiality of the usage costs: If the annual usage costs are > 0.27 % of the construction costs, they are significant (> 5 %). To estimate a case-specific LCC, the boundary conditions can be freely entered in the Excel calculator provided.

The study identified further research needs, mainly regarding individual yet insufficiently quantified cost types beside others for the installation of the protection device in the hard shoulder. Also, the internalization of external environmental costs such as costs for CO_{2e} emissions is recommended.

Summary

Life cycle cost analysis of protective devices

1 Goal of the research project

For a comprehensive cost comparison of protective devices (PD), due to their long service life and its consecutive cost elements it is often not enough to consider only the investments. Rather, according to the criteria for a sustainable assessment, it is necessary to look at the entire lifecycle to determine the total cost “from cradle to grave”.

Life Cycle Costing (LCC) was chosen as the method for economic assessment over the entire life cycle. The LCC enables the economic optimization of the overall effects of (construction) measures in the long term. It also considers the costs of use and dismantling.

The aim of the research project was to use the LCC method to investigate the relevant cost components, their magnitude and impacts on the life cycle costs of protective devices. Based on the results, the applicability and significance of the LCC method were examined relating to the economic evaluation of protective equipment systems. The project focused on the question, which cost components prove to be relevant, under which conditions and should therefore be considered in a cost comparison of different systems.

Based on the results, simplified approaches had been developed, which allow a practical application of LCC of protective devices. This was done in the form of an Excel based calculator, which allows to obtain a measure-related and site-specific LCC result by entering individual parameters.

The results help also to understand the costs of the systems, which arise over the entire life cycle and to consider them already in the planning phase of protective devices.

2 Methodology

The research design was firstly based on a literature review. This review analyzed, in which of the previous applications LCC was used in building projects in general and in protective equipment in particular in order to gain an overview of the methodological approaches and the relevant cost types. In the course of the project, a data collection and expert discussions further developed and completed these. The functional unit for the assessment was defined as “a 1.0 km road section of a protective device of containment level H2 from standard elements on a freeway in the median strip of a driving lane”.

The period of consideration for determining the life cycle costs of vehicle restraint systems was estimated with 25 years and includes:

- The period until the protective device is put into operation. These include the tendering, planning and commissioning as well as the production and construction of the systems,
- the use of the systems over their lifetime and
- the phase of demolition, dismantling and disposal.

To determine the vehicle restraint systems used in practice and the associated costs, data was collected from stakeholders in 2018. The year 2018 was used as a reference year to allow a uniform assessment of different cost figures.

The calculation method for the LCC was based on the net present value method. The net present value for a considered investment object is the sum of the investment (initial payout) and the present value of the associated future payment series. The payments incurred over the useful life are discounted at the time of the investment. The amount of the net present value represents a measure of the profitability of an investment and, thus, makes various investment options comparable according to different follow-up costs. Table 1 gives an overview of the costs used for the LCC of the protective devices.

Installation location	Designation of the protective device	Costs for the reference year 2018						
		Investment		Usage costs			External costs	End-of-life costs
		Construction costs €/km	Tendering, planning and commissioning €/km	Sweeping €/km ^a	Green maintenance costs €/km ^a	Repair costs after accidents ¹ €/km ^a	Environmental costs ² €/km	Dismantling €/km
Open track	PD 1	86,590	5,195	0	1,000	122	9,949	-10,000
	PD 2	51,590	3,095	0	1,000	91	9,949	-6,000
	PD 3	102,180	6,131	95	500	175	23,578	28,800
	PD 4	67,260	4,036	95	500	74	19,766	14,000
Building section	PD 5	145,000	6,815	0	-	154	9,949	-8,000
	PD 6	170,000	7,990	95	-	212	23,578	29,150
	PD 7	205,071	9,638	95	-	74	19,766	14,000
Cramped conditions	PD 8	110,000	6,600	0	-	128	9,949	-8,000
	PD 9	130,000	7,800	95	-	51	23,578	33,030
	PD 10	84,000	5,040	95	-	74	19,766	14,000

¹ Passenger car and heavy load accidents, only accidents with unknown causer (20%)
² Environmental costs of construction and end of life

Tab. 1: Overview of the costs used in the LCC of the investigated protective devices

3 Results

In order to simplify the LCC analysis and, thus, increase its applicability in practice, the calculation shall be limited to the essential costs. To that end, the following materiality criteria were defined:

- If a single cost element has a share of < 1% of the life cycle costs for all systems of a location, this cost element can be neglected.
- If a cost category (initial investment, total cost of use, end-of-life costs) has a total of < 5% of the life-cycle costs for all the systems of a location, this cost category can be neglected.

Figure 1 shows the results of the LCC including all basic data. The application of the materiality criteria allows to neglect the usage costs for the installation locations of building sections and cramped conditions.

Figure 2 depicts the relevant components of the cost of use for the installation location of the open track. Green maintenance costs, which only apply at this place of installation, account for the largest share with at least 82% of usage costs.

To quickly estimate the extent to which the costs of use for a protective device are to be regarded as significant, figure 3 can be used. The graph shows

that utilization costs of up to 0.27% of the initial investment account for < 5% of life cycle costs. That is shown by the green horizontal line. With an initial investment of € 100,000, the annual cost of use would therefore have to exceed € 270/a to be substantial. The two boxes symbolize that the group of open track devices are all placed above the 5% line and the two other groups, i. e. building section and cramped conditions, are all lower.

In addition, external costs were considered. These consist of two main parts: the environmental costs of manufacturing the systems relating to global warming potential and the costs of repairing accidents, after which the originator is known and which will be paid by the insurance. If these costs are considered, lifecycle costs increase by 10% to 23% compared to those shown in figure 1.

To check the results, the following parameters were subjected to a sensitivity analysis:

- discount rate,
- inflation rate,
- annual usage costs,
- external costs and
- costs for demolition, dismantling and disposal.

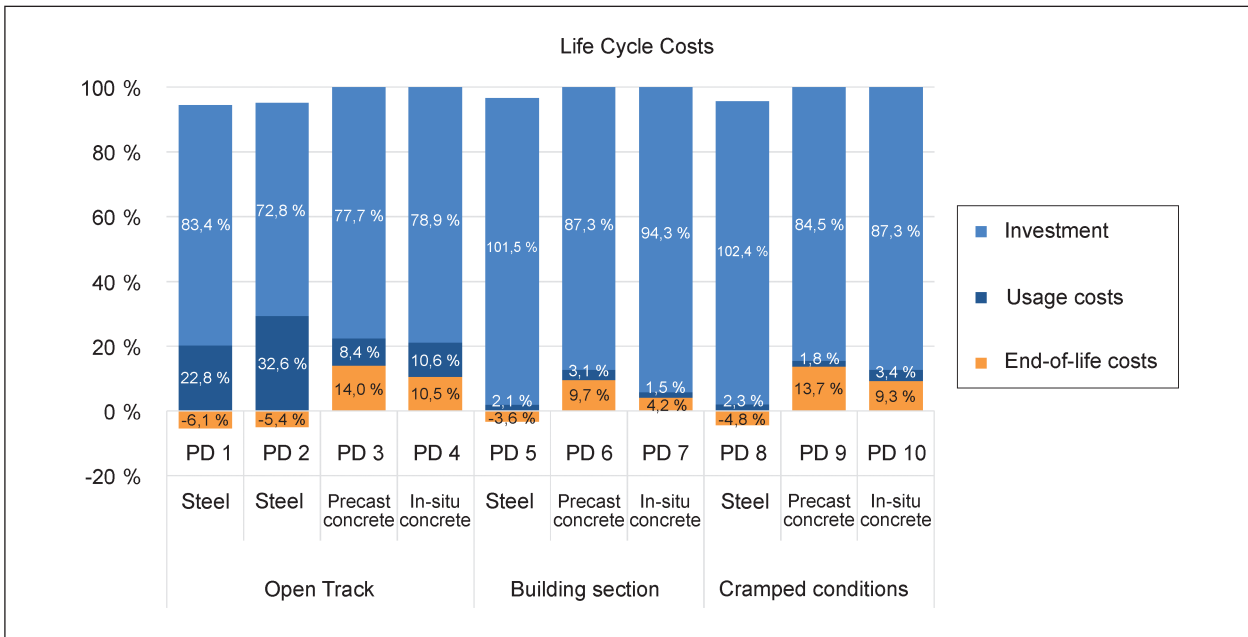


Fig. 1: Results of the life cycle cost analysis

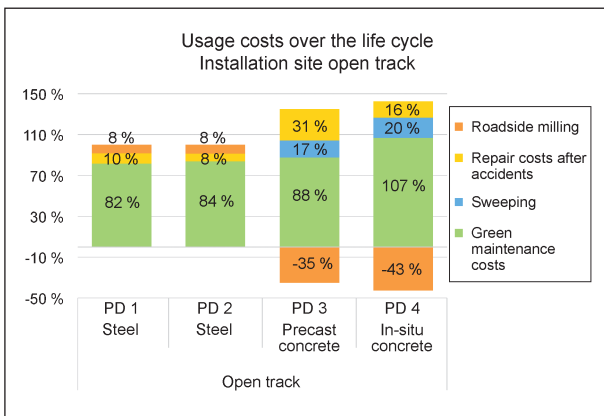


Fig. 2: Usage costs installation site open track (relative shares)

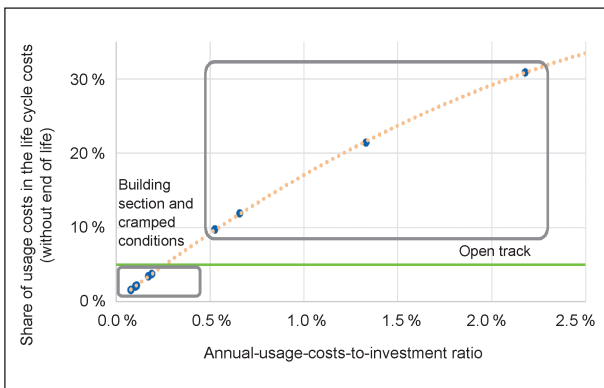


Fig. 3: Relationship between usage costs and investment

For the first three variables, it was checked whether a variation of the influencing parameters increases the cost of use in such a way that the 5% essential criterion for the costs of use at the construction sites

and confined conditions is exceeded, or undershoot for free locations, respectively. The analyzes showed that the variation of the first two parameters only leads to a minimal exceedance (5.2%) of the materiality criterion in extreme cases (0.0% discounting and 5.2% price increase). Thus, the results prove to be robust. Doubling the annual cost of use, on the other hand, leads to the materiality criterion being exceeded in two of the three systems considered at construction sites and confined conditions. Therefore, the costs of use should always be subject to a materiality test under the specific circumstances of the individual case.

The sensitivity of the external costs for global warming potential was checked in accordance with the recommendation of the UBA method convention 3.0, i. e. by applying 640 €/t instead of 180 €/t as initially applied. If they are internalized, they would account for 25% to 46% of the total cost.

Further, if the impact of demolition, dismantling and end-of-life disposal costs are doubled or halved, the overall result would change significantly, which is why these costs must always be considered in an LCC.

Within this study, a user-friendly Excel calculator has been developed to put the simplified LCC approach into practice. The default values are the values determined in this study. However, the user can consider site-specific features by adjusting the default values and overriding them with his own

values. Based on the information provided, the life cycle costs are calculated automatically and illustrated in figures. The most cost-effective system and its costs are explicitly identified as a result.

The following insights into lifecycle costs of protective devices were summarized:

1. For all systems investigated, the investment at the beginning (construction cost as well as costs of tendering, planning and commissioning) accounts for the largest share of life-cycle costs.
2. The usage costs play a minor role. If there is green space, as it is the case for open track sections, green maintenance costs account for the largest part of the costs of use. They exceed the materiality threshold of 5%.
3. If external costs are internalized (environmental cost of manufacture and cost for repair after accidents with known originator), lifecycle costs increase by 10% to 23%.
4. Within the sensitivity analyses, the results proved to be robust within the chosen limits. Only the increase of the issue price to € 640/t CO_{2e} according to (MATTHEY & BÜNGER, 2018)¹ leads to a significant increase in the results.
5. When deciding in a specific application, the boundary conditions of the respective construction measure are a decisive factor. An example is a special planting of the green area and thus more frequent or more complex green maintenance and consequently higher costs. To determine their effects on the life cycle costs, the action-specific boundary conditions can be entered specifically in the Excel calculator.
2. Further analysis of the costs for tendering, planning and commissioning, which are estimated in the present study based on the HOAI.
3. Determination of the theoretical value of green maintenance in the median strip without protective equipment, since the costs of green maintenance are probably overestimated in this study.
4. Exact determination of the costs for roadside milling. They have been roughly estimated and the disposal of the road side material has not been included in the costs.
5. Annual administration costs are currently not considered due to lack of data. They could be determined and be included in the calculations.
6. Consideration of the life-cycle costs of protective devices on the hard shoulder, since the present study limits itself to the installation in the median strip.
7. Further investigation of external costs is recommended relating to individual CO_{2e} factors per type and specification of a protective device as well as alternative CO_{2e}-related cost values. Beyond this, an extension of the internalization of external cost is thinkable towards other environmental indicators such as acidification, eutrophication and summer smog.

4 Further research needs

The following research needs have been identified:

1. Investigation and aggregation of the data basis of further operational activities (e. g. winter service, drainage).

¹ MATTHEY, A. & BÜNGER, B. (2018): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze, Dessau Roßlau: Federal Environment Agency

Inhalt

1	Einleitung und Zielstellung	11	5	Festlegung der Grundlagendaten	32
2	Literaturrecherche	12	5.1	Ökonomische Parameter	33
2.1	Begrifflichkeiten	12	5.2	Bau	33
2.1.1	Total Cost of Ownership (TCO)	12	5.3	Ausschreibung, Planung und Beauftragung	33
2.1.2	Externe Kosten	12	5.4	Inspektion	34
2.1.3	Whole Life Costing (WLC)	13	5.5	Kehren	35
2.2	Normen, Richtlinien und Leitfäden zur LCC im Bausektor	14	5.6	Entwässerung	35
2.2.1	DIN EN 16627	14	5.7	Grünpflege	35
2.2.2	ISO 15686-5	15	5.8	Bankettschalen	36
2.2.3	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeits- untersuchungen an Straßen (EWS)	15	5.9	Winterdienst	36
2.2.4	BMUB Leitfaden und BNB Steckbrief	15	5.10	Verwaltung	37
2.2.5	DGNB System	16	5.11	Reparatur nach Unfällen	37
2.2.6	Zwischenfazit	16	5.12	Fahrzeitverlängerung aufgrund Reparaturen	39
2.3	Kostenbewertung im Bausektor	17	5.13	Umweltwirkungen	39
2.4	Kostenbewertung von Schutzein- richtungen	18	5.14	Abriss, Rückbau und Entsorgung	41
3	LCC-Untersuchungsdesign	23	5.15	Zusammenfassung der Grund- lagendaten	41
3.1	Funktionale Einheit	24	6	LCC-Berechnungen	42
3.2	Betrachtungszeitraum und Bezugs- jahr	25	6.1	Bestimmung der wesentlichen Kosten	43
3.3	Systemgrenzen (Kostenarten)	25	6.2	Ergebnisse der vereinfachten Berechnungen	44
3.4	Berechnungsmethode	27	6.2.1	Aufstellort freie Strecke	44
3.5	Anwendungsbereich (untersuchte Systeme)	28	6.2.2	Aufstellort Bauwerk	45
3.5.1	Untersuchte Systeme für die Daten- erhebung	28	6.2.3	Aufstellort beengte Verhältnisse	45
3.5.2	Untersuchte Systeme für die Lebenszykluskostenberechnung	29	6.3	Externe Kosten	46
4	Datenerhebung	30	6.4	Sensitivitätsanalysen	46
4.1	Verwendete Fragebogen	30	6.4.1	Diskontierungsrate	46
4.2	Umfang der Datenerhebung	31	6.4.2	Preissteigerungsrate	47
4.3	Auswertung	32	6.4.3	Jährliche Nutzungskosten	47
4.4	Einzelinterviews	32	6.4.4	Externe Kosten	48
			6.4.5	Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung	48

6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse . . .	49
6.6	Weiterer Forschungsbedarf	49
7	Excel-Rechner zur praktischen Anwendung der LCC	50
	Literatur	53
	Bilder	55
	Tabellen	56
	Anhang	57
1	Zusammenfassung der Literatur- recherche	57
2	Auswertetabellen der Daten- erhebung	61
3	Dokumentation des Workshops	64

Das Excel-Tool „LCC von Schutzeinrichtungen“ ist über das elektronische BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung und Zielstellung

Schutzeinrichtungen gehören zu den Fahrzeug-Rückhaltesystemen und werden seit fast 60 Jahren aus den Gründen der passiven Sicherheit eingesetzt, um im Fall des Abkommens eines Fahrzeuges von der Fahrbahn die Unfallfolgen so gering wie möglich zu halten. Bei der Entscheidung für ein Fahrzeug-Rückhaltesystem spielen neben den Leistungsmerkmalen die Kosten eine entscheidende Rolle und so wird der Auftrag dem Angebot mit dem niedrigsten Preis erteilt.

Aufgrund der langen Lebensdauer der Systeme ist dabei zu prüfen, ob und welche Betriebskosten neben den Investitionen ebenfalls einen relevanten Einfluss haben. Für einen umfassenden Kostenvergleich, der den Kriterien einer nachhaltigen Bewertung entspricht, ist es notwendig, den gesamten Lebenszyklus zu betrachten. So können die Gesamtkosten des Systems „von der Wiege bis zur Bahre“ ermittelt werden, d. h. sämtliche Kosten beginnend mit der Planung über die Anschaffung und Errichtung, der Nutzung bis hin zur Entsorgung am Lebensende.

Als Methode für die ökonomische Bewertung über den Lebenszyklus hat sich die Lebenszykluskostenanalyse (engl.: Life Cycle Costing, LCC) etabliert.¹ Die LCC ermöglicht die ökonomische Optimierung der Gesamtauswirkungen von (Bau-)Maßnahmen auf lange Sicht, während andere Kostenanalysen lediglich die Baukosten (Investitionen) einer Einzelmaßnahme betrachten und daher in der Regel die Herstellungskosten minimieren, ohne den Blick auf z. B. Wartungs- und Instandhaltungskosten zu lenken (FISCHER et al., 2016b).

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, mithilfe der LCC-Methode die relevanten Kostenkomponenten, deren Größenordnung und Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten von Schutzeinrichtungen zu untersuchen. Anhand der Ergebnisse soll die Anwendbarkeit und Aussagekraft der LCC-Methode für die ökonomische Bewertung von Schutzeinrichtungssystemen überprüft werden. Insbesondere soll geklärt werden, welche Kostenkomponenten sich unter welchen Bedingungen als relevant erwei-

sen und bei einem Kostenvergleich verschiedener Systeme berücksichtigt werden sollten.

Anhand der Ergebnisse sollen vereinfachte Ansätze entwickelt werden, die eine praxisnahe Anwendung der Lebenszykluskostenberechnung von Schutzeinrichtungen ermöglichen. Dies soll z. B. in Form eines Excel-Rechentools erfolgen, welches es ermöglicht, durch die Eingabe individueller Parameter ein maßnahmenbezogenes und standort-spezifisches LCC-Ergebnis zu ermitteln.

Das Forschungsvorhaben richtet sich insbesondere an Stellen, die sich mit der Ausschreibung, Planung und Beauftragung, dem Bau sowie dem Betrieb von Schutzeinrichtungen befassen. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, bereits in der Planungsphase von Schutzeinrichtungen die über den gesamten Lebenszyklus anfallenden und relevanten Kosten der Systeme zu berücksichtigen.

Das Projekt wurde im Rahmen eines forschungsbegleitenden Ausschusses von Fachexperten begleitet, die das Projekt in vielfacher Weise unterstützten und deren Expertise und Hintergrundwissen in die Projektergebnisse eingingen.

Aufbau der Studie

Nach der Darstellung der Zielsetzung im anschließenden Kapitel 2 werden nach der Klärung der Begrifflichkeiten zunächst verschiedene Regelwerke analysiert, die Angaben für eine Kostenbewertung über den Lebenszyklus enthalten. Weiterhin wird ein Überblick über bestehende Ansätze zu Kostenuntersuchungen im Bausektor allgemein und speziell bei Fahrzeug-Rückhaltesystemen gegeben.

Aufbauend auf der Literaturlauswertung werden in Kapitel 3 die für die vorliegende Untersuchung angewendete Methode und das Untersuchungsdesign konkretisiert und die prinzipiell relevanten Eingangsgrößen für die Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen festgelegt.

Zur Ermittlung möglichst spezifischer Daten wurde für eine Auswahl an beispielhaft zu untersuchenden Systemen eine umfangreiche Datenerhebung zu den verfügbaren Eingangsparametern und Kosten durchgeführt und spezifische Fragen zudem in mehreren Einzelinterviews erörtert (Kapitel 3.5.2).

Die Ergebnisse der Datenerhebung bilden zusammen mit den Angaben der Fachexperten und ergänzenden Literaturangaben die Grundlage für die in

¹ Für weitere gebräuchlichen Methoden zur Analyse der Lebenszykluskosten und deren Abgrenzung zur LCC siehe Kapitel 2.1.

Kapitel 5 vorgenommene Festlegung der Grundlagendaten.

Mithilfe der so festgelegten Eingangsparameter werden in Kapitel 6 für ausgewählte Schutzeinrichtungen Lebenszykluskostenanalysen durchgeführt. Anhand der Ergebnisse werden die wesentlichen Parameter identifiziert und daraus ein vereinfachter Ansatz zur Bestimmung der Lebenszykluskosten von Schutzeinrichtungen abgeleitet. Der vorgenommene Berechnungsansatz wird noch mittels Sensitivitätsanalysen auf seine Robustheit überprüft.

Die angewendete Methodik, die ausgewählten Kostenkomponenten, die verfügbaren Daten und die vorläufigen Ergebnisse der Berechnungen wurden in ihrer Gesamtheit bei einem Experten-Workshop vorgestellt und diskutiert. Im Nachgang des Workshops wurden nochmals Änderungen an den Eingangsdaten vorgenommen und die Berechnung der Lebenszykluskosten aktualisiert. Dies ist in der vorliegenden Schlussfassung dieses Berichts in den jeweiligen Kapiteln berücksichtigt. Die Dokumentation des Workshops findet sich im Anhang.

In Kapitel 7 wird schließlich der entwickelte Excel-Rechner zur praxisnahen Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen dargestellt.

2 Literaturrecherche

Während das Grundprinzip der LCC (Kostenanalyse über den Lebenszyklus) weithin anerkannt ist, existiert keine einheitliche Definition zu Umfang und Durchführung einer LCC. Es gibt für ihre Ausgestaltung und Umsetzung inzwischen zahlreiche Vorschriften und Leitfäden, die sich auf verschiedene Anwendungen und Produkte beziehen und sich hinsichtlich der zu berücksichtigenden Lebenszyklusphasen sowie der jeweils betrachteten Kostenarten zum Teil erheblich unterscheiden.

Im Rahmen der Literaturstudie werden zunächst verschiedene LCC-Ansätze gegenübergestellt. Um eine möglichst gute Anwendbarkeit auf Fahrzeug-Rückhaltesysteme zu ermöglichen, wurde die Recherche auf Veröffentlichungen mit Bezug zum Bauwesen fokussiert. In Kapitel 2.2 werden verschiedene Normen, Richtlinien und Leitfäden zur LCC-Anwendung im Baubereich hinsichtlich der verwendeten LCC-Methodik und berücksichtigten Eingangsgrößen verglichen. Anschließend werden in Kapitel 2.3 einige Beispiele für LCC-Ansätze im

Bauwesen vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die methodischen und praktischen Schwierigkeiten eingegangen, die sich bei der konkreten Anwendung ergeben können. Schließlich werden in Kapitel 2.4 einige grundlegende Veröffentlichungen, die sich speziell auf die Wirtschaftlichkeitsbewertung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen beziehen, diskutiert. Hierbei werden sowohl Veröffentlichungen ausgewertet, die Berechnungen der Wirtschaftlichkeit enthalten, als auch solche, in denen lediglich grundsätzlich Kriterien für die Bewertung genannt und untersucht werden.

2.1 Begrifflichkeiten

2.1.1 Total Cost of Ownership (TCO)

Neben der LCC findet sich in der Literatur auch der Begriff Total Cost of Ownership (TCO) als Kostenbewertungsverfahren über den Lebenszyklus. Der Begriff TCO entstand 1987 im IT-Bereich, als die Beratungsfirma Gartner für Microsoft ein Vorgehen zum Kostenvergleich für einen Arbeitsplatzrechner mit einer Terminal-Lösung entwickelte (MIERITZ & KIRWIN, 2005). TCO und LCC werden als Begriffe häufig vermischt und methodisch nicht sauber abgegrenzt. Zum Teil werden TCO-Modelle dahingehend unterschieden, dass sie im Gegensatz zu LCC-Modellen die Transaktionskosten einer Anschaffung (wie z. B. Kosten für Informationsbeschaffung, Verhandlungen, Abwicklung, Leistungskontrolle) berücksichtigen. TCO-Ansätze werden danach bei kleineren Anschaffungen (Verbrauchsgegenstände, Komponenten etc.) verwendet, bei denen die Transaktionskosten im Vergleich zum Investitionsvolumen eine größere Bedeutung haben (Haufe-Lexware, 2017). Mit der Einbeziehung der „Kosten im Zusammenhang mit Tätigkeiten beim Kauf eines Grundstücks“ in der DIN EN 16627 lässt sich diese Abgrenzung jedoch nicht aufrechterhalten, sodass keine klare Trennung zwischen TCO und LCC vorgenommen werden kann. Im Weiteren wird daher unabhängig von den betrachteten Kostenarten durchgängig der Begriff LCC verwendet.

2.1.2 Externe Kosten

Eine wichtige Kostenart, die in unterschiedlichem Maße berücksichtigt wird, sind externe Kosten (Externalitäten). Externe Kosten bezeichnen (in der Regel volkswirtschaftliche) Kosten, die nicht durch die finanzielle Transaktion zwischen Anbieter und

Nutzer abgedeckt werden (ISO 15686-5; ZINKE, 2016). Da mit ihnen keine Zahlungen verbunden sind, werden sie häufig nicht bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt.

Externe Kosten können in allen Lebenszyklusphasen auftreten und beinhalten z. B. Kosten durch Fahrzeitverlängerung. Diese können z. B. während Reparaturmaßnahmen an der Schutzeinrichtung durch Eingriffe in den Verkehr wie die Teil- oder Vollsperrung von Fahrbahnen entstehen. Dies führt zu einer Verringerung der Verkehrsgeschwindigkeit oder der Verursachung von Mehrkilometern durch eine Umfahrung. In beiden Fällen entstehen Fahrzeitverlängerungen und damit Zeitverluste für die Insassen, die volkswirtschaftlich bewertet werden können (FISCHER et al., 2016b; ZINKE, 2016). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, externe Kosten aus der kostenbewerteten Differenz zum Normalbetrieb der entsprechenden Verkehrsinfrastruktur zu ermitteln (KUHLMANN et al., 2015).

Häufig ist die Quantifizierung der externen Effekte und deren Monetarisierung mit hohen Unsicherheiten verbunden. So kommt MIELECKE et al. (2016a) zu dem Schluss, dass die Kosten durch Fahrzeitverlängerungen in hohem Maße von spezifischen Randbedingungen wie z. B. dem durchschnittlichen täglichen Verkehr oder der Länge möglicher Umleitungsstrecken beeinflusst wird. Zudem sind nach MIELECKE et al. (2016b) Verkehrsprognosen mit hoher Unsicherheit behaftet und nur für einen maximalen Zeitraum von 15 Jahren möglich, während die Nutzungsdauer von Schutzeinrichtungen mit mindestens 25 Jahren angesetzt werden kann. FISCHER et al. (2016b) stellen fest, dass derartige Kosten nur insofern berücksichtigt wurden, als bei Bauarbeiten die alternative Verkehrsführung möglichst günstig gewählt und die Dauer der Bauarbeiten minimiert wurden.

Weitere externe Kosten sind z. B. die Kosten von Umweltwirkungen, die über den Lebenszyklus der Schutzeinrichtungen entstehen. Diese entstehen bei der Herstellung der Materialien, aber auch bei Errichtung und Reparatur der Systeme sowie allen Prozessen während der Nutzungsdauer, die der Schutzeinrichtung zuzuordnen sind.

Nach CONELL et al. (2008) sind weitere Beispiele für externe Lebenszykluskosten:

- Das Recycling der Materialien am Ende der Lebensdauer,

- die Umweltverschmutzung durch Metalle, Hydrocarbonate, Salze und Nährstoffe sowie mikrobiologische Abfälle,
- die Auswirkungen der Stahlherstellung für Schutzeinrichtungen aus Stahl und der Bewehrungsstähle im Beton,
- die Inanspruchnahme von Fläche und
- die Wirkung der Schutzeinrichtung als Barriere für wildlebende Tiere.

Sofern externe Kosten in die LCC eingehen, sind sie nach ISO 15686-5 explizit als solche auszuweisen und getrennt von den anderen Kosten anzugeben. Ihre Betrachtung ist für den Entscheider dennoch relevant, da diese z. B. durch gesetzliche Regelungen in Form von Emissionsabgaben internalisiert werden können.

2.1.3 Whole Life Costing (WLC)

Der Begriff Whole Life Costing ist ein Begriff, der im Rahmen einer LCC systematisch alle Kosten und Nutzen über den Zeitraum der Lebenszykluskostenanalyse inkludiert. Er bezeichnet damit eine erweiterte LCC-Methode, die über den üblichen Betrachtungsumfang hinausgeht.

Die ISO 15686-5 enthält dies als Option „whole-life cost“ (WLC). Bei der WLC-Methode nach dieser internationalen Norm werden zusätzlich zu den während des Betrachtungszeitraums verzeichneten Einnahmen weiterhin nicht-baubezogene Kosten (wie z. B. Steuern, Anwenderunterstützung oder vorbereitende Arbeiten auf der Baufläche) sowie externe Kosten berücksichtigt.

Analog dazu enthält die DIN EN 16627 ein Modul D, das formal nicht mehr zum Lebenszyklus des Gebäudes gehört. In diesem Modul werden Gutschriften für die Wiederverwendung von Materialien oder die Energierückgewinnung erfasst. Die Berücksichtigung gewisser negativer Kosten ist gemäß der DIN EN 16627 in der LCC möglich. Werden jedoch nicht nur Kosten, sondern neben Ausgaben auch Einnahmen einbezogen, spricht die Norm von „Lebenszykluskosten im weiteren Sinne“ bzw. „Whole Life Costing“ (WLC) zur Beurteilung des Lebenszykluskostenenerfolgs.

Es ist festzuhalten, dass der WLC-Ansatz in der ISO-Norm wie auch in der DIN EN 16627 explizit als Erweiterung der LCC genannt wird, wobei sich die

jeweils zu berücksichtigenden Kostenarten unterscheiden. Darüber hinaus bezeichnet z. B. der BMUB-Leitfaden (BMUB, 2016) ausschließlich Umweltkosten als externe Kosten, während die ISO-Norm diese im WLC-Ansatz der ISO-Norm berücksichtigt. Eine klare Abgrenzung zwischen LCC und WLC ist daher weder methodisch noch inhaltlich möglich, weshalb im Weiteren unabhängig von den betrachteten Kostenarten und deren Zuordnung von LCC gesprochen wird.

2.2 Normen, Richtlinien und Leitfäden zur LCC im Bausektor

In diesem Kapitel wird ein Überblick über Richtlinien und Anwendungsleitfäden gegeben, die den Einsatz der LCC im Bauwesen thematisieren. Entsprechende Vorgaben finden sich dabei bislang ausschließlich für Gebäude bzw. Bauwerke, wobei in Deutschland inzwischen mehrere Normen sowie Leitfäden mit ebenfalls stark normierendem Charakter zur LCC bei Bauwerken veröffentlicht wurden. Auf internationaler Ebene ist hier die ISO 15686-5 relevant. Zusätzlich werden die „Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen“ (FGSV, 1997a) in die Betrachtung einbezogen, die sich allerdings nicht auf eine LCC, sondern auf eine Kosten-Nutzen-Analyse beziehen. Thematisch weist diese Referenz jedoch die größte Nähe zu den Schutzzeiteinrichtungen auf und berücksichtigt zudem zahlreiche Kostenarten, die auch zur Berechnung der Lebenszykluskosten herangezogen werden. Folgende Dokumente wurden betrachtet:

- DIN 16627 Nachhaltigkeit von Bauwerken: Bewertung der ökonomischen Qualität von Gebäuden. Berechnungsmethoden
- ISO 15686-5 Hochbau und Bauwerke: Planung der Lebensdauer Teil 5: Kostenberechnung
- EWS Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen
- BNB Steckbrief 2.1.1 für Büro- und Verwaltungsgebäude: Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus
- BMUB Leitfaden Nachhaltiges Bauen: Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben
- DGNB-System Kriterienkatalog Neubau „Ökonomische Qualität“ ECO1.1

Grundsätzlich wird für die Bestimmung der anzusetzenden Kostenarten der Lebenszyklus in verschiedene Phasen entlang der Zeitachse eingeteilt. Dabei werden in der Regel die Phasen Herstellung und Errichtung, Nutzung, sowie Abriss und Entsorgung bzw. allgemein das Lebensende (End-of-Life) unterschieden.

2.2.1 DIN EN 16627

Die ausführlichste deutschsprachige Norm für die Berechnung von Lebenszykluskosten ist die DIN EN 16627. Sie befasst sich mit Berechnungsmethoden zur Bewertung der ökonomischen Qualität von Gebäuden. Hier finden sich ebenfalls die drei Hauptphasen wieder, die in verschiedene Prozesse bzw. Kosten weiter untergliedert sind, wie in Bild 2-1 dargestellt ist.

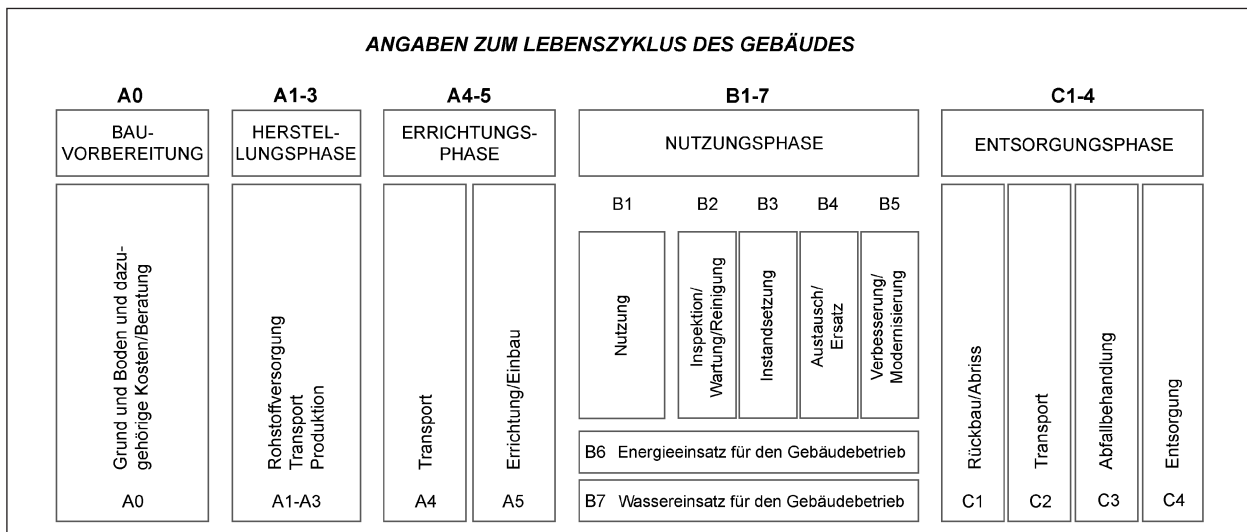


Bild 2-1: Lebenszyklusphasen und kostenrelevante Prozesse der DIN EN 16627

Die Herstellung (A1-3) und Errichtung (A4-5) wird hier um die Bauvorbereitung (A0) ergänzt, in der Kosten wie beispielsweise Planungskosten, Steuern und Honorare veranschlagt werden. Die Phasen B1-7 inkludieren alle mit der Nutzung verbundenen Aspekte wie z. B. Inspektion, Wartung und Reinigung (B2). Die Entsorgungsphase beinhaltet alle Aktivitäten vom Rückbau bzw. Abriss (C1) bis zur Entsorgung der anfallenden Materialien (C4).

Auch viele weitere Normen unterteilen die Lebenszyklusphasen in mehr oder weniger kleinteilige Abschnitte. Dies dient insbesondere der besseren Strukturierung und Erfassung der Kostenarten, hat jedoch keinen Einfluss auf die Berechnung der Lebenszykluskosten. So ist in der DIN EN 16627 angemerkt, dass die Kosten für Herstellung, Transport und Einbau (A1-5) ggf. nur in summierter Form und nicht als Einzelkosten verfügbar sind (S. 25), wodurch die formale Unterteilung der Prozesse hinfällig wird. Auf die Unterschiede in der Untergliederung der Phasen wird daher in der weiteren Betrachtung nicht dezidiert eingegangen.

2.2.2 ISO 15686-5

Als internationale Norm ist die ISO 15686-5 „Hochbau und Bauwerke – Planung der Lebensdauer – Teil 5: Kostenberechnung für die Gesamtlebensdauer“ zu nennen, die die Lebenszykluskostenanalyse von Gebäuden und Bauwerken beschreibt. Ziel der Norm ist es, eine methodische Grundlage für die Bauindustrie zu bieten, auf deren Basis der Untersuchungsrahmen und die Definition für den jeweiligen Anwendungsfall erstellt werden können. Die ISO-Norm geht über andere Normen und Richtlinien hinaus, indem sie bei den Herstellungskosten die Kosten für Akquise, Beauftragung und Verwaltung miteinschließt. Bei den Nutzungskosten nennt sie zudem explizit Kosten, die bei der Verwaltung von Ausschreibungen anfallen, sowie Ausfallkosten. Darüber hinaus beinhalten Instandhaltungskosten die Planung und vorbereitenden Maßnahmen der Instandhaltung. Kosten für Rückbau und Entsorgung werden je nach Betrachtungsumfang mehr oder weniger detailliert betrachtet. Bei der erweiterten Betrachtung mittels Whole Life Costing werden z. B. zusätzlich weitere Kosten und auch Einnahmen (als negative Kosten) berücksichtigt (siehe Kapitel 2.1.3 WLC).

2.2.3 Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS)

Grundlage der Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (FGSV, 1997a) bildet die Bewertung von Nutzen als Basis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Nutzen ist dabei die Differenz der volkswirtschaftlichen Auswirkungen zwischen Maßnahme und Vergleichsfall, wobei der Nutzen auch negativ sein kann. Gemäß der Empfehlung werden die verschiedenen Nutzenkategorien mit der Summe aus investitionsbedingten und laufenden Kosten ins Verhältnis gesetzt. Während die Investitionen die Kosten für die Herstellung der Straße sowie deren Erneuerung über die Abschreibungszeiträume beinhalten, resultieren die laufenden Kosten aus dem Unterhalt der Straße. Kosten für Abriss und Entsorgung werden in den EWS nicht veranschlagt. Dies kann damit gerechtfertigt werden, dass Straßen in aller Regel nicht abgerissen (vollständig entfernt), sondern erneuert oder auch verbessert werden. Alle für Abriss und Entsorgung der bisherigen Straße anfallenden Kosten werden den Errichtungskosten für die Straßenerneuerung zugerechnet.

Für die Bewertung werden die Barwerte der jährlichen Kosten (Annuitäten der Investition sowie Betriebskosten) und jeweiligen Nutzen bestimmt. Daran wird für jede Nutzenkategorie das jeweilige Nutzen-/Kosten-Verhältnis ermittelt und diese zum Gesamtnutzen/Kosten-Verhältnis aufaddiert, das letztlich Aufschluss über die Wirtschaftlichkeit des Straßenprojekts gibt. Die vorgenommene Kostenbetrachtung stellt auch insofern einen Sonderfall dar, als die Kosten den betriebswirtschaftlichen Kosten entsprechen, die Nutzenkategorien aber sämtlich den externen Kosten bzw. Nutzen zuzurechnen sind.

Die EWS verfolgt damit einen komplett anderen Ansatz, der mit dem Vorgehen bei einer Lebenszykluskostenanalyse nicht vergleichbar ist. Sie bezieht sich zudem auf die Beurteilung völlig unterschiedlicher Varianten, während bei der Lebenszykluskostenanalyse der Kostenvergleich auf eine festgelegte funktionale Einheit (siehe Kapitel 3.1) bezogen wird.

2.2.4 BMUB Leitfaden und BNB Steckbrief

Der BMUB Leitfaden „Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden“ (BMUB, 2016) stützt seine Nachhaltigkeitsbewertungen und Anfor-

derungen an das nachhaltige Bauen grundsätzlich an das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen² und verweist zur Bestimmung der ökonomischen Qualität auf das BNB-Modul 2.1.1 „Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus“ (BNB, 2017) und die dort vorgeschlagene Methodik. Danach werden die Kosten für Herstellung, Nutzung sowie Rückbau und Entsorgung betrachtet, wobei in BMUB (2016) darauf hingewiesen wird, dass die Kosten der Herstellung und Nutzung eine übergeordnete Rolle spielen. Der Steckbrief nimmt Bezug auf mehrere DIN-Normen, um z. B. die Herstellungs- und Energiebedarfskosten zu bestimmen. Zur Bestimmung der Nutzungskosten erfolgt ein Verweis auf die DIN 18960. Diese Norm definiert die Nutzungskosten umfassend wie folgt: „Alle in baulichen Anlagen und deren Grundstücken entstehenden regelmäßig oder unregelmäßig wiederkehrenden Kosten von Beginn ihrer Nutzung bis zu ihrer Beseitigung“ (DIN 18960, 2008). Dies umfasst neben den Betriebs- und Instandhaltungskosten z. B. auch Versicherungen, Steuern und Pflege sowie Objektmanagementkosten wie z. B. Personal-, Sach-, Fremdleistungs- und Kapitalkosten.

Weiterhin enthält der Steckbrief konkrete Angaben zu Bewertungsmaßstäben, Energiepreisen und Instandhaltungsaufwänden. Als Nutzungsdauer werden für Gebäude 50 Jahre vorgeschlagen, wobei es nach BMUB (2016) sinnvoll sein kann, zusätzliche Betrachtungszeiträume zu analysieren.

Bei der Betrachtung von Umweltkosten geht BMUB (2016) über den Steckbrief hinaus, jedoch sind „Die externen Kosten [...] in einem ersten Näherungsschritt nur für die Umweltwirkung Treibhauspotenzi-

al bezogen auf den Primärenergiebedarf des Gebäudes in der Nutzungsphase und dessen Monetarisierung für die möglichen Ausführungsvarianten zu ermitteln“ (BMUB, 2016: 68).

2.2.5 DGNB System

Das Kriterium „Ökonomische Qualität“ ECO1.1 des DGNB Systems befasst sich mit den gebäudebezogenen Kosten im Lebenszyklus. In der Version 2018 werden die Herstellung von Baukonstruktionen und technische Anlagen sowie ausgewählte Nutzungskosten nach DIN 18960, nämlich Ver- und Entsorgungskosten, Reinigung und Pflege, Bedienung, Inspektion und Wartung sowie Instandhaltungskosten, veranschlagt. Kosten, die Grundstück, Planung, Kapital, Steuern, Versicherungen oder Rückbau und Entsorgung verursachen, finden in der LCC nach dem Kriterium „Ökonomische Qualität“ ECO1.1 keine Berücksichtigung.

2.2.6 Zwischenfazit

Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die betrachteten Normen, Richtlinien und Leitfäden. Da eine weitere Aufgliederung der Haupt-Lebenszyklusphasen keinen Einfluss auf die Anwendbarkeit der Normen oder die resultierende Kostenberechnung hat, wird diese in der Übersicht vernachlässigt, und es werden lediglich die drei Hauptphasen Herstellung, Nutzung sowie Rückbau und Entsorgung betrachtet.

Das Ergebnis des Vergleichs der herangezogenen Richtlinien und Normen legt nahe, dass diese sich prinzipiell am gleichen Leitbild orientieren und somit dasselbe Ziel verfolgen, auch wenn sie die berücksichtigten Kosten unterschiedlich weit fassen. Die Auswertung der vorhandenen Normen macht bereits ersichtlich, dass der Anwendungsfall „Lebens-

² <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem.html>

	DIN 16627	ISO 15686-5	EWS	BNB Steckbrief	BMUB Leitfaden	DGNB System
Betrachtete Lebenszyklusphasen/Kostenarten						
Herstellungskosten	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Nutzungskosten	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rückbau- & Entsorgungskosten	✓	✓		✓	✓	
Externe Kosten		✓	✓		✓	

Tab. 2-1: Überblick über betrachtete Normen, Richtlinien und Leitfäden

	DIN 16627	ISO 15686-5	EWS	BNB Steckbrief	BMUB Leitfaden	DGNB System
Ökonomische Parameter						
Nutzungsdauer ⁴				50 Jahre	50 Jahre	50 Jahre
Diskontierungsrate (p. a.)	3 % ¹	3 % ² (Verweis auf staatliche Vorgaben)	3 %	1,5 %	0,7 % ¹	3 % ¹
Preissteigerungsrate (p. a.)	1,8 % ³	1,8 % ³ (Verweis auf staatliche Vorgaben)		2 % für Bau- und Dienstleistungen, 5 % für Energie	1,8 % ¹	2 % für Bau- und Dienstleistungen, 5 % für Energie
Berechnungsmethode	Kapitalwertmethode	Kapitalwertmethode	Gesamt-Nutzen-/Kostenverhältnis	Kapitalwertmethode	Kapitalwertmethode	Kapitalwertmethode
¹ Verweis auf Verordnung (EU) Nr. 244/2012 von 16.01.2012 ² Neueste BMF-Veröffentlichung vom 30.06.2017, nominaler Kalkulationszinssatz für Personal- und Sachkosten 0,7 % p. a. URL: http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Oeffentliche_Finzen/Bundshaushalt/personal_kostensaetze-2016-anl.pdf ³ Monatsbericht des BMF März 2018, Verbraucherpreisanstieg gegenüber Vorjahr. URL: http://www.bundesfinanzministerium.de/Monatsberichte/2018/03/Downloads/monatsbericht-2018-03-deutsch.pdf?__blob=publicationFile&v=5 ⁴ Für Gebäude						

Tab. 2-1: Fortsetzung

zykluskostenanalyse von Schutzeinrichtungen“ einen individuell angepassten Ansatz erfordert, der sich zwar an den vorhandenen Normen, Richtlinien und Leitfäden orientieren kann, für den jedoch spezifische Festlegungen zu treffen sind. Dies bestätigt die Feststellung von DAVIS LANGDON (2007), dass die Literatur zur LCC hauptsächlich theoretischer Natur ist und deren konkrete Anwendung eher wenig wissenschaftliche Aufmerksamkeit erhält.

2.3 Kostenbewertung im Bausektor

Nachdem das vorangehende Kapitel die Einteilung der Lebenszyklusphasen und den Kostenbegriff innerhalb von Normen, Richtlinien und Leitfäden dargestellt hat, fokussiert dieses Kapitel auf Anwendungsliteratur zur LCC im Bausektor. Dazu werden Studien und Praxisbeispiele bezüglich Themen wie Herstellung, Nutzung, externe Kosten, Zielkonflikte, Rückbau und Entsorgung, ökonomische Parameter sowie Ausschreibung betrachtet.

Herstellung

Herstellungskosten finden in der Anwendungsliteratur des LCC einheitlich Eingang. Zur Bestimmung dieser Kosten im Bausektor wird mehrfach auf die Bewertungsgrundlagen der BNB und DGNB zurückgegriffen, denen in der Anwendung konkret

Kosten für die Herstellung der Rohstoffe, deren Transport und Verbau zugeordnet werden (MIELECKE et al., 2016b; KUHLMANN et al., 2015). Von MIELECKE et al. (2016a) wird darauf hingewiesen, dass die Herstellungskosten im Verhältnis zu den Nutzungskosten häufig wesentlich geringer ausfallen und daher insbesondere im Hinblick auf die daraus resultierenden Nutzungskosten analysiert werden sollten.

Nutzung

Die Nutzungsphase stellt in der Regel einen wesentlichen Bestandteil der LCC dar, weshalb Nutzungskosten in alle betrachteten LCC-Analysen Eingang finden. Nach FIEDLER et al. (2016) sind Nutzungskosten die Kosten, die nach Fertigstellung des Bauwerkes anfallen. Im Unterschied zur LCC von Gebäuden, die zum Teil signifikante Energiekosten verursachen, werden die Nutzungskosten von Objekten im Bereich Verkehrsinfrastruktur von den Instandhaltungs- oder Erhaltungskosten dominiert (GRAUBNER et al., 2011; KUHLMANN et al., 2015).

Die Betrachtung der zukünftigen Instandhaltungskosten ist jedoch eine Herausforderung innerhalb der LCC (KUHLMANN et al., 2011), da diese maßgeblich von externen Ursachen wie z. B. dem Verkehrsaufkommen und dessen zukünftiger Entwicklung abhängen (MIELECKE et al., 2016a).

Über die anteilige Höhe der Instandhaltungskosten an den Lebenszykluskosten eines Bauwerks gibt es verschiedene Ansichten. Beispielsweise ordnen ZINKE et al. (2012) den Großteil der Lebenszykluskosten von Verkehrsinfrastruktur den Herstellungskosten zu, die somit eine deutlich größere Bedeutung als im Hochbau hätten. Hingegen setzt GRAUBNER et al. (2011) die Instandhaltungskosten pauschal mit 60 % sowie die Wartungskosten mit 3 % der Lebenszykluskosten an. Inspektions- und Wartungskosten können nach MIELECKE et al. (2016c) auch pauschal mit 0,2 % der Herstellungskosten angesetzt werden. Der BNB-Steckbrief sieht, sofern keine genaueren Angaben verfügbar sind, für unregelmäßige Instandhaltungskosten 1,2 % der Herstellungskosten pro Jahr vor (BNB, 2017).

Auch außerplanmäßige Instandsetzungsmaßnahmen sollten sinnvollerweise bereits bei der Planung von Straßeninfrastruktur angesetzt werden, um deren Lebenszykluskosten besser einschätzen und die richtige Entscheidung im Sinne ökonomischer Nachhaltigkeit treffen zu können (FISCHER et al., 2016a).

Rückbau und Entsorgung

Rückbau- und Entsorgungskosten finden ebenfalls keine einheitliche Berücksichtigung in den LCC (GRAUBNER et al., 2016). Bei der Entwicklung eines Bewertungsverfahrens für die Nachhaltigkeit von Straßenbrücken stellten SCHMIDT-THRÖ et al. (2016) fest, dass Planungs- und Rückbaukosten eine wichtige Rolle für die Gesamtkostenbetrachtung einnehmen können. Sie machen in diesem Zusammenhang auch den Vorschlag, auf Basis entsprechender Bauwerke prozentuale Kostensätze als Näherungswert zu verwenden.

Ökonomische Parameter

Die Lebenszykluskosten werden in der Praxis entsprechend der Vorgaben der Normen mit der Kapitalwertmethode bestimmt. Der Kalkulationszinssatz bzw. die Preissteigerungsrate werden in verschiedenen Studien mit rund 3 % bzw. 2 %, veranschlagt, z. B. bei FISCHER et al. (2016b), was den sich aus den Normen ergebenden Größenordnungen entspricht.

Andere Studien argumentieren hingegen, dass die detaillierte Berücksichtigung der Preissteigerung

die grundsätzliche Aussage oder das Ergebnis einer LCC nicht signifikant beeinflusst. Folglich vereinfachen diese den Berechnungsprozess und bestimmen lediglich die realen Kosten mithilfe des inflationsbereinigten Diskontierungszinssatzes (KUHLMANN et al., 2015).

Praxisbeispiel Straße

Am Beispiel einer LCC für eine Straßenverbreiterung werden insbesondere die Unterschiede zwischen Theorie und Praxis deutlich (DAVIS LANGDON, 2007). Da eine Straße nur sehr selten wieder komplett zurückgebaut wird, wird für die Lebensdauer der Straße ein unbegrenzter Zeithorizont angenommen. Damit verliert der Betrachtungszeitraum für die LCC an Bedeutung und die Kosten für Rückbau und Entsorgung entfallen. Folglich werden nur die Herstellungskosten, inklusive der Planungs- und Entwicklungskosten, sowie die Nutzungskosten, inklusive Wartung und Instandhaltung, betrachtet. Eine weitere Vereinfachung ist die Annahme eines Overhead-Faktors. Dieser trägt der Problematik Rechnung, dass aufgrund begrenzter Daten- und Ressourcenverfügbarkeit nicht alle Kosten in einer LCC-Analyse im Detail abgebildet werden können. Die Höhe des Faktors ist jedoch für jeden Anwendungsfall spezifisch zu bestimmen (DAVIS LANGDON, 2007).

Zusammenfassend wird bei dieser Auswertung deutlich, dass bei der Erstellung einer LCC ein großer Handlungsspielraum besteht und eine fallspezifische Konkretisierung und Anpassung auf das betrachtete Objekt erforderlich ist.

2.4 Kostenbewertung von Schutzeinrichtungen

Die Richtlinien für passive Schutzeinrichtungen an Straßen (FGSV, 1989) definierten im Jahr 1989 die Einsatzbereiche von Schutzeinrichtungen und schrieben detailliert Systeme vor. Als Folge der Einführung der europäischen Norm (DIN EN 1317-1, 2011) wurden die Richtlinien überarbeitet und statt Systemen werden nur die Leistungsklassen vorgeschrieben (FGSV, 2009). Es bleibt dem Anwender überlassen, sich für eines der Systeme mit entsprechender Leistungsklasse zu entscheiden.

Bereits 2003 wurde von RAY et al. (2003) ein Überblick über insgesamt 22 verschiedene Studien ge-

geben, die sich mit den Kosten von Schutzeinrichtungen über mehrere Jahre beschäftigen. Hierbei wurden vor allem die Investitionen, Personen- und Sachschäden und die Reparatur infolge von Unfällen, sowie die Wartung der Schutzeinrichtungen analysiert. Die ausgewerteten Studien beziehen sich alle auf in den USA eingesetzte Systeme und sind teilweise noch aus den 1970er Jahren.

Weitere Kriterien, welche in einer Lebenszykluskostenbetrachtung von Schutzeinrichtungen hilfreich sein können, lassen sich in der Arbeit von FRÖHLICH (1999) finden. Hier werden zwar keine konkreten Berechnungen durchgeführt, jedoch wurden auf der Grundlage einer Befragung von Straßenmeistereien in Österreich Kriterien für Lebenszykluskostenbetrachtungen gesammelt. Als Kostenkomponenten über die Lebensdauer von Schutzeinrichtungen sind Reparaturen infolge von Unfällen, Grünpflege, Winterdienst, Bankettschalen, Straßenreinigung, Entwässerung, Mittelstreifenüberfahrten und Verkehrszeichenbefestigungen identifiziert worden. Der Fokus lag hier auf der Phase des Betriebs ohne Auf- und Rückbau.

Einen Effekt hinsichtlich der Lärmimmissionen untersuchte die Studie von Ove Arup & Partners International Ltd. (2006). Hier wurden die Lärmemissionen an einer Autobahn mit Schutzeinrichtungen aus Beton denen aus Stahl gegenübergestellt. Der Ansatz der Untersuchung war die Idee, dass durch flächige Betonelemente mehr Lärm reflektiert wird als durch Schutzeinrichtungen aus Stahl. Jedoch konnte in der Studie kein Effekt festgestellt werden.

CONNELL et al. (2008) und EUPAVE (2012) betrachteten ebenfalls Kriterien zu Lebenszykluskosten. Zu den Kostenkomponenten zählten Investition, Produktion off-site, Konstruktion on-site, Unfälle im Allgemeinen und im Speziellen von Motorradfahrern, Wartung und natürliche Ressourcen. Zum Kriterium natürliche Ressourcen zählen CONNELL et al. (2008) das Recycling der Materialien am Ende der Lebensdauer, die Umweltverschmutzung durch Metalle, Hydrocarbonate, Salze und Nährstoffe sowie mikrobiologische Abfälle, die Auswirkungen der Stahlherstellung für Schutzeinrichtungen aus Stahl und der Bewehrungsstähle im Beton, die Inanspruchnahme von Fläche und der Wirkung der Schutzeinrichtung als Barriere für wildlebende Tiere.

Das von der Europäischen Union geförderte Projekt SAVeRS (LATORRE et al., 2016) hat basierend auf einer Analyse internationaler Richtlinien zur Aus-

wahl von Schutzeinrichtungen ein Online-Tool hervorgebracht, mit dem es dem Anwender möglich sein soll, eine geeignete Schutzeinrichtung für seinen speziellen Anwendungsfall auszuwählen. Hierbei wird unter anderem auch ein Lebenszykluskostenmodell verwendet. Dieses beinhaltet Konstruktions-, Wartungs- und Reparaturkosten (infolge Unfalls) externe gesellschaftliche Kosten (hauptsächlich Unfallkosten) sowie Rückbaukosten. Die „Lifetime Cost“ wird im Projekt als Summe der Installationskosten, abgezinsten jährlichen Instandhaltungskosten, mit der Schutzeinrichtung assoziierten und durch Verletzungen verursachten Kosten sowie abdiskontierten Unfallreparaturkosten.

Das Forschungsprojekt FE 03.310 „Einsatzkriterien von Betonschutzwänden“ beschäftigte sich intensiv mit der Fragestellung, ob bei der Ausstattung von Autobahnen unter gesamtwirtschaftlichen Aspekten Betonschutzwände oder Schutzeinrichtungen aus Stahl zweckmäßiger sind (STEINAUER et al., 2004). Anhand von Untersuchungsstrecken fand eine wirtschaftliche Vergleichsrechnung mit der Berücksichtigung sämtlicher Kosten des Baulastträgers (Investitionen, Reparatur-, Grünpflege-, Reinigungs- und Winterdienstkosten) sowie Unfall- und Zeitverlustkosten statt. Da in diesem Forschungsprojekt heutige H1-Schutzeinrichtungen mit H2-Schutzeinrichtungen verglichen wurden, können die Ergebnisse für heutige Fragestellungen nur ansatzweise verwendet werden. Aus den Nutzenkomponenten nach EWS (FGSV, 1997a) werden insbesondere die Faktoren „Veränderung des Unfallgeschehens“ und „Veränderung der Fahrzeit“ als maßgeblich angesehen. Die Fahrzeitverluste zeigen sich als Folge von Unfall- und Arbeitsstellen. Auf Grundlage der genannten Kosten- und Nutzenkomponenten wird abschließend eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchgeführt, in der das Nutzen-/Kostenverhältnis nach EWS (FGSV, 1997a) betrachtet wird. Nach STEINAUER et al. (2004) stellt sich im Rahmen der Kostenermittlung insbesondere die Datenverfügbarkeit zu betrieblichen Aufwendungen als problematisch heraus. Explizit wird dabei auf die Kosten für den Winterdienst verwiesen. Bezüglich der Nutzenkomponenten wird auf das vermehrte Fehlen einer monetären Bewertung der Unfallfolgen verwiesen. Hier konnten nur pauschale Unfallkosten als Berechnungsgrundlage herangezogen werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen und Modellen aus dem Forschungsprojekt FE 03.310 entwickelte KATHMANN (2005) ein Modell zur Auswahl und

Wirtschaftlichkeitsüberprüfung von Schutzeinrichtungen. Grundlage für das PASUW genannte Modell bildete eine Literaturstudie sowohl zum Unfallgeschehen als auch zu betrieblichen Aspekten von Schutzeinrichtungen. In die Entwicklung flossen sowohl die Untersuchungsergebnisse als auch die methodischen Ansätze der Nutzen/Kosten-Analysen mit ein. Das Modell wurde programm-technisch umgesetzt und steht als PASUW (Programm zur Auswahl von Schutzeinrichtungen und deren Wirtschaftlichkeitsüberprüfung) zur Verfügung (KATHMANN, 2003; KATHMANN, 2006). Die grundsätzliche Vorgehensweise dieses Modells sowie die Datenclustering wurde für diese Studie übernommen. Die Datenbasis wurde jedoch im Rahmen der vorliegenden Studie aktualisiert, zudem wurden zusätzliche Kostenkomponenten betrachtet.

Ein ähnlicher Ansatz wird international verfolgt. In England wird von der Highways Agency bei „hohen Verkehrsstärken und einem hohen Lkw-Anteil“ die Betonschutzwand in Form der Step Barrier bevorzugt (Transportation Professional, 2004). Diese Entscheidungen basieren auf den Lebenszykluskostenbewertungen von WILLIAMS (2004). In dieser umfassenden Studie wurden für mehrere Systeme im Mittelstreifen von zweibahnigen Straßen umfassende Kostenansätze eruiert und zusammengestellt. WILLIAMS (2004) untersucht die Lebenszykluskosten für Betonschutzwände bzw. Schutzeinrichtungen aus Stahl für eine voraussichtliche Betriebsdauer von 50 bzw. 2 x 25 Jahren und für eine Streckenlänge eines Kilometers. Im Rahmen der Schutzeinrichtungen aus Stahl werden auch Rückhaltevorräte in Form von Drahtseilen betrachtet, die in Deutschland jedoch keine Anwendung finden. Neben den Kosten für die Installation werden die Kosten für die Wartung, Unfällen inklusive medizinischer, volkswirtschaftlicher und humaner Kosten sowie für die Demontage am Lebensende berücksichtigt. Weiterhin sind auch die Verkehrsmanagementkosten und die Kosten aufgrund von Reisezeitverlusten während der Installation, Reparatur und Demontage Bestandteile der aufgeführten Kostenrechnung. Die Unfallkosten nehmen in den Ergebnissen mit 42 % (Beton) bzw. 46 % (Stahl) den größten Anteil aus. Mit diesen Systemgrenzen ist WILLIAMS (2004) für die vorliegende Studie weniger relevant.

Auch in den USA werden seit einigen Jahren Modelle zur gesamtwirtschaftlichen Betrachtung und zur Durchführung von Nutzen/Kosten-Analysen entwickelt, die zur Überprüfung von Schutzeinrich-

tungen herangezogen werden können. Das Roadside Safety Analysis Program (RSAP) ist beispielsweise das Ergebnis einer kontinuierlichen Weiterentwicklung und wurde als Computerprogramm umgesetzt (RAY et al., o. J.). Aktuell wird RSAP über das Internet vertrieben (letzte Aktualisierung: 2012), steht lizenzfrei zur Verfügung und ist ausführlich dokumentiert (RSAP, 2017). Das Programm berücksichtigt die Kosten für den Entwurf, den Bau, die Instandhaltung, den Umweltschutz und die Landerwerbskosten. Für diese Kostenarten liegen allerdings nur sehr ungenaue Werte vor, zudem werden diese gemittelt verwendet. Auch treten große Kostenunterschiede zwischen ländlichen und städtischen Räumen auf. Hinzu kommen Crash-Kosten, die allerdings nicht für alle Schutzsysteme vorliegen. Berechnet werden sie mittels Abkommenswahrscheinlichkeit, Unfall- und Schweregradvorhersage. Im Allgemeinen dient das Programm der Berechnung eines Nutzen-Kosten-Quotienten, der wiederum mit anderen potenziellen Systemen für den Standort verglichen werden kann. Das Modell SAFBAR baut auf den Ansätzen von RSAP auf MONTELLA (2000), allerdings berücksichtigt es die realen Anprallbedingungen mit den im Test nach DIN EN 1317:2010 vorliegenden Bedingungen. Somit spiegelt das Modell eher die Situation in Europa wider.

Zum Zeitpunkt der Untersuchungen zum FE 03.310/1997/FRB von STEINAUER et al. (2004) war die Auswahl an geeigneten Untersuchungsstrecken noch sehr begrenzt, sodass die ausgewählten Untersuchungsstrecken miteinander nicht vergleichbar waren. Infolgedessen wurden H1-Schutzeinrichtungen mit H2-Schutzeinrichtungen verglichen. Im Forschungsprojekt FE 03.412/2006/FRB „Eignung von Schutzeinrichtungen aus Stahl und Betonschutzwänden im Mittelstreifen von Autobahnen“ (KATHMANN & JANSEN, 2013) wurden dann erstmalig vergleichbare H2-Schutzeinrichtungen untersucht. Basierend auf einer Datenbank wurden Untersuchungsstrecken ausgewählt und die Parameter mit den Behörden abgestimmt. Zusätzlich fanden Unfallereignisse statt, bei denen Unfalldaten mehrerer Jahre auf knapp 625 Richtungskilometern über alle untersuchten Schutzeinrichtungen erhoben wurden. Darüber hinaus wurden auch die Kostenkomponenten der Schutzeinrichtungen analysiert. Diese wurden in Zusammenarbeit mit der Stahl- und Betonindustrie für eine Streckenlänge von sechs Kilometern bestimmt und berücksichtigen die folgenden Schutzeinrichtungen:

- Klassische Schutzeinrichtungen aus Stahl,
- Moderne Schutzeinrichtungen aus Stahl,
- Schutzeinrichtungen in Ortbetonbauweise (BSW O),
- Schutzeinrichtungen aus Betonschutzwandfertigteilen (BSWF).

Für alle vier Systemgruppen werden die Kosten für die Montage, die Systemkosten, Zusatzkosten für mögliche Bodenarbeiten sowie für Mittelstreifenüberfahrten und Übergangskonstruktionen aufgeführt. Die Investitionen konnten in dem Projekt mittels Musterausschreibungen recht genau ermittelt werden. Nach KATHMANN & JANSEN (2013) ist der geringe Stichprobenumfang weniger geeignet, um differenzierte Aussagen zu den betrieblichen Kosten ableiten zu können.

Bei einer schwedischen Studie von KARIM (2011), in der es um Straßenplanung mit dem Fokus auf die zukünftigen Kosten aus dem Betrieb der Straße geht, wird ebenfalls eine Betrachtung der Lebenszykluskosten vorgenommen. KARIM (2011) geht hierbei insbesondere auf die Kostenkomponenten Investitionen (Planung, Beschaffung und Installation), Wartungskosten (Reparaturen, Reinigung und Kehren) und externe sozio-ökonomische Kosten (Stau- und Unfallkosten) ein. Er vergleicht Betonschutzwände mit Schutzeinrichtungen aus Stahl und Kabelsystemen. Bei den Stahl- und Betonsystemen kann man beim Vergleich der Kostenkompo-

nenten erkennen, dass die sozio-ökonomischen Kosten und die Investitionen den Hauptteil der Kosten über den betrachteten Lebenszyklus von 30 Jahren ausmachen. Die sozio-ökonomischen Kosten werden dabei von den Kosten für Personen- und Sachschäden dominiert und beinhalten zusätzlich die Staukosten, die beide in dieser Studie nicht berücksichtigt werden (siehe Kapitel 5).

Auch bei KARIM (2011) sind die Gesamtkosten ähnlich. Lediglich bei den Investitionen und den Unfallkosten gibt es größere Unterschiede. Die Betonschutzwände bedingen zwar höhere Investitionen, weisen jedoch wesentlich niedrigere Unfallkosten auf. Um eine genauere Betrachtung vornehmen zu können, hat KARIM (2011) die Lebenszykluskosten auf ihre Sensitivität gegenüber den Kostenarten untersucht (Bild 2-2 und Bild 2-3). Hierbei fällt auf, dass der größte Einfluss auf die Lebenszykluskosten von Betonschutzwänden durch die Investitionen und die Verkehrsstärke, die wiederum Einfluss auf die Anzahl der Unfälle und auf die Staukosten bei Maßnahmen im Verkehrsraum hat, verursacht wird. Erst nachgeordnet finden sich die Kosten für den einzelnen Unfall. Bei Schutzeinrichtungen aus Stahl (w-beam barriers) hat die Verkehrsstärke sogar den größten Einfluss auf die Lebenszykluskosten. Die Investitionen treten hier erst an siebter Stelle auf.

Der Einfluss des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) auf die Lebenszykluskosten bei den verschiedenen Systemen wurde von KARIM (2011) nochmals genauer untersucht (Bild 2-4). Hier wird

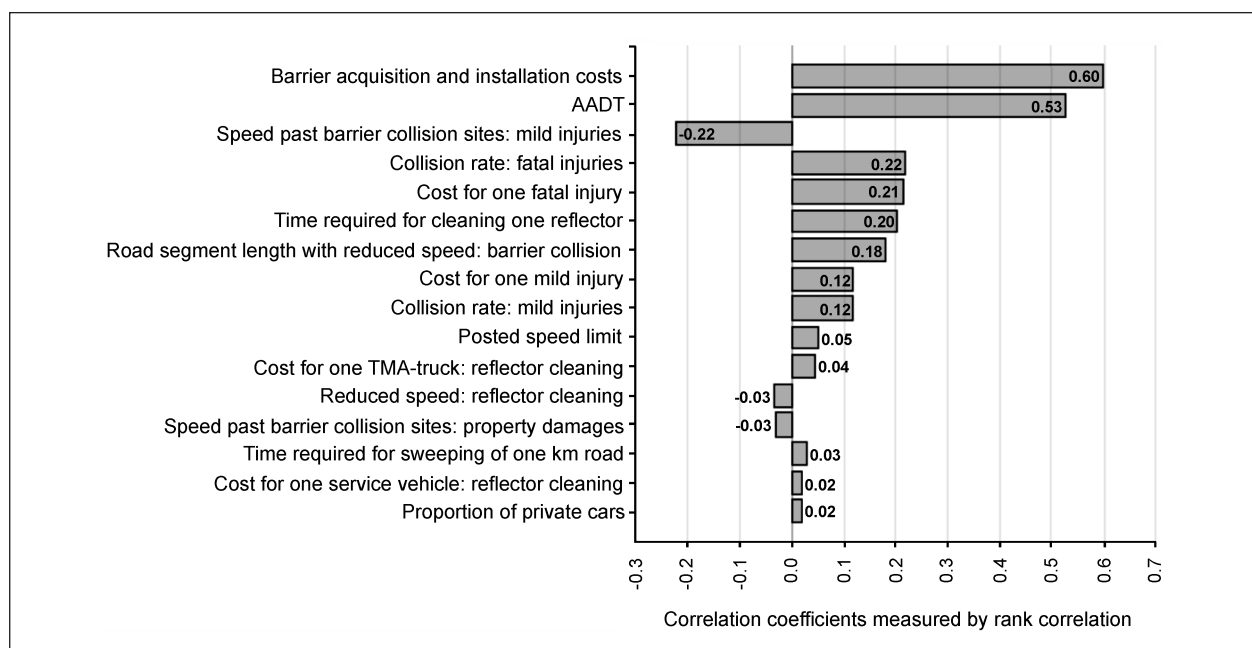


Bild 2-2: Sensitivität der Lebenszykluskosten von Betonschutzwänden gegenüber Kostentreibern (KARIM, 2011)

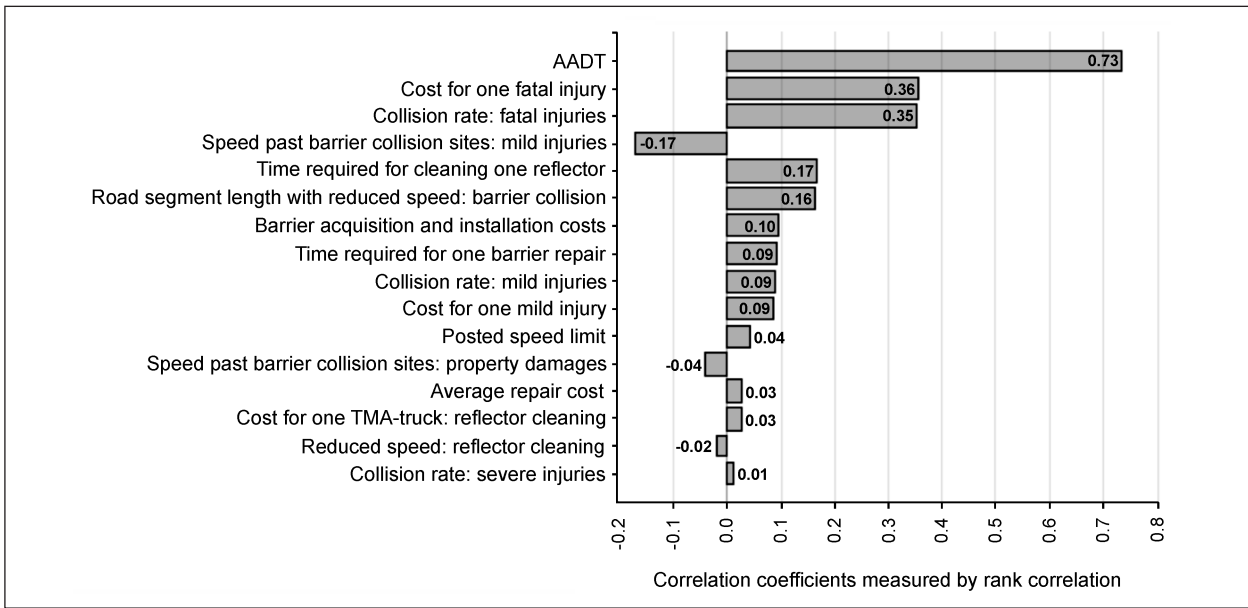


Bild 2-3: Sensitivität der Lebenszykluskosten von Schutzeinrichtungen aus Stahl gegenüber Kostentreibern (KARIM, 2011)

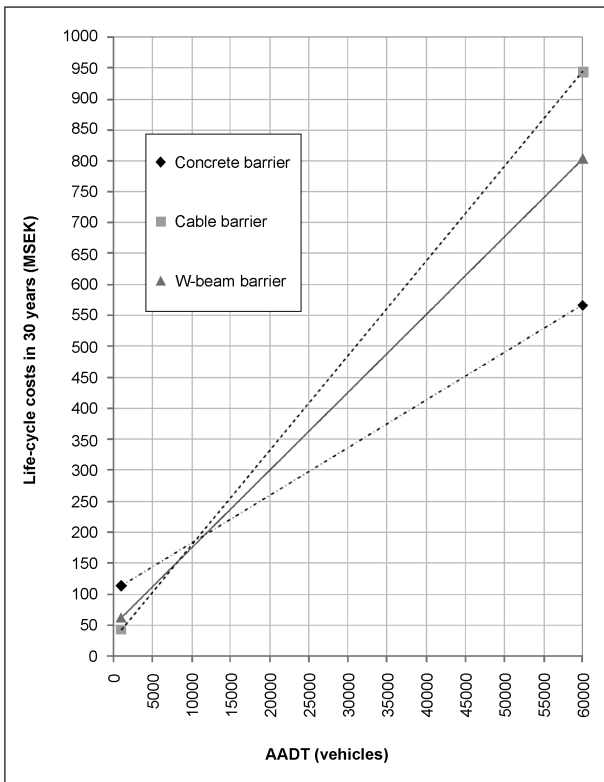


Bild 2-4: Effekt der Verkehrsstärke auf die Lebenszykluskosten der untersuchten Fahrzeug-Rückhaltesysteme (KARIM, 2011)

deutlich, dass ab einem DTV von etwa 10.000 Fahrzeugen/Tag die Betonschutzwand hinsichtlich der Lebenszykluskosten zu bevorzugen ist.

In einer aktuellen Untersuchung von RICHARDS (2018) wurden ebenfalls die Lebenszykluskosten

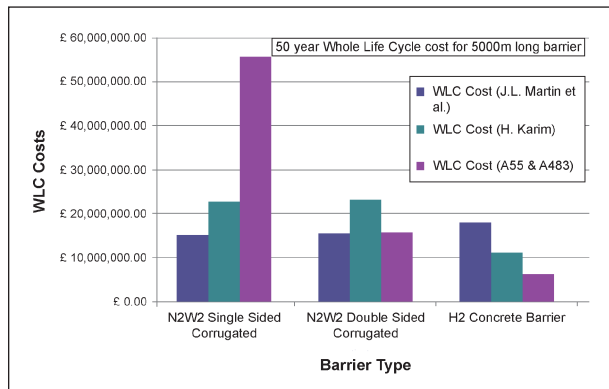


Bild 2-5: Lebenszykluskosten für einen 5km-Abschnitt verschiedener Schutzeinrichtungen über 50 Jahre (RICHARDS, 2018)

von Betonschutzwänden und Fahrzeug-Rückhaltesystemen aus Stahl gegenübergestellt. Hierzu wurden insbesondere Installation, Wartung und Unfallschwere bzw. die mit Unfällen assoziierten Kosten untersucht. Untersuchungsgebiet waren die A55 und A483 in Wales. Hierzu wurden Unfalldaten der britischen Regierung und Bestandsdaten der Schutzeinrichtungen kombiniert. Auf einer Straßenkarte wurde festgestellt, welcher Typ Schutzeinrichtung am Unfallort vorhanden ist und die Kosten über einen Lebenszyklus von 50 Jahren miteinander verglichen. Die über den Lebenszyklus berechneten Kosten beliefen sich im Untersuchungsgebiet je nach Schutzeinrichtung auf sehr unterschiedliche Beträge (Bild 2-5). Auch im Vergleich zu anderen Untersuchungen, wie z. B. KARIM (2011), wurden im speziellen Beispiel in Wales andere Beträge berechnet.

RICHARDS (2018) stellt in seiner Untersuchung heraus, dass Betonschutzwände und Schutzeinrichtungen aus Stahl hinsichtlich der Unfallfolgen in etwa vergleichbar sind. Jedoch kann für Betonschutzwände ein signifikant niedrigerer Kostensatz für Wartungs- und Reparaturarbeiten beobachtet werden.

Zusammenfassend lassen sich aus der Literatur einige Kriterien filtern, welche in eine Betrachtung von Lebenszykluskosten einfließen können. Die Studien die RAY et al. (2003) ausgewertet haben, sind nicht unbedingt repräsentativ für die Berechnung der Lebenszykluskosten in Deutschland zum heutigen Zeitpunkt. Jedoch zeigen sie, welche Kriterien bereits für solche Betrachtungen auch in den USA angewendet wurden.

Auch die Studie von WILLIAMS (2004) lässt sich nicht direkt auf die Situation in Deutschland übertragen. Zum einen betrachtet WILLIAMS (2004) speziell auf den britischen Markt und die britischen Regelwerke zugeschnittene Schutzeinrichtungssysteme. Zum anderen werden in der Berechnung der Lebenszykluskosten Werte für Parameter ange setzt, die nicht unbedingt den Kostenparametern entsprechen, die auch für Systeme in Deutschland zu betrachten wären. Hier soll das vorliegende Forschungsvorhaben Hilfestellungen und erste Ergebnisse liefern und die Lebenszykluskostenberechnung für Schutzeinrichtungen speziell in Deutschland möglich machen. WILLIAMS (2004) kann hier jedoch wertvolle Hinweise auf Parameter und deren Erhebung und Einbindung in die Berechnung der Lebenszykluskosten geben.

KARIM (2011) zeigt, dass die Ergebnisse einer Studie nicht unbedingt auf ein anderes Untersuchungsgebiet übertragen werden können. Auch wenn als Eingangsgrößen evtl. dieselben Parameter gewählt werden, müssen immer die speziellen Randbedingungen beachtet werden.

Viele der Studien haben bei den sozio-ökonomischen Kosten die Personen- und Sachschäden aufgrund von Unfällen berücksichtigt. Jedoch wurde in den meisten Betrachtungen auch festgestellt, dass diese sich zwischen den einzelnen betrachteten Systemen nur unwesentlich unterscheiden, wenn man die Kosten des einzelnen Unfalls heranzieht. Dies zeigt, dass die verschiedenen Systeme in derselben Weise wirken. Einen großen Unterschied machen hingegen die Reparaturkosten infolge des Unfalls und die damit verbundenen Kosten durch

Fahrzeitverlängerungen (Staukosten), die sich als stark systemabhängig erweisen.

Weiterhin bestehen große Unterschiede zwischen den Studien hinsichtlich der ermittelten Kosten. Das gibt einen Hinweis darauf, dass die Kosten in jeglicher Einbausituation variieren und somit eine Berechnung immer die Umgebungsbedingungen beinhalten sollte. So können die Ergebnisse aus Großbritannien nicht einfach auf den deutschen Raum übertragen werden. Zudem sind in den Studien bisher immer einzelne Aspekte untersucht worden. So bezog sich WILLIAMS (2004) in seinen Untersuchungen nur auf den Mittelstreifen von zweibahnigen Straßen. In den meisten Untersuchungen sind zudem Betonschutzwände und Schutzeinrichtungen aus Stahl miteinander verglichen worden. In Deutschland soll allerdings systemneutral ausgeschrieben werden, sodass kein Material vorgeschrieben werden kann. Ein Vergleich sollte daher zwischen verschiedenen Klassen von Schutzeinrichtungen vorgenommen werden. Diese Klassen könnten sich beispielsweise aus der Aufhaltstufe und dem Einsatzort ergeben.

Aufgrund mangelnder Übertragbarkeit durch die Betrachtung von Systemen, die nicht in Deutschland verwendet werden, sowie der Begrenzung auf spezifische Anwendungsfälle, lassen die bisherigen Studien keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen zu. Weiterhin wurden jeweils sehr unterschiedliche Kostenarten betrachtet, die einen Vergleich zusätzlich erschweren. Insbesondere der Einbezug von Unfallfolgekosten in Form von Personen- und Sachschäden führt zu signifikanten zusätzlichen Kosten, was jedoch in der vorliegenden Studie unberücksichtigt bleibt. Die Ergebnisse der Literaturauswertung sind im Anhang zusammenfassend dargestellt.

3 LCC-Untersuchungsdesign

Die Methode der LCC zeichnet sich durch einen hohen Grad an Flexibilität aus und lässt sich auf verschiedene Anwendungen zuschneiden. Um die Vergleichbarkeit verschiedener Anwendungsfälle sicherzustellen, ist es notwendig, das Untersuchungsdesign und die jeweiligen Randbedingungen fallspezifisch zu definieren und zu dokumentieren.

Gemäß der DIN EN 16627 (2015) stellen dabei die Transparenz und Rückverfolgbarkeit der Informatio-

nen eine wesentliche Grundlage dar. Die ISO 15686-5 (2017) betont ausdrücklich, dass die LCC so dokumentiert werden soll, dass ihre Nutzer deren Ergebnisse und Anwendung sowie deren Absicht, Untersuchungsrahmen, Grundannahmen, Grenzen, Einschränkungen, Unsicherheiten, Risiken und Folgen unmissverständlich erfassen können (ISO 15686-5, 2017, p. 30). Auch in der EWS wird gefordert, die verwendeten fallspezifischen Datengrundlagen zu erläutern, um die Entscheidungsgrundlage nachvollziehbar zu gestalten (FGSV, 1997b).

Das Untersuchungsdesign basiert zunächst auf der Auswertung der Literaturrecherche. Im weiteren Projektverlauf wurde es dann entsprechend den Ergebnissen der Datenerhebung sowie der Expertendiskussionen weiterentwickelt. Die dargestellten Festlegungen spiegeln den finalen Stand wider und werden in Übereinstimmung mit den Dokumentationsanforderungen der Normen im Folgenden möglichst nachvollziehbar erläutert. Die Einteilung in Lebenszyklusphasen in der vorliegenden Studie lehnt sich an die DIN EN 16627 (2015) zur Berechnung von Indikatoren zur Bewertung der ökonomischen Qualität eines Gebäudes an.

3.1 Funktionale Einheit

Die funktionale Einheit legt das Objekt der Untersuchung sowie dessen Funktionen fest, indem sie eine quantifizierte Bezugsgröße eines Produktsystems bestimmt. Die funktionale Einheit dient somit dazu, die Studienergebnisse einheitlich darzustellen. So kann die funktionale Einheit auch als Vergleichseinheit verwendet werden (ISO 14044, 2006).

Der Zweck von Schutzeinrichtungen ist es, im Fall eines Anpralls Fahrzeuge aufzuhalten und sicher umzulenken. Die Leistungsfähigkeit ist gekennzeichnet durch die Aufhaltstufe, den Wirkungsbereich und die Anprallheftigkeitsstufe gemäß DIN EN 1317. Schutzeinrichtungen verschiedener Konstruktionen oder Materialien (z. B. Stahl und Beton) erfüllen daher bei gleichen Leistungsmerkmalen dieselbe technische Funktion. Für das hier durchgeführte Forschungsprojekt wurde die Aufhaltstufe als Merkmal für die funktionale Einheit festgelegt. Die Aufhaltstufe wird maßgebend durch den Straßentyp beeinflusst. Als Fallbeispiel für die Betrachtung wurde die Autobahn festgelegt. Im Mittelstreifen von zweibahnigen Straßen mit einer Geschwin-

digkeit von mehr als 50 km/h muss entsprechend FGSV (2009) mindestens die Aufhaltstufe H2 gewählt werden.

Die Ausführung der Schutzeinrichtung und ihre Befestigung unterscheiden sich zudem wesentlich zwischen verschiedenen Aufstellorten. Um verschiedene Anwendungsfälle zu berücksichtigen, einigte sich der forschungsbegleitende Ausschuss auf die drei Aufstellorte freie Strecke, Bauwerk und beengte Verhältnisse als die häufigsten Randbedingungen für die Untersuchung. Darüber hinaus wurde festgelegt, Systeme mit der im Mittelstreifen erforderlichen Aufhaltstufe H2 zu betrachten, welche bei allen Aufstellorten zulässig sind.

Diese Definition legt die Grundlage für die Leistungsmerkmale, anhand derer sich die Systeme unterscheiden, wie z. B. in ihrer Herstellung, Verarbeitung oder Verankerung. Um die Auswahl der Systeme nicht zu stark zu begrenzen und nicht von vorneherein Systeme aufgrund ihrer Materialcharakteristiken auszuschließen, wurden der Wirkungsbereich und die Anprallheftigkeitsstufe nicht festgelegt. Somit war sichergestellt, dass der gebräuchliche Ersatz von zum Beispiel eines Systems H2/W4/A durch ein System H2/W2/B möglich ist und in der vorliegenden Studie beide Systeme betrachtet werden können.

Als funktionale Einheit wird definiert:

Ein 1,0 km langer Abschnitt einer Schutzeinrichtung der Aufhaltstufe H2 aus Standardelementen an einer Autobahn im Mittelstreifen einer Richtungsfahrbahn.

Die einheitliche Festlegung auf eine Abschnittslänge von einem Kilometer vernachlässigt, dass Abschnitte auf freier Strecke meist länger ausfallen, während Abschnitte bei Bauwerken und beengten Verhältnissen in der Regel deutlich kürzer sind. Die standardisierte Kostenbetrachtung je Kilometer Autobahn führt dazu, dass die Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung aufgrund der in der Praxis unterschiedlichen Längen von realen Autobahnabschnitten unter- bzw. überschätzt werden. Darauf wird bei der Festlegung der Berechnungswerte in Kapitel 5.3 gesondert hingewiesen.

3.2 Betrachtungszeitraum und Bezugsjahr

Der Betrachtungszeitraum für die Bestimmung der Lebenszykluskosten von Fahrzeug-Rückhaltesystemen umfasst:

- den Zeitraum bis zur Inbetriebnahme der Schutzeinrichtung. Hierunter fallen die Ausschreibung, Planung und Beauftragung sowie Herstellung und Errichtung der Systeme,
- die Nutzung der Systeme über ihre Lebensdauer und
- die Phase des Abrisses/Rückbaus.

Bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten wird basierend auf den Leistungserklärungen der Hersteller, der ZTV-FRS (Zusätzliche Technische Vertragsbedingung und Richtlinien für Fahrzeug-Rückhaltesysteme, Ausgabe 2013/Fassung 2017) (FGSV, 2017) und der erwarteten Nutzungsdauer ein Zeitraum von 25 Jahren zugrunde gelegt.

Zur Ermittlung der in der Praxis verwendeten Fahrzeug-Rückhaltesysteme und der damit verbundenen Kosten fand 2018 eine Datenerhebung statt. Die Systeme, zu denen Daten erhoben wurden, sind zu diesem Zeitpunkt bereits über einen mehr oder weniger langen Zeitraum in Betrieb. Daher sind die Kosten jeweils auf das Jahr zu beziehen, in dem sie angefallen sind, und müssen ggf. entsprechend durch Preissteigerungen an das Bezugsjahr angepasst werden. Das Jahr 2018 wird daher als Bezugsjahr herangezogen, um eine einheitliche Bewertung verschiedener Kostenangaben zu ermöglichen.

3.3 Systemgrenzen (Kostenarten)

Für die Anwendung der LCC ist nach DAVIS LANGDON (2007) wichtig, dass diese auf die Projektgröße, die Projektphase sowie auf den im Projekt erforderlichen Detaillierungsgrad angepasst wird. Es gibt daher keine stringente Vorgehensweise, de-

ren Befolgung die Qualität und Richtigkeit der angewandten LCC-Methodik sicherstellen würde. Wie in Kapitel 2 dargestellt, unterscheiden sich die Begrifflichkeiten und auch das Verständnis, welche Kosten den einzelnen Kostenarten zuzuordnen sind. Des Weiteren werden die gleichen Kostenarten z. T. unterschiedlichen Lebenszyklusphasen zugeordnet. Da eine einheitliche Systematik nicht gegeben ist, wurde als Ausgangspunkt zur Festlegung der zu berücksichtigenden Eingangsgrößen (Kostenarten) für die einzelnen Lebenszyklusphasen zunächst die (DIN EN 16627, 2015) und die ausgewertete Literatur zur Kostenbewertung herangezogen. Basierend auf den Expertendiskussionen im weiteren Projektverlauf wurde die Liste dann weiterentwickelt und konkretisiert.

Hinsichtlich der Lebenszyklusphasen werden, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, lediglich die drei Hauptphasen

- Herstellung und Errichtung,
- Nutzung und
- Abriss/Rückbau

unterschieden. In Tabelle 3-1 sind den Lebenszyklusphasen jeweils die Kostenarten zugeordnet, die für die LCC von Schutzeinrichtungen prinzipiell von Relevanz sein können. Offensichtlich unzutreffende Kostenarten wie Kosten für Energie und Wasser, die sich auf den Betrieb von Gebäuden beziehen, blieben dabei von Vorneherein unberücksichtigt. Weiterhin wird angenommen, dass die Errichtung von Schutzeinrichtungen unmittelbar mit dem Straßenbau erfolgt. Die in der weiteren Analyse zu berücksichtigenden Kostenarten wurden im Rahmen der Sitzungen des forschungsbegleitenden Ausschusses konkretisiert und sind in der Spalte „Betrachtung“ mit einem Haken (✓) markiert. Damit wurde festgelegt, welche Kostenarten in der Studie prinzipiell Berücksichtigung finden sollten und welche Kostenarten zusammengefasst betrachtet werden. Inwieweit die Kostenarten tatsächlich Eingang in die Berechnung finden, ergibt sich aus der Diskussion und Festlegung der anzusetzenden Höhe der Kosten in Kapitel 5.

Lebenszyklusphase	Kostenart	Betrachtung	Erläuterung
Herstellung und Errichtung	Bauvorbereitung	–	Diese können nicht von den deutlich höheren Kosten der Bauvorbereitung für den gleichzeitigen Straßenbau abgegrenzt werden und werden nicht betrachtet.

Tab. 3-1: Kostenarten für die LCC von Fahrzeug-Rückhaltesystemen

Lebenszyklusphase	Kostenart	Betrachtung	Erläuterung
Herstellung und Errichtung	Ausschreibung	✓	Die Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung werden zusammenfasst betrachtet.
	Planung	✓	
	Beauftragung	✓	
	Baunebenkosten	–	Diese sind Bestandteil der Baukosten und werden nicht separat betrachtet.
	Baukosten	✓	Umfasst die Kosten für Herstellung incl. Rohstoffversorgung, Transport und Errichtung einschließlich ggf. erforderlicher Fundamente.
	Transport	–	Es wird von einer Gesamtsumme für Herstellung, Transport und Errichtung ausgegangen, die als Baukosten Eingang findet.
	Rohstoffversorgung	–	Die Rohstoffversorgung findet als Teil der Baukosten Eingang.
	Investition	–	Die Investition zu Beginn der Betrachtung umfasst die Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung sowie sämtliche im Zusammenhang mit dem Bau anfallenden Kosten. Im vorliegenden Projekt werden die Ausschreibung, Planung und Beauftragung sowie die Herstellung separat betrachtet.
Grund und Boden/ Grunderwerb	–	Der Straßenquerschnitt beinhaltet den Platz für die Schutzeinrichtung, Kosten für Grund und Boden sind daher der Straße zuzuordnen.	
Nutzung	Inspektion	✓	Die Inspektion umfasst die Sichtkontrolle von Fahrbahn, Schutzeinrichtung, Bewuchs und Schildern. Einen Spezialfall stellen Bauwerke dar, die einer gesonderten Überprüfung unterliegen, in deren Rahmen auch die Schutzeinrichtungen überprüft werden.
	Wartung und Instandhaltung	–	Nach den in Deutschland geltenden Regelwerken müssen Schutzeinrichtungen wartungsfrei sein. Schäden wie Risse im Beton sind im Rahmen der Gewährleistung zu reparieren. Danach sollten planmäßig keine Risse mehr auftreten. Die Beseitigung von Rissen infolge eines Anpralls fällt unter Reparatur nach Unfällen. Eine Ausnahme bilden Systeme auf Bauwerken aufgrund der Sonderbauteile zur Gewährleistung von Längenänderungen (Dilatationen). Die erforderliche Bauwerksprüfung umfasst die Schutzeinrichtung, wobei letztere einen sehr geringen Anteil ausmachen dürfte. Die Wartungskosten lassen sich nicht von den weit höheren Kosten der weiteren Bauwerksprüfung abgrenzen und werden daher vernachlässigt.
	Entwässerung	✓	Nach FRÖHLICH (1999) umfasst dies die Reinigungskosten der Entwässerungseinrichtung.
	Grünpflege	✓	Erwähnt bei z. B. FRÖHLICH (1999). Grünpflege ist der Rückschnitt des Bewuchses neben der Fahrbahn und im Mittelstreifen. Sie entfällt bei Bauwerken und hängt ansonsten von der Art der Schutzeinrichtung ab.
	Winterdienst	✓	Erwähnt bei z. B. FRÖHLICH (1999). Winterdienst umfasst die Schneeräumung der Straße mit einem dazu erforderlichen Gerät (Pflug oder Fräse).
	Sonderkonstruktionen	–	Es wird ausschließlich der Aufbau aus Standardelementen betrachtet.
	Verwaltung	✓	Verwaltungsaufwand und somit Kosten entstehen in der Regel als interne Kosten. Dies umfasst alle Prozesse und Tätigkeiten, die nicht unmittelbar bei spezifischen Tätigkeiten wie Inspektion, Reinigung etc. anfallen, also z. B. der interne Aufwand für die Ausschreibung und die Erstellung von Reparaturverträgen. Verwaltungskosten können an mehreren Stellen anfallen.
	Personalschulungen	–	Kosten für spezifische Personalschulungen fallen nur bei externen Auftragnehmern an.
Lagerung und Vorhaltung	–	Lediglich bei spezifischen Systemen aufgrund deren begrenzter Verfügbarkeit erforderlich.	

Tab. 3-1: Fortsetzung

Lebenszyklusphase	Kostenart	Betrachtung	Erläuterung
Nutzung	Kapitalkosten	–	Da es sich bei der Errichtung von Schutzeinrichtungen um eine staatliche Maßnahme handelt, wird eine vollständige Eigenfinanzierung angenommen, womit Kapitalkosten für eine Fremdfinanzierung entfallen. Im Rahmen der Kapitalwertbildung wären Fremdkapitalzinsen zudem über den Diskontierungssatz zu berücksichtigen und nicht als Kostenart.
	Reparatur nach Unfällen	✓	Erwähnt bei z. B. RAY et al. (2003), FRÖHLICH (1999), LATORRE et al. (2016), STEINAUER et al. (2004), WILLIAMS (2004), KARIM (2011), RICHARDS (2018)
	Fahrzeitverlängerung aufgrund Reparaturen	✓	Erwähnt bei z. B. STEINAUER et al., (2004), WILLIAMS (2004), KARIM (2011), RICHARDS (2018). Während Reparaturen kann es zu Verkehrseinschränkungen und somit Fahrzeitverlängerungen kommen, die externe soziale und volkswirtschaftliche Kosten verursachen.
	Personen- und Sachschäden aufgrund von Unfällen	–	Erwähnt bei z. B. RAY et al., (2003), CONELL et al. (2008), EUPAVE (2012), LATORRE et al. (2016), STEINAUER et al. (2004), WILLIAMS (2004), KARIM (2011), RICHARDS (2018). Personen- und Sachschäden werden im Rahmen der vorliegenden Studie aus Gründen der Komplexität der Thematik nicht näher beleuchtet. Zudem stellten mehrere Untersuchungen fest, dass sich diese bezogen auf den einzelnen Unfall zwischen den verschiedenen Systemen nur unwesentlich unterscheiden (siehe Kapitel 2.4).
	Umweltwirkungen	✓	Nach z. B. ISO 15686-5. Kosten der Umweltwirkungen sind den externen Kosten zuzurechnen.
Rückbau & Entsorgung	Planung des Abrisses	–	Es wird davon ausgegangen, dass die Planung des Abrisses im Rahmen einer Neuplanung erfolgt.
	Abriss und Rückbau	✓	Entsprechend z. B. DIN EN 16627. Sämtliche den Rückbau und die Entsorgung betreffenden Kosten.
	Transport	–	Nach z. B. DIN EN 16627. Es wird von einer Gesamtsumme für sämtliche den Rückbau und die Entsorgung betreffenden Kosten ausgegangen, die unter Kosten für Abriss und Rückbau erfasst werden.
	Entsorgung/ Abfallbeseitigung	–	Nach z. B. DIN EN 16627. Es wird von einer Gesamtsumme für sämtliche den Rückbau und die Entsorgung betreffenden Kosten ausgegangen, die unter Kosten für Abriss und Rückbau erfasst werden.
	Deponie-management	–	Nach DIN EN 16627 Es wird von einer Gesamtsumme für sämtliche den Rückbau und die Entsorgung betreffenden Kosten ausgegangen, die unter Kosten für Abriss und Rückbau erfasst werden.
	Abfallbehandlung/ Recycling	–	Nach z. B. DIN EN 16627. Es wird von einer Gesamtsumme für sämtliche den Rückbau und die Entsorgung betreffenden Kosten ausgegangen, die unter Kosten für Abriss und Rückbau erfasst werden.
	Gutschriften für die Wiederverwendung von Materialien/ Energierückgewinnung	✓	Es wird von einer Gesamtsumme für sämtliche den Abriss, Rückbau und die Entsorgung betreffenden Kosten ausgegangen, die unter Kosten für Abriss und Rückbau und Entsorgung erfasst werden. Es wird prinzipiell davon ausgegangen, dass Gutschriften für Recycling sich in entsprechend geringeren Gesamtkosten für Abfallbehandlung/Recycling niederschlagen. Aufgrund der z. T. hohen Gutschriften für Stahl wurde das Materialrecycling bei Stahlsystemen gesondert betrachtet.

Tab. 3-1: Fortsetzung

3.4 Berechnungsmethode

Als Berechnungsmethode für die LCC wird wie in den Normen, Richtlinien und Leitfäden (mit Ausnahme von FGSV 1997a, siehe Kapitel 2.2.3) auf die Kapitalwertmethode als Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung zurückgegriffen.

Der Kapitalwert K für ein betrachtetes Investitionsobjekt ist die Summe aus der Investition (Anfangsauszahlung I) und dem Gegenwartswert der damit verbundenen zukünftigen Zahlungsreihe. Dabei werden die über die Nutzungsdauer entstehenden Ausgaben auf den Investitionszeitpunkt abgezinst (diskontiert). Dadurch werden die Unterschiede zwi-

schen den zum Entscheidungszeitpunkt fälligen Investitionen und den im Laufe der Nutzung entstehenden Ausgaben ausgeglichen und die Gesamtkosten des Investitionsobjekts über seinen Lebenszyklus dargestellt. Ergebnis der Kapitalwertmethode ist der Nettobarwert, dessen Höhe ein Maß für die Wirtschaftlichkeit einer Investition darstellt und so verschiedene Investitionsoptionen mit unterschiedlichen Folgekosten vergleichbar macht.

Unter der Annahme einer konstanten Diskontierungsrate i und einer ebenfalls konstanten und für die einzelnen Kostenarten identischen Preissteigerungsrate m ergibt sich der Kapitalwert zu:

$$K = I + \sum_{t=0}^T \frac{A_t \cdot (1+m)^t}{(1+i)^t} \quad (\text{Gl. 1})$$

mit

K Kapitalwert

I Anfangsinvestition
(Ausgaben für die Herstellung und Errichtung)

t Periode (ein Jahr)

T Betrachtungszeitraum

A_t Auszahlungen in der Periode t

i Diskontierungszinssatz

m Preissteigerungsrate

Die Anfangsinvestition (Ausgaben für die Herstellung und Errichtung) im Ausgangsjahr ($t = 0$) geht unmittelbar in den Kapitalwert ein. Die in den Folgeperioden anfallenden Ausgaben werden jeweils entsprechend der Teuerungsrate angepasst, auf das Bezugsjahr abdiskontiert und aufsummiert. Da innerhalb der Systemgrenzen ausschließlich Ausgaben und keine Rückflüsse betrachtet werden (mögliche Erträge am Ende der Lebensdauer verringern lediglich die Entsorgungskosten), gehen per Definition alle Ausgabenbestandteile mit positivem Vorzeichen in den Kapitalwert ein.

3.5 Anwendungsbereich (untersuchte Systeme)

Die für die Betrachtung innerhalb des Forschungsvorhabens in Betracht kommenden Systeme kommen an unterschiedlichen Standorten zum Einsatz. Für die Untersuchung wurden folgende Einsatzbereiche festgelegt:

- Bundesautobahn Mittelstreifen freie Strecke,
- Bundesautobahn Mittelstreifen Bauwerk und
- Bundesautobahn Mittelstreifen beengte Verhältnisse.

Untersuchungsgegenstand des Forschungsvorhabens sind Fahrzeug-Rückhaltesysteme aus Stahl sowie Beton der Aufhaltestufe H2 nach DIN EN 1317.

Bei den Fahrzeug-Rückhaltesystemen aus Stahl handelt es sich um gerammte oder auf Fundament oder Brückenkappe verschraubte Systeme aus feuerverzinkten Stahlbauteilen. Die Herstellung der Einzelteile erfolgt teilweise durch Kaltumformen bzw. Profilieren und ggf. Verschweißen und anschließendem Verzinken. Die Einzelteile werden zur Baustelle transportiert und vor Ort montiert. Schutzeinrichtungen aus Beton können in Ortbetonbauweise (BSW O) oder aus Betonschutzwandfertigteilen (BSWF) ausgeführt werden. Bei Schutzeinrichtungen in Ortbetonbauweise wird für deren Herstellung geeigneter Frischbeton (mind. C30/37) in Gleitschalungen oder ortsfeste Schalungen auf der Baustelle in die endgültige Lage und Form eingebracht. Bei Schutzeinrichtungen aus Betonschutzwandfertigteilen werden einzelne Betonfertigteile auf die Baustelle geliefert und dort montiert. Alle Schutzeinrichtungen aus Beton sind mit Stahl bewehrt.

Von jedem Systemtyp gibt es zahlreiche Hersteller und Modelle, die in der entsprechenden Ausführungsvariante bei jedem der drei Einsatzbereiche eingesetzt werden können.

3.5.1 Untersuchte Systeme für die Datenerhebung

Um die Zahl der Systeme handhabbar zu machen und gleichzeitig die Datenverfügbarkeit und somit Möglichkeit einer Antwort im Rahmen der Datenerhebung (siehe Kapitel 3.5.2) zu erhöhen, wurden im forschungsbegleitenden Ausschuss für jeden Aufstellort die zwei gängigsten Systeme jedes Systemtyps (Brot-und-Butter-Systeme der Hersteller) ausgewählt. Um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, sollten die Systeme zudem in einer Variante für jeden der drei Aufstellorte verfügbar sein. Die für die Datenerhebung berücksichtigten insgesamt 18 häufig verbauten Schutzeinrichtungen sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

	Freie Strecke	Bauwerk	Beengte Verhältnisse
Schutzeinrichtungen aus Stahl	Super Rail (H2/W4)	Super Rail BW (H2/W4)	Super Rail VZB (H2/W3)
	Super Rail Eco (H2/W4)	Super Rail Eco BW (H2/W4)	Super Rail Eco HS (H2/W2)
Schutzeinrichtungen aus Betonschutzwandfertigteilen	DB 80F (H2/W3)	DB 80 AS-R (H2/W4)	DB 80 AS-E (H2/W1)
	NJ 85 HF ein-/doppelseitig (H2/W5)	SB 90 BW (H2/W2)	NJ 93 BK/KP doppelseitig (H2/W2)
Schutzeinrichtungen in Ortbetonbauweise	EP 80Bs (H2/W3)	EP 80BAS-R (H2/W1)	EP 80BAS-E (H2/W1)
	LT 205-10 (H2/W2)	LT 101 ME (H2/W2)	LT 205-12 (H2/W1)

Tab. 3-2: Für die Datenerhebung berücksichtigte Systeme

	Freie Strecke	Bauwerk	Beengte Verhältnisse
Schutzeinrichtungen aus Stahl	Super Rail (SE 1) und Super Rail Eco (SE 2) (je H2/W4)	Super Rail BW (SE 5) (H2/W4)	Super Rail VZB (SE 8) (H2/W3)
Schutzeinrichtungen aus Betonschutzwandfertigteilen	DB 80F (SE 3) (H2/W3)	DB 80 AS-R (SE 6) (H2/W2)	DB 80 AS-E (SE 9) (H2/W1)
Schutzeinrichtungen in Ortbetonbauweise	LT 205-10 (SE 4) (H2/W2)	LT 101 ME (SE 7) (H2/W2)	LT 205-12 (SE 10) (H2/W1)

Tab. 3-3: Für die Lebenszykluskostenanalyse ausgewählte Systeme

3.5.2 Untersuchte Systeme für die Lebenszykluskostenberechnung

In Abstimmung mit dem forschungsbegleitenden Ausschuss sollten die LCC-Berechnungen system-scharf vorgenommen werden, da die Relevanz der Kostenparameter als zu unterschiedlich eingeschätzt wurde, um die verschiedenen Systeme zu gruppieren. Ausgehend von den bei der Datenerhebung abgefragten Systemen werden daher zehn Schutzeinrichtungen für detaillierte LCC-Analysen (siehe Kapitel 6) ausgewählt. Primäres Kriterium für die Auswahl ist die Verfügbarkeit von Daten und Informationen zu den Systemen anhand der Datenerhebung und der Einzelinterviews (siehe Kapitel 3.5.2). Jedes System repräsentiert einen Aufstellort (freie Strecke, Bauwerk und beengte Verhältnisse) und eine Systemart (Schutzeinrichtungen aus Stahl, Betonschutzwandfertigteilen und in Ortbetonbauweise). Für Schutzeinrichtungen aus Stahl und den Aufstellort freie Strecke wurden die zwei Systeme Super Rail sowie Super Rail Eco gewählt, da beide in der Praxis häufig eingesetzt werden.

Da es in dem Projekt nicht um einen konkreten Systemvergleich zwischen einzelnen Schutzeinrichtungen geht, sondern um eine grundlegende Datener-

hebung anhand gängiger Systeme, werden die ausgewählten Systeme in Tabelle 3-3 nummeriert. In den späteren Auswertungen wird zur Kennzeichnung der Systeme diese Nummer verwendet, so dass der Fokus weniger auf den spezifischen Werten einer konkreten Schutzeinrichtung liegt, sondern insbesondere die Relevanz der einzelnen Kostenarten für verschiedene Systemarten und deren Einfluss auf die Lebenszykluskosten im Vordergrund stehen.

4 Datenerhebung

Mit der Datenerhebung sollten die relevanten Eingangsgrößen und Parameter zur Berechnung der Lebenszykluskosten für die in Deutschland regelmäßig eingesetzten Schutzeinrichtungssysteme ermittelt werden. Die Erhebung erfolgte daher für die in Kapitel 3.5.1 aufgeführten Systeme.

Mittels eines eigens entwickelten Fragebogens wurden die zu betrachtenden Kostenparameter (siehe Kapitel 3.3) zur Berechnung der Lebenszykluskosten abgefragt. Nach einer Plausibilitätsprüfung wurde versucht, anhand der vorhandenen Daten geeignete Werte als Eingangsparameter zu bestimmen. Diese wurden zunächst dem forschungsbegleitenden Ausschuss vorgestellt, dort durch die Einschätzung der Experten verifiziert und ergänzt. Verbleibende Fragen wurden daraufhin so weit wie möglich in Einzelinterviews geklärt.

Die Ergebnisse der Datenerhebung und Interviews bilden zusammen mit den Fachauskünften aus dem forschungsbegleitenden Ausschuss, sowie Informationen im Rahmen des Workshops die Basis zur Festlegung der Grundlagendaten in Kapitel 5.

4.1 Verwendete Fragebogen

Die Datenerhebung wurde mittels Fragebogen im Excel-Format durchgeführt. Den Erhebungsteilnehmern wurde die Datei per E-Mail übermittelt. Die E-Mail enthielt ein Anschreiben mit der Motivation für die Erhebung und einer Anleitung zur Teilnahme. Des Weiteren war ein Schreiben der Bundesanstalt für Straßenwesen beigefügt, in dem ebenfalls die Motivation zur Erhebung beschrieben und für die Teilnahme an der Erhebung geworben wurde. Die Antwort mit dem ausgefüllten Fragebogen erfolgte ebenfalls über E-Mail an den Forschungsnehmer.

Der Erhebungsbogen enthielt Hinweise zum Ausfüllen des Fragebogens. Hier wurde erklärt, wie der Fragebogen auszufüllen ist und wie dieser an den Forschungsnehmer zurückgesendet werden konnte. Ebenfalls wurden hier Ansprechpartner für eventuelle Rückfragen genannt. Weiterhin war ein Beispielbogen enthalten. An diesem konnten die Teilnehmer sich hinsichtlich der Art und Weise, wie der Fragebogen auszufüllen war, orientieren. Für jede Schutzeinrichtung, zu der Angaben gemacht wurden, sollten die Teilnehmer einen neuen Fragebogen ausfüllen, sodass sich die Informationen inner-

halb eines Fragebogens immer auf eine Schutzeinrichtung an einem Standort bezogen.

Zunächst konnten durch den Teilnehmer allgemeine Angaben zur Firma/Behörde, den Ansprechpartner und der Adresse bzw. den Kontaktinformationen angegeben werden. Als nächstes sollte von den Erhebungsteilnehmern die Schutzeinrichtung benannt werden, auf welches sich in dem Fragebogen bezogen wurde und es sollten Angaben zum Aufstellort (freie Strecke/Bauwerk/beengte Verhältnisse) und weitere Angaben zur Einordnung des Systems (einseitig/doppelseitig etc.) gemacht werden. Die nächsten Abfragen sollten den genauen Standort im Straßennetz lokalisieren und den Einsatz im Mittelstreifen oder am Fahrbahnrand³ erklären. Zudem wurden die Länge und das Jahr des Einbaus abgefragt. Im Anschluss an diese Angaben konnten von den Erhebungsteilnehmern noch Bemerkungen oder Besonderheiten zu den ausgewählten Maßnahmen angegeben werden.

Der eigentliche Hauptteil des Fragebogens folgte dann mit der Aufforderung an die Teilnehmer Kosten für definierte Kostenkomponenten anzugeben, die im angegebenen Bereich durch die Schutzeinrichtungen entstanden sind bzw. entstehen werden. Die einzelnen abgefragten Kostenkomponenten waren Kosten für:⁴

- Ausschreibung, Planung und Beauftragung der Schutzeinrichtung,
- Baukosten der Schutzeinrichtung mit Lieferung, Herstellung inkl. Material, Transport, Ein-/Aufbau und ggf. Erforderliche Nebenleistungen,
- Inspektion der Schutzeinrichtung pro Jahr,
- Reparaturen an der Schutzeinrichtung pro Jahr (ohne die Reparaturen infolge von Unfällen),
- Reinigung der Schutzeinrichtung pro Jahr,
- Grünpflege an der Schutzeinrichtung pro Jahr,

³ Für die Umfrage wurde noch ein offener Ansatz mit beiden Möglichkeiten verfolgt, auch da hierdurch die Wahrscheinlichkeit einer Antwort deutlich erhöht wurde.

⁴ Da die Umfrage zu einem relativ frühen Zeitpunkt im Projektverlauf durchgeführt wurde, wurden die in der Anfangsphase als relevant erachteten Kostenarten berücksichtigt. Zum Teil wurden die Kostenarten im weiteren Projektverlauf nochmals angepasst, so dass dies nicht den letztlich betrachteten Kostenarten entspricht.

- Winterdienst an der Schutzeinrichtung pro Jahr,
- Entwässerung der Schutzeinrichtung pro Jahr (z. B. Reinigung der evtl. vorliegenden Entwässerungseinrichtungen),
- Verwaltung der Schutzeinrichtungen pro Jahr,
- Demontage der Schutzeinrichtung und
- Entsorgung/Abfallbeseitigung der Schutzeinrichtung.

Die Kosten konnten entweder als Pauschalbetrag in Euro angegeben werden oder über eine eingebaute Funktion anhand von Angaben zu Personal- und Sachkosten, Arbeitsstunden etc. im Dokument berechnet werden. Zu jeder Kostenkomponente sollte für die Einrechnung der Inflation das Jahr, in dem die Kosten entstanden sind, angegeben werden, und wie die jeweiligen Kosten in den Jahren zuvor ausgefallen sind, wenn es sich nicht um einmalige Kosten handelte. Dies sollte eine Entwicklung der Kosten über mehrere Jahre ermöglichen. Weiterhin sollte für die angegebenen Betriebskosten eingeschätzt werden, ob und inwiefern die Art der Schutzeinrichtung die Kosten beeinflusst.

Abschließend sollten die Erhebungsteilnehmer noch Angaben zu den Reparaturen machen, die an der Schutzeinrichtung aufgrund von Unfällen durchzuführen waren. Hierbei konnten die Kosten ebenfalls pauschal über einen Zeitraum oder für jeden Einzelunfall angegeben werden. Die Kosten konnten auch hier über eine Kostenberechnung in der Datei berechnet werden. Ebenso sollten das Jahr, in dem die Kosten angefallen sind, sowie die Dauer, das Datum und die Tageszeit der Reparatur angegeben werden. Auch eine mögliche Einwirkung auf die Fahrstreifenanzahl oder die zulässige Geschwindigkeit vom Zeitpunkt des Unfalls bis zur Reparatur wurden abgefragt.

4.2 Umfang der Datenerhebung

Der geografische Erhebungsbereich ist Deutschland. Datenlieferanten sind ausschreibende Stellen, Hersteller, Montagebetriebe, Gütegemeinschaften sowie für Betrieb und Erhaltung der Systeme zuständige Behörden bzw. Verwaltungen. Angefragt wurden insgesamt 224 verschiedene Stellbeeren. Dabei wurden vor allem bei den ausschreibenden Stellen und Betriebsdienststellen/Meistereien oftmals übergeordnete Stellen angefragt, die die Anfrage

dann an z. T. mehrere Unterabteilungen weitergeleitet haben.

Es erwies sich als schwierig, einen praxisgerechten Fragebogen zu gestalten, der die jahresbezogene Abfrage aller relevanten Betriebskosten in der gewünschten Detailtiefe ermöglichte. Vielfach konnten die abgefragten Kostenarten nicht eindeutig zugeordnet oder separat ausgewiesen werden. Der Rücklauf war entsprechend geringer als erwartet, da das korrekte Ausfüllen für die Teilnehmer mit hohem Aufwand verbunden war.

Insgesamt haben 27 Stellen mit verwertbaren, teilweise auch mit mehreren Fragebogen, geantwortet, sodass zum Ende der Erhebung Daten von insgesamt 52 Streckenabschnitten vorlagen. Eine Übersicht über die Anzahl der Antworten und die Systeme, zu denen jeweils Antworten eingegangen sind, liefert Tabelle 4-1. Die überwiegende Anzahl der Antworten stammt danach von Straßenbauverwaltungen. Tabelle 4-2 können die zu den verschiedenen Systemen jeweils eingegangenen Rückmeldungen entnommen werden.

Es wurden demnach mehrere Angaben zu Systemen eingereicht, die nicht in der Auswahlliste enthalten waren, sowie Angaben zu Systemen gemacht, die nicht in der eigentlich vorgesehenen Gruppe enthalten waren. So konnten insgesamt zehn Fragebogen zum Aufstellort „Bauwerk“ verzeichnet werden, bei denen das System eigentlich der Gruppe „freie Strecke“ oder „beengte Verhältnisse“ zugeordnet war. Diese Fragebogen wurden in Absprache mit dem forschungsbegleitenden Ausschuss den eigentlichen Gruppen zugeordnet.

Bei unklaren Angaben in den Fragebogen oder anderweitigen Rückfragen hinsichtlich der Fragebogen wurden die darin genannten Ansprechpartner per E-Mail oder telefonisch kontaktiert, um die Angaben zu konkretisieren.

Wie die Übersicht in Tabelle 4-2 zeigt, ist die Datengrundlage, auf der die weiteren Untersuchungen

	Angefragt	Rückläufer
Ausschreibende Stellen	17	12
Hersteller	19	3
Montagebetriebe	61	3
Betriebsdienste/Meistereien	127	9

Tab. 4-1: Übersicht über die Anzahl der Antworten

Systemart	Freie Strecke	Bauwerk	Beengte Verhältnisse
Stahl	Super Rail (8)	Super Rail BW (5)	Super Rail VZB (3)
	Super Rail Eco (13)	Super Rail Eco BW (4)	Super Rail Eco HS (1)
BSWF	DB 80F (3)	DB 80 AS-R (1)	DB 80 AS-E (0)
	NJ 85 HF ein-/doppelseitig (0)	SB 90 BW (1)	NJ 93 BK/KP doppelseitig (0)
BSWO	EP 80Bs (0)	EP 80BAS-R (0)	EP 80BAS-E (1)
	LT 205-10 (3)	LT 101 ME (3)	LT 205-12 (2)
	LT 104 (1)	LT 104 ME (1)	Super Rail Eco HS BW (1)
	NJ 93 BK (1)		

Die Zahlen in Klammern geben die Anzahl der Rückläufer an.

Tab. 4-2: Übersicht über den Eingang von Fragebogen

basieren, eher klein. Daher sind die nachfolgenden Darstellungen exemplarisch zu betrachten und nicht pauschal auf andere Anwendungsfälle übertragbar.

4.3 Auswertung

Die Daten wurden nach den Aufstellorten (freie Strecke/Bauwerk/beengte Verhältnisse) sortiert und die angegebenen Kosten durch die jeweilige Länge des Streckenabschnitts dividiert, um die Kosten je Kilometer als funktionaler Einheit zu erhalten.

Für die Auswertung der Datenerhebung wurden die systemspezifischen Minimal- und Maximalwerte angegeben sowie die jeweiligen Mediane bestimmt. Der Median wurde angesichts der erheblichen Streubreite der Werte verwendet, da hierbei stark abweichende Extremwerte das Ergebnis nicht beeinflussen. Die Ergebnisse der Rückläufer aus den Fragebogen sind zusammengefasst im Anhang dargestellt.

Die sich aus der Auswertung der Fragebogen ergebenden Werte wurden durch den forschungsbegleitenden Ausschuss verifiziert. Da zahlreiche Kostangaben insbesondere für die Betriebskosten nicht abschließend bestätigt werden konnten, wurden weitere Einzelinterviews zu den betreffenden Kostenarten durchgeführt, welche das nachfolgende Kapitel 4.4 beleuchtet.

4.4 Einzelinterviews

Insbesondere die Angaben zu den Nutzungskosten wiesen im Rahmen der Datenerhebung eine sehr hohe Streubreite auf bzw. wurden zu einzelnen Nut-

zungskosten zum Teil nur sehr vereinzelt Angaben gemacht. Dies betraf die Themen Inspektion, Reinigung der Entwässerung, Grünpflege, Winterdienst sowie Reparatur nach Unfällen. Daher wurden diese durch direkte Telefongespräche nochmals gezielt abgefragt. Um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten, das die Bandbreite der spezifischen regionalen Bedingungen berücksichtigt, wurden Behörden und Meistereien aus verschiedenen Bundesländern kontaktiert. Die Erkenntnisse aus den Einzelinterviews finden Eingang in die Festlegung der Grundlagendaten für die genannten Nutzungskosten.

5 Festlegung der Grundlagendaten

Zur Festlegung der Grundlagendaten werden die im Projektverlauf erfassten Daten für jede Kostenart zusammenfassend bewertet und daraus die für die Berechnung der Lebenszykluskosten verwendeten Eingangswerte abgeleitet. Dabei werden Literaturdaten, die Auswertung der Datenerhebung und der Einzelinterviews, die Fachinformationen der Mitglieder des forschungsbegleitenden Ausschusses sowie die Ergebnisse des Expertenworkshops berücksichtigt. Die mithilfe der Fragebogen gesammelten Daten wurden durch die Autoren, die BASt sowie den forschungsbegleitenden Ausschuss plausibilisiert und ggf. durch weitere Datenlieferungen einzelner Mitglieder des forschungsbegleitenden Ausschusses verifiziert und ergänzt. Die Werte erfuhren somit im Projektverlauf zum Teil mehrfache Korrekturen und Überarbeitungen. Aus den gesammelten Informationen werden in diesem Kapitel die Parameter abgeleitet, welche als Eingangsgrö-

ßen für die LCC-Berechnungen in Kapitel 6 verwendet werden.

Die verwendeten Kostenarten entsprechen den in Tabelle 3-1 aufgeführten Kostenarten, die für die weitere Untersuchung betrachtet werden sollten. Da die Berechnung der Lebenszykluskosten für zehn exemplarische Schutzeinrichtungen durchgeführt wird (vgl. Tabelle 3-3), werden im Folgenden insbesondere die Ableitung und Begründung der Werte für diese Systeme dargestellt.

Als Vergleichsbasis für die Berücksichtigung einer Kostenart wurde die Straße ohne Schutzeinrichtung festgelegt. Für jede Kostenart sind daher ausschließlich die durch die Schutzeinrichtung bedingten (Mehr-)Kosten relevant. Sofern durch das Vorhandensein einer Schutzeinrichtung keine (nennenswerten) Kostenänderungen zu erwarten sind, wird eine Kostenart nicht berücksichtigt.

Die Mehrkosten für eine Kostenart werden auch dann berücksichtigt, wenn diese über alle Systeme (nahezu) gleich sind. Soweit möglich werden sämtliche LCC-relevanten Kosten betrachtet, was die Gesamtkosten im Vergleich zu einer selektiven Betrachtung, bei der nur die Kostenunterschiede zwischen den Systemen eingehen, erhöht

Es werden sämtliche LCC-relevanten Kosten betrachtet, d. h. eine Kostenart wird auch dann berücksichtigt, wenn die Kosten über alle Systeme (nahezu) gleich sind. Im Vergleich zu einer selektiven Betrachtung, in die nur die Kostenunterschiede zwischen den Systemen eingehen, führt dies zu höheren Gesamtkosten, wodurch wiederum die Anteile der einzelnen Kostenarten als auch die relativen Kostenunterschiede zwischen den Systemen geringer ausfallen.

5.1 Ökonomische Parameter

Sämtliche Nutzungskosten werden entsprechend der mittleren Änderung des Verbraucherpreisindex über die letzten zehn Jahre mit einer jährlichen Preissteigerung in Höhe von 1,4 % beaufschlagt (Destatis, 2019). Eine wesentlich davon abweichende Annahme zur Preissteigerung bei Stahl, wie sie von manchen Experten vorgeschlagen wurde, lässt sich aus dem Preisverlauf für Schutzeinrichtungen aus Stahl über die letzten zehn Jahre nicht ableiten (Destatis, 2019). Die Diskontierungsrate wird in Abstimmung mit dem forschungsbegleitenden Ausschuss entsprechend der DIN EN 16627 mit 3 % angenommen.

Für eine einheitliche und vergleichbare Darstellung wurden alle in den folgenden Unterkapiteln dargestellten Kostenangaben anhand der mittleren Preissteigerungsrate auf Kosten₂₀₁₈ umgerechnet.

5.2 Bau

Die aus den Rückläufen der Datenerhebung durch die Berechnung der Medianwerte ermittelten Baukosten wurden durch den forschungsbegleitenden Ausschuss verifiziert. Änderungen ergaben sich insbesondere für beengte Verhältnisse, da die Angaben hier vermuten ließen, dass das teilweise dazugehörige Fundament nicht durchgehend einberechnet wurde. Dieses ist jedoch systembedingt und somit den Baukosten der Schutzeinrichtung zuzuordnen. Die Baukosten enthalten jedoch keine Kosten für Verkehrssicherung, da angenommen wurde, dass die Schutzeinrichtung zeitgleich mit dem Neu- oder Umbau der Straße stattfindet und somit kein Verkehr vorhanden ist (siehe auch Kapitel 3.3). Tabelle 5-1 gibt eine Übersicht über die gewählten Baukosten der zehn betrachteten Systeme, die für die Berechnungen verwendet wurden.

5.3 Ausschreibung, Planung und Beauftragung

Im Rahmen der Datenerhebung wurden die Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung zwischen 1.023 € und 101.800 € je Streckenabschnitt ermittelt. Aufgrund der hohen Varianz und der er-

Aufstellort	Schutzeinrichtung	Baukosten (€/km)
Freie Strecke	SE 1	86.590
	SE 2	51.590
	SE 3	102.180
	SE 4	67.260
Bauwerk	SE 5	145.000
	SE 6	170.000
	SE 7	205.071
Beengte Verhältnisse	SE 8 ¹	110.000
	SE 9	130.000
	SE 10	84.000
¹ inkl. Fundament		

Tab. 5-1: Baukosten der betrachteten Schutzeinrichtungen

heblichen Unsicherheiten hinsichtlich der allgemeinen Abschätzung dieser Kostenart wurde vom forschungsbegleitenden Ausschuss beschlossen, die Kosten gemäß der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI, 2013) auf Basis der Baukosten zu ermitteln.

Die HOAI gibt abhängig von der Höhe der anrechenbaren Kosten den zulässigen Bereich der Honorare für Planung, Vergabe und Bauleitung vor. Es wird davon ausgegangen, dass die Schutzeinrichtung gemeinsam mit der Straße geplant und ausgeschrieben wird und die Leistungen in der Regel nicht von denen für die Straße abgrenzbar sind. Daher werden die Planungskosten für den Bau der Schutzeinrichtung anhand der HOAI-Honorarsätze für den Bau der Straße abgeschätzt.⁵ Als anrechenbare Kosten werden dabei vereinfacht die Baukosten für Autobahnen von 6 Mio. €/km für freie Strecken und 20 Mio. €/km für Bauwerke angesetzt (Verkehrsrundschau, 2014). Beengte Verhältnisse werden wie freie Strecke behandelt. Die entsprechend zulässigen Honorare finden sich für Straßen (freie Strecke und beengte Verhältnisse) in Abschnitt 4 Verkehrsanlagen und für Bauwerke unter Abschnitt 3 Ingenieurbauwerke. Es wird jeweils die Honorarzone IV (außerörtliche Straßen mit vielen besonderen Zwangspunkten bzw. schwierige Brücken und Tunnelbauwerke) angenommen. Es ergibt sich ein mittleres Honorar von 6 % der Baukosten für freie Strecke und beengte Verhältnisse und 4,7 % für Bauwerke. Diese Anteile werden nun auf die im Rahmen des Vorhabens ermittelten Baukosten der Schutzeinrichtungen bezogen. Damit ergeben sich die in Tabelle 5-2 dargestellten Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung.

Gemäß HOAI werden die zulässigen Planungskosten mit steigenden Baukosten relativ gesehen geringer. Es ist davon auszugehen, dass mit dem vorliegenden Ansatz die Planungskosten tendenziell überschätzt werden, da die geplanten Streckenabschnitte in der Regel wesentlich länger sind als ein Kilometer. Auch liegen die Baukosten für Autobahnen zum Teil wesentlich höher und wurden hier stark vereinfacht angenommen. Unter der Voraussetzung, dass die Planung und Ausschreibung für

Aufstellort	Schutzeinrichtung	Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung €/km
Freie Strecke (6,0 %, Honorarzone IV)	SE 1	5.195
	SE 2	3.095
	SE 3	6.131
	SE 4	4.036
Bauwerk (4,7 %, Honorarzone IV)	SE 5	6.815
	SE 6	7.990
	SE 7	9.638
Beengte Verhältnisse (6,0 %, Honorarzone IV)	SE 8	6.600
	SE 9	7.800
	SE 10	5.040

Tab. 5-2: Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung auf Basis der (HOAI, 2013)

einen Streckenabschnitt mit allen Teilstrecken (freier Strecke, beengte Verhältnisse und Bauwerk) gemeinsam erfolgt, ist die Überschätzung der Planungskosten gleichermaßen für alle Aufstellorte anzunehmen. Dies kann z. B. im Falle einer Brückensanierung aufgrund der sehr kurzen Strecke (in aller Regel deutlich unter einem Kilometer) anders sein. Eine Berücksichtigung der tatsächlichen Verhältnisse ist jedoch im Rahmen der hier vorgenommenen Abschätzung der Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung nicht sinnvoll möglich.

5.4 Inspektion

Die Inspektion der Schutzeinrichtungen erfolgt im Rahmen der Streckenkontrolle durch den Straßenbetriebsdienst. Gemäß den Rückläufen der Datenerhebung unterscheiden sich Häufigkeit und Aufwand der Inspektion für verschiedene Streckenabschnitte. Weitergehende Nachfragen ergaben indes, dass sich die Kosten der Inspektion der Schutzeinrichtung nicht von den Kosten der allgemeinen Streckeninspektion abgrenzen lassen, während derer die gesamte Strecke einschließlich der Schutzeinrichtungen inspiziert wird. Der auf die Schutzeinrichtung entfallende Kostenanteil wird durchgehend als sehr gering eingeschätzt, zudem lassen sich die Kosten nicht für verschiedene Systemarten oder Aufstellorte unterscheiden.

Als Ergebnis der Sitzungen des forschungsbegleitenden Ausschusses und des Workshops wird ver-

⁵ Die nach HOAI zulässigen Honorarsätze sinken mit steigendem Bauvolumen relativ gesehen deutlich. Die ausschließliche Berücksichtigung der Baukosten der Schutzeinrichtung würde somit in deutlich überhöhten Planungskosten resultieren.

einbart, dass Inspektionskosten in den weiteren Berechnungen keine Berücksichtigung finden, da der auf die Schutzeinrichtung zurückzuführende Anteil als vernachlässigbar klein eingestuft wird.

5.5 Kehren

Die Kehrkosten bei einem offenen System unterscheiden sich nicht von denen einer Straße ohne Schutzeinrichtung. Ist hingegen eine geschlossene Schutzeinrichtung vorhanden, steigt der Aufwand für das Kehren, da sich der Schmutz vor der geschlossenen Schutzeinrichtung sammelt und nicht wie bei offenen Systemen über den Straßenrand hinweg ausgetragen werden kann.

Nach Auskunft eines beteiligten Landesbetriebs für Straßenbau betragen die Kosten für Kehrarbeiten vor einer offenen Schutzeinrichtung 37,69 €/km und vor einer geschlossenen Schutzeinrichtung 69,21 €/km. Die Angaben beziehen sich auf einen Kehrvorgang. Es wird angenommen, dass die Kosten der Verkehrssicherung in beiden Fällen in gleicher Höhe anfallen, daher können sie vernachlässigt werden. Somit ergeben sich aus der Differenz Mehrkosten von 31,52 €/km je Kehrvorgang. Bei einer durchschnittlichen Kehrhäufigkeit von dreimal pro Jahr ergeben sich somit Mehrkosten von 94,56 €/(km*a) für die betrachteten geschlossenen Betonsysteme im Vergleich zu den offenen Stahlenschutzplanken bzw. keiner Schutzeinrichtung.

5.6 Entwässerung

Unter Kosten der Entwässerung versteht z. B. FRÖHLICH (1999) die Kosten zur Reinigung der Entwässerungseinrichtungen, wie sie dann auch im Rahmen der Datenerhebung abgefragt wurden. Im Rahmen der weiteren Expertengespräche stellte sich jedoch heraus, dass die Notwendigkeit einer Entwässerungseinrichtung in allererster Linie von der Straßenform abhängt. Damit besteht kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein einer Schutzeinrichtung und der Notwendigkeit einer Entwässerungseinrichtung. Die Kosten für deren erforderliche Reinigung können somit nur in wenigen Fällen ursächlich der Schutzeinrichtung zugeordnet werden, womit diese Kostenart für die vorliegende Untersuchung entfällt.

Bei einer konkreten Maßnahme können dennoch durch die Schutzeinrichtung bedingte Kosten für die

Reinigung der Entwässerung entstehen, je nachdem, welche Variante dort vorliegt. Diese Kosten können jedoch hier nicht pauschal beziffert, sondern müssen im jeweiligen Einzelfall separat berücksichtigt werden.

5.7 Grünpflege

Die Grünpflege setzt sich aus den Aufgaben Mähen, Bodenabtrag und Gehölzpflege zusammen. Bei Schutzeinrichtungen auf Bauwerken ist grundsätzlich keine Grünpflege erforderlich, ebenso bei beengten Verhältnissen bei Betonsystemen. Da das Stahlsystem bei beengten Verhältnissen auf einem Fundament steht, fallen bei den betrachteten Systemen auch für beengte Verhältnisse keine Grünpflegekosten an. Somit ist die Grünpflege ausschließlich auf freier Strecke relevant.

Dabei besteht nach übereinstimmender Auffassung des forschungsbegleitenden Ausschusses ein Zusammenhang zwischen der Art der Schutzeinrichtung und den mit der Grünpflege verbundenen Kosten.⁶ Beim Mähen von Abschnitten mit Schutzeinrichtungen aus Stahl steigen die Kosten mit kürzerem Pfostenabstand, da das Ein- und Ausschwenken des Mäharms jeweils Zeit benötigt. Bei den betrachteten BSW handelt es sich zwar nicht um Trogbauweisen, allerdings kann auch zwischen den BSW in Mittellage Grünpflege notwendig sein. Da das Grün hierbei allerdings eine längere Zeit benötigt, um hochzuwachsen, wird für die Grünpflege bei BSW eine geringe Häufigkeit veranschlagt.

Aus der Datensammlung ergibt sich als Median der Grünpflegekosten bei Stahlenschutzplanken auf freier Strecke ein Wert von rund 1.000 €/(km*a). Es wird bei Stahlsystemen von einer Grünpflege zweimal jährlich ausgegangen, bei Systemen aus Beton hingegen nur von einmal jährlich, womit sich die Grünpflegekosten bei den beiden Betonsystemen auf 500 €/(km*a) reduzieren. Die Kosten beinhalten auch die Kosten für die erforderliche Verkehrsabsicherung.

⁶ Die Art der Bepflanzung (z. B. Gräser oder Büsche) kann sich ggf. deutlich stärker auf den für die Grünpflege erforderlichen Aufwand auswirken als die Art der Schutzeinrichtung. Dies konnte jedoch für die vorliegenden exemplarischen Betrachtungen nicht berücksichtigt werden.

Ein Wert für die Grundkosten der Grünpflege ohne Schutzeinrichtung kann nicht angegeben werden, da im Mittelstreifen von Autobahnen stets eine Schutzeinrichtung vorhanden ist. Die Grundkosten für den Mittelstreifen werden daher mit Null (keine Grünpflege) angesetzt. Bei einer Betrachtung des Seitenstreifens wären diese Grundkosten jedoch zu bestimmen, um die durch die Schutzeinrichtung bedingten Mehrkosten auszuweisen.

5.8 Bankettschälen

Während des Workshops wurde als weiterer Kostenfaktor das Bankettschälen angesprochen. Das Schälen wird auf freier Strecke in einem 10-Jahres-Intervall an Straßen ohne oder mit offenen Systemen durchgeführt. Bei Autobahnen wird es im Seiten- und Mittelstreifen durchgeführt, allerdings häufiger im Seiten- als im Mittelstreifen. Hierbei ist der Aufwand mit Schutzeinrichtung grundsätzlich höher als ohne, wobei der Pfostenabstand als maßgebliche Größe identifiziert wurde. Auf dem Workshop wurden für das Schälen ohne Schutzeinrichtung Kosten in Höhe von 2.000 – 3.000 €/km genannt. Angaben über den zusätzlichen Aufwand bei offenen Systemen liegen jedoch nicht vor. Weiterhin kostet die Entsorgung des Bankettschälguts 30 €/t. Es konnten jedoch keine Informationen über die Menge des Schälguts bestimmt werden, da diese von der Breite und Dicke des zu schälenden Bereichs bestimmt wird.

Anhand der verfügbaren Informationen wird vereinfacht angenommen, dass ohne eine Schutzeinrichtung Kosten von 2.000 €/km, bei offenen Systemen von 3.000 €/km, und bei geschlossenen Systemen keine Kosten für das Bankettschälen entstehen. Da die Straße ohne Schutzeinrichtung den Vergleichsfall bildet, ergeben sich bei gleichmäßiger Verteilung der Kosten über die Jahre eine Einsparung für geschlossene Systeme von 200 €/(km*a) und Kosten für offene Systeme von 100 €/(km*a) (2.000 € Einsparung bzw. 1.000 € Mehrkosten alle 10 Jahre).

Aufgrund der mangelnden Datengrundlage und der hohen Unsicherheit hinsichtlich der Menge an Bankettschälgut konnte in dieser Studie keine detailliertere Betrachtung der Kosten für Bankettschälen erfolgen.

5.9 Winterdienst

Für den Winterdienst wird ausschließlich die Schneeräumung betrachtet, da das Salzstreuen unabhängig von der Schutzeinrichtung durchgeführt werden kann. Diese erfolgt prinzipiell von der Mitte zum Seitenstreifen hin. Da sich die vorliegende Untersuchung auf den Mittelstreifen beschränkt, hat das dort vorhandene System keinen Einfluss auf die Winterdienstkosten, die somit für die Berechnungen nicht berücksichtigt wurden.

Bei Betrachtung des Seitenstreifens kann die Bauweise der Schutzeinrichtung (offen oder geschlossen) die Höhe der Winterdienstkosten beeinflussen. Auf einer Bundesautobahn ohne Schutzeinrichtung werden prinzipiell Schneepflüge eingesetzt. Auch mit Schutzeinrichtung wird unabhängig vom System der Schnee zunächst auf den Seitenstreifen geschoben. Bei offenen Systemen kann der Schnee bis zu einer gewissen Menge unter dem System durchgeschoben werden. Bei mehr Schnee muss dieser jedoch wie bei geschlossenen Systemen mit einer Fräse geräumt werden. Als Zusatzkosten aufgrund einer Schutzeinrichtung für den Winterdienst am Seitenstreifen könnte daher die Kostendifferenz zwischen Pflug und Fräse angesetzt werden, auch wenn bei einem Wegfall der Schutzeinrichtung auf dem Streckenabschnitt in der Praxis dasselbe Gerät (die Fräse) zur Räumung des Seitenstreifens beibehalten wird. Die Kosten wären dabei unabhängig vom verwendeten System identisch.

Die Kosten für den Winterdienst hängen jedoch wesentlich stärker von den geografischen Bedingungen (vier Schneelastzonen in Deutschland) ab, die sich auf die Häufigkeit des Winterdienstes auswirken, sowie insbesondere der Fahrstreifenanzahl. In der Praxis schwanken jedoch die Schneemengen und somit auch die Winterdienstkosten auch innerhalb einer Zone stark. Zudem werden die Arbeiten oft durch einen eigenen Bereitschaftsdienst ausgeführt, dessen Kosten nicht für einzelne Tätigkeiten angegeben werden können. Im Vergleich zur Schutzeinrichtung wirken sich andere Parameter somit deutlich stärker auf die Winterdienstkosten aus. Dies spricht nach Ansicht der Autoren dafür, Winterdienstkosten bei den Lebenszykluskosten für Schutzeinrichtungen generell aus der Betrachtung auszuklammern.

Sofern bei einer Betrachtung des Seitenstreifens im Einzelfall dezidierte Angaben zu Kostenunterschieden für den Winterdienst aufgrund unterschiedli-

cher Systeme verfügbar wären, müssten diese im spezifischen Anwendungsfall ggf. zusätzlich berücksichtigt werden.

5.10 Verwaltung

Auch der Betrieb von Schutzeinrichtungen ist mit verwaltungsinternen Prozessen verbunden, durch die Verwaltungskosten entstehen. Die durch die Schutzeinrichtung bedingten Kosten sind in der Regel nicht von den Verwaltungskosten für die Straße insgesamt abgrenzbar, die wesentlich mehr Prozesse umfassen und daher deutlich höher liegen.

Lediglich zwei Rückläufe der Datenerhebung weisen pauschal einmalige Verwaltungskosten von 500 € pro Systemabschnitt aus. Die Mehrheit der Umfrageteilnehmer verneint das Entstehen spezifischer Verwaltungskosten für die Schutzeinrichtung und/oder sieht die Verwaltungskosten als unabhängig von der Schutzeinrichtung. Dies wird durch die Einschätzung des forschungsbegleitenden Ausschusses gestützt, dass die Verwaltungskosten weniger von der Schutzeinrichtung, sondern wahrscheinlich eher von der Verwaltungsorganisation abhängen. Als Kostenart können Verwaltungskosten daher vernachlässigt werden.

5.11 Reparatur nach Unfällen

Bei der Datenerhebung zeigten sich erhebliche Unterschiede bei den Angaben zu den Reparaturkosten einzelner Unfälle als auch der jährlichen Reparaturkosten. Es wurde deutlich, dass die Reparaturkosten schwierig zu ermitteln und nur bedingt vergleichbar sind. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass die Kosten der Verkehrssicherung in den Reparaturverträgen unterschiedlich geregelt sind. Diese kann im Reparaturvertrag enthalten sein oder als separater Vertrag abgeschlossen werden, z. T. erfolgt die Verkehrssicherung auch durch die Autobahnmeistereien selbst. Zudem hängt die Art der Absicherung nach ASR A5.2 auch von der Baustellenorganisation (als Baustelle längerer oder kürzerer Dauer) ab, wodurch die Kosten für Verkehrssicherung auch bei der Reparatur eines vergleichbaren Schadens ggf. unterschiedlich ausfallen können. Weiterhin können die Unfallhäufigkeit und -schwere und somit der jährliche Reparaturbedarf auf verschiedenen Streckenabschnitten sehr unterschiedlich sein.

Aufgrund dieser methodischen Unsicherheiten wurde zur Abschätzung der Kosten für Reparaturen nach Unfällen ein anderer Ansatz gewählt. Nach gemeinsamer Auffassung des forschungsbegleitenden Ausschusses gibt es standardisierte Anprallsituationen, die in der DIN EN 1317 vorgegeben sind und aus denen sich die Reparaturkosten ableiten lassen. Hinsichtlich der Schwere des Unfalls sollte zwischen Pkw- und Lkw-Unfällen unterschieden werden, da sich das jeweilige Schadensausmaß beträchtlich unterscheidet.

In aller Regel werden die Schutzeinrichtungen nach den Regelungen der ZTV FRS (FGSV, 2017) so repariert, dass die beschädigten Elemente ausgetauscht werden (bei Super Rail evtl. auch nur einzelne Bauteile). Der Schaden richtet sich damit primär nach der Länge des auszutauschenden Abschnitts, die von der Schwere des Unfalls (auf welcher Länge wird die Schutzeinrichtung beschädigt) sowie der Länge der Systemelemente abhängt. Die auszutauschende Länge im Rahmen einer Standardreparatur wurde daher anhand der Prüfberichte der Anprallprüfungen TB 11 (Pkw) und TB 51 (Lkw) nach DIN EN 1317 für Anfahrten an den hier betrachteten Schutzeinrichtungen ermittelt. Bei den Systemen von DELTABLOC wird nach den Versuchen ein Austausch notwendig, bei den Systemen von LineTech hingegen nicht. Dies liegt insbesondere in den Wirkungsbereichen der verschiedenen Systeme begründet. DELTABLOC-Systeme werden bei einem Anprall oftmals weiter verschoben, so dass hierbei ein Austausch notwendig wird.

Die Reparaturkosten bei einem Pkw- bzw. Lkw-Unfall für die verschiedenen Systeme sind in Tabelle 5-3 dargestellt. Diese wurden in Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des forschungsbegleitenden Ausschusses systemspezifisch bestimmt. Zunächst wurde hier von der Länge der Kontaktstrecke nach Pkw und Lkw unterschieden. Hiervon wurde auf die Anzahl der Elemente mit auszutauschender Beschädigung geschlossen. Im nächsten Schritt wurde mithilfe der Elementlänge auf die auszutauschende Gesamtlänge geschlossen. Im letzten Schritt wurde diese Gesamtlänge mit den Demontage- und Abriss- sowie den Baukosten (Basis siehe Kapitel 5.2) multipliziert.

Bei den Schutzeinrichtungen aus Stahl wurden die Abriss- und Rückbaukosten mit 0 € angesetzt, da der Schrotterlös die Demontage- und Abrisskosten aufhebt. Zur Bestimmung der Wiederherstellungskosten von Stahlsystemen nach Unfällen wurden

Aufstellort	Schutzeinrichtung	Auszutauschende Gesamtlänge Pkw TB 11 (m/Reparatur)	Auszutauschende Gesamtlänge Schwerverkehr TB 51 (m/Reparatur)	Demontage- und Abrisskosten (€/m)	Baukosten (€/m)	Kosten für die Verkehrs-sicherung je Reparatur (€/Reparatur)	Gesamtkosten Reparatur je Unfall Pkw inkl. Absicherung (€/Reparatur)	Gesamtkosten Reparatur je Unfall Schwerverkehr inkl. Absicherung (€/Reparatur)
Freie Strecke	SE 1	8	16	0	129,89	200	1.239	2.278
	SE 2	8	28	0	77,39	200	819	2.367
	SE 3	12	24	28,8	102,18	1.200	1.772	4.344
	SE 4	-	10	80	400	1.200	0	6.000
Bauwerk	SE 5	8	12	0	181,25	200	1.650	2.375
	SE 6	6	42	29,15	170	1.200	1.395	9.564
	SE 7	-	10	80	400	1.200	0	6.000
Beengte Verhältnisse	SE 8	8	16	0	137,50	200	1.300	2.400
	SE 9	-	24	33,03	130	1.200	0	5.113
	SE 10	-	10	80	400	1.200	0	6.000

Tab. 5-3: Übersicht der Reparaturkosten nach Unfällen

zunächst die Baukosten der Systeme herangezogen. Die Baukosten sind für einen kurzen auszutauschenden Abschnitt, wie es bei einer Reparatur der Fall ist, erfahrungsgemäß höher als bei der Errichtung einer längeren Strecke. Im nachfolgenden Schritt wurden diese mit einem aufstellortspezifischen Faktor multipliziert. Dieser Faktor wurde vom forschungsbegleitenden Ausschuss zur Verfügung gestellt und beträgt 1,5 für die freie Strecke sowie 1,25 für Abschnitte auf Bauwerken.

Bei den Reparaturkosten von Schutzeinrichtungen aus Betonschutzwandfertigteilen wurden die Abrisskosten systemspezifisch bestimmt. Die nachfolgenden Wiederherstellungskosten wurden auf Basis der Baukosten bestimmt, die auch bei der Errichtung zu Beginn der Betrachtung verwendet wurden.

Bei den Systemen aus Ortbetonschutzwänden wurden für alle Systeme derselbe Kostensatz bestimmt.

Im letzten Schritt wurden jeweils noch die Kosten der Verkehrssicherung addiert. Nach Angaben des forschungsbegleitenden Ausschusses betragen diese bei Stahlssystemen 200 €, wobei dieser Wert auf dem Tageskolonnensatz basiert und zudem Kosten der Abschreibung für verwendetes Gerät enthält. Für Schutzwände aus Betonschutzwandfertigteilen und Schutzeinrichtungen in Ortbeton-

bauweise betragen die Kosten für die Verkehrs-sicherung der Überholspur 1.200 €.

Die jährlichen Reparaturkosten für einen Streckenabschnitt können somit anhand der erwarteten Anzahl an Pkw- und Lkw-Unfällen ermittelt werden. Ist diese nicht bekannt, können für eine erste Abschätzung die mittleren Unfallzahlen für Autobahnen aus der Statistik hergeleitet werden. Nach FLUNKERT & GERLACH (2010) ereignen sich jährlich rund 17.000 Unfälle mit Personenschaden und schwerem Sachschaden mit Schutzplankenkontakten im Seitenraum sowie im Mittelstreifen von Autobahnen. Im Jahr 2017 waren in Deutschland knapp 13.000 km an Autobahnen (Destatis, 2018) und somit 26.000 km an Richtungsfahrbahn vorhanden. Es wird davon ausgegangen, dass im Mittelstreifen durchgehend und am Seitenrand an 50 % der Strecke eine Schutzeinrichtung vorhanden ist, sodass insgesamt 39.000 km Schutzeinrichtungen vorhanden sind. Angaben zur Unterscheidung der Unfallhäufigkeit zwischen Mittel- und Seitenstreifen liegen nicht vor, womit sich durchschnittlich 0,44 Unfälle mit Schutzplankenkontakt je Kilometer Schutzeinrichtung ergeben. Gemäß den aktuellen Unfallstatistiken in Destatis (2018) verursachen Lkw über 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht, Sattelschlepper und Busse knapp 14 % aller schweren Unfälle, sodass als Standardwerte zur Berechnung der Repa-

raturkosten 0,38 Pkw-Unfälle und 0,06 Lkw-Unfälle mit Schutzplankenkontakt je Kilometer Schutzzeinrichtung herangezogen werden.

Für spezifische Streckenabschnitte können die anzusetzenden Unfallzahlen wesentlich von diesen Zahlen abweichen. Da sich die Lebenszykluskostenrechnung auf keinen konkreten Autobahnabschnitt bezieht, werden die Reparaturkosten nach Unfällen hier hilfsweise anhand dieser mittleren statistischen Werte abgeschätzt.

Sofern der Schadenverursacher ermittelt werden kann, sind die Kosten der Reparatur vom Schädiger bzw. dessen Kfz-Haftpflichtversicherung zu tragen. Damit fallen die Kosten nicht für den Betreiber der Schutzzeinrichtung an, sondern sind den externen Kosten zuzurechnen und gesondert auszuweisen. Der Anteil der bekannten Unfallverursacher wurde in den Einzelinterviews (siehe Kapitel 4.4) mit 66 % bis 95 % angegeben. Es wird daher im Mittel von 80 % bekannten Unfallverursachern ausgegangen. Die von diesen Schäden verursachten Kosten werden den externen Kosten zugerechnet und lediglich die verbleibenden 20 % der Kosten gehen in die Reparaturkosten nach Unfällen ein, die von den zuständigen Meistereien der Länder und für den Bereich der Autobahnen vom Bund zu tragen sind. Nach dieser Aufteilung ergeben sich für die Systeme die in Tabelle 5-4 dargestellten Werte für die Reparaturkosten nach Unfällen mit unbekanntem Schädiger, die folglich den Nutzungskosten zuzurechnen sind.

Aufstellort	Schutzzeinrichtung	Reparaturkosten (€/km*a) ¹	
		Pkw-Unfälle	Lkw-Unfälle
Freie Strecke	SE 1	94	28
	SE 2	62	29
	SE 3	134	41
	SE 4	0	74
Bauwerk	SE 5	125	29
	SE 6	106	106
	SE 7	0	74
Beengte Verhältnisse	SE 8	98	30
	SE 9	0	51
	SE 10	0	74

¹ Nur Unfälle mit unbekanntem Verursacher (20 %)

Tab. 5-4: Jährliche Reparaturkosten nach Unfällen mit unbekanntem Schädiger (20 % der Unfälle)

Für eine genaue Bestimmung der anzusetzenden Kosten ist letztlich die Zahl der Reparaturen ausschlaggebend. Nicht jeder Unfall erfordert eine Reparatur (dies gilt insbesondere bei Pkw-Unfällen an Betonschutzwänden), andererseits können Reparaturen erforderlich sein, ohne dass diese einem Unfall zugeordnet werden können. Es konnte jedoch nicht ermittelt werden, welcher Parameter (Unfälle oder Reparaturen) für einen gegebenen Streckenabschnitt leichter verfügbar ist und/oder das geeignetere Maß darstellt und somit für eine Kostenabschätzung bevorzugt heranzuziehen ist. Es wurde daher die beschriebene Näherung anhand der Unfallzahlen herangezogen.

5.12 Fahrzeitverlängerung aufgrund Reparaturen

Im Rahmen der Datenerhebung wurden von den befragten Stellen Verkehrseinschränkungen (z. B. Sperrung einer Spur, Geschwindigkeitsbeschränkung) und Stauereignisse während Reparaturen an Schutzzeinrichtungen nahezu durchweg verneint. Dies kann nach Angaben der Experten damit erklärt werden, dass Reparaturen durch modernes Verkehrs- und Baustellenmanagements in möglichst verkehrsschwachen Zeiten (bevorzugt nachts) durchgeführt werden, sodass Stau weitgehend vermieden wird.

Selbst bei einer bekannten Verkehrseinschränkung hängt die konkrete Fahrzeitverlängerung stark von den Randbedingungen wie Verkehrsbelastung des Streckenabschnitts, Zeitpunkt der Reparatur, Verkehrsführung in der Baustelle etc. ab, sodass eine quantitative Aussage nur mit erheblichem Aufwand und für einen spezifischen Streckenabschnitt möglich ist. Eine ausführliche Beschreibung eines Modellansatzes zur Berechnung der externen Effekte aus Verkehrsbeeinflussungen findet sich z. B. in ZINKE (2016).

Aufgrund der verfügbaren Informationen werden für die vorliegende Studie keine Kosten durch Fahrzeitverlängerungen aufgrund von Reparaturen berücksichtigt.

5.13 Umweltwirkungen

Kosten entstehen durch die Umweltwirkungen der Systeme über deren gesamten Lebenszyklus. Darunter fallen Emissionen und Rohstoffverbrauch bei

Herstellung, Transport und Errichtung, sämtlichen Prozessen aufgrund der Nutzung, sowie bei Rückbau und Entsorgung der Schutzeinrichtungen. Zusätzliche Umweltwirkungen können entstehen, wenn es aufgrund einer Reparatur zu einer Fahrzeitverlängerung kommt, die mit einem Mehrverbrauch an Kraftstoff verbunden ist. Dies bleibt in der vorliegenden Studie jedoch unberücksichtigt (siehe vorherigen Abschnitt).

Die Umweltwirkungen, die mit der Herstellung der Systeme verbunden sind, basieren auf GEORGEN (2018). Dort ist das Treibhausgaspotenzial typischer Schutzeinrichtungen der Aufhaltestufe H2 aus Stahl (H2 Super Rail Eco), Ortbeton (H2 BSWO) und Betonfertigteilen (HW BSWF) nach EN 15804 angegeben. Die Ökobilanz berücksichtigt auch die Emissionen am Lebensende von Betonsystemen, d. h. die Entsorgung des Materials sowie eine CO₂-Gutschrift bei Stahlsystemen, da das Material recycelt werden kann. Die Treibhausgaspotenziale dieser drei Arten von Schutzeinrichtungen wurden jeweils auf die in der vorliegenden Studie untersuchten Systeme übertragen. Weitere Umweltwirkungen wie das Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial bleiben bei der Kostenbestimmung der Umweltwirkungen unberücksichtigt, da hierzu keine validen Umweltkostensätze vorliegen. Dies betrifft ebenso die von GEORGEN (2018) thematisierten Barrierewirkung und Bodenversiegelung, auf die die verwendeten Schutzeinrichtungen ebenfalls einen Einfluss haben.

Zur Kostenbestimmung verwendet GEORGEN (2018) den Mitte 2018 aktuellen Preis für Europäische CO₂-Emissionshandelszertifikate. Dieser stieg jedoch im Jahr 2018 von 7,80 €/t_{CO2} auf fast 25 €/t_{CO2} an und unterliegt generell starken Schwankungen (finanzen.net, 2019). Daher wird stattdessen auf die Kostensätze der UBA-Methodenkonvention 3.0 (MATTHEY & BÜNGER, 2018) zurückgegriffen. Dabei werden u. a. die Emissionen von Treibhausgasen (gemessen in CO₂-Äquivalenten) und diversen Luftschadstoffen monetär bewertet. Wirtschaftliche Effekte, die hierbei berücksichtigt werden, sind z. B. Gesundheitsbeeinträchtigungen, Ernteauffälle und Materialschäden. Für die gegebene Anwendung sind lediglich Kostensätze für Treibhausgasemissionen verfügbar, daher werden diese entsprechend der Empfehlung für eine reine Zeitpräferenzrate von 1 % angesetzt.

Für das Jahr 2018 ergeben sich durch den Materialeinsatz damit Kosten von 184 €/t_{CO2}, die sich für den Materialeinsatz bei zukünftig anfallenden Reparaturmaßnahmen entsprechend der auszutauschenden Länge jährlich um 1,76 €/t_{CO2} erhöhen. Für die LCC-Berechnungen resultieren daraus die in Tabelle 5-5 genannten Kosten für Umweltwirkungen, die entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2.1.2 zu den externen Kosten zählen. Die Kosten der Umweltwirkung bei Reparaturen werden anhand der Kosten der Umweltwirkungen für die Herstellung und am Lebensende (siehe Spalte 4 in Tabelle 5-5) und den auszutauschenden Längen je

Aufstellort	Schutzeinrichtung	Treibhausgasemissionen ¹ (t CO ₂ e/km)	Kosten der Umweltwirkungen für Herstellung und Lebensende (€/km)	Kosten der Umweltwirkungen bei Reparaturen ² (€/Reparatur)	
				Pkw-Unfälle	Lkw-Unfälle
Freie Strecke	SE 1	54,21	9.949	80	159
	SE 2	54,21	9.949	80	279
	SE 3	128,47	23.578	283	566
	SE 4	107,70	19.766	0	198
Bauwerk	SE 5	54,21	9.949	80	119
	SE 6	128,47	23.578	141	990
	SE 7	107,70	19.766	0	198
Beengte Verhältnisse	SE 8	54,21	9.949	80	159
	SE 9	128,47	23.578	0	566
	SE 10	107,70	19.766	0	198

¹ Basierend auf (GEORGEN, 2018).
² Die Umweltkosten umfassen sämtliche Reparaturen, also sowohl bei bekannten wie unbekanntem Schädigern.

Tab. 5-5: Kosten der Umweltwirkungen

Unfall (siehe Tabelle 5-3) bestimmt. Darüber hinaus empfiehlt die UBA-Methodenkonvention eine Sensitivitätsanalyse mit 640 €/t_{CO2}; diese wird in Kapitel 6.4.4 durchgeführt.

5.14 Abriss, Rückbau und Entsorgung

Die im Rahmen der Datenerhebung für Abriss und Rückbau angegebenen Kosten weisen eine erhebliche Spannweite und damit Unsicherheit auf. Zudem entstehen nach Auffassung der Experten bei der Demontage von Schutzeinrichtungen aus Stahl aktuell keine Kosten, sondern durch die hohe Schrottgutschrift ein Gewinn. Die Angaben wurden daher durch den forschungsbegleitenden Ausschuss nochmals verifiziert und angepasst.

Nach den Expertenabschätzungen ergibt sich bei Abriss und Rückbau von Schutzeinrichtungen aus Stahl unter Annahme eines Schrottpreises von 250 €/t nach Abzug des Lohnanteils ein Erlös, der für Super Rail Eco mit 6.000 €/km und für alle anderen Super Rail Systeme mit 10.000 €/km veranschlagt wird. Da der Schrottpreis erheblichen Schwankungen unterliegt und unterschiedliche Meinungen hinsichtlich der aktuell und zukünftig zu realisierenden Erlöse bestanden, werden die Auswir-

kungen geringerer Schrottgutschriften im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (siehe Kapitel 6.4.5) untersucht. Für die Schutzeinrichtungen aus Beton wurden die Kosten auf 28.800 €/km für DB 80F, 29.150 €/km für DB 80AS-R und 33.030 €/km für DB 80AS-E festgelegt.

Die Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung enthalten keine Verkehrssicherung, da angenommen wird, dass der Abriss der Schutzeinrichtungen während des Gesamtumbaus der Straße erfolgt, sodass kein Verkehr vorhanden ist.

5.15 Zusammenfassung der Grundlagendaten

In Tabelle 5-6 werden die für die LCC-Berechnung verwendeten Werte aus den vorherigen Kapiteln zusammenfassend dargestellt. Die genannten Kostenangaben beziehen sich auf das Bezugsjahr 2018 (€₂₀₁₈). Konkret gehen zunächst die Kosten aus den Spalten drei und vier als Anfangsinvestition ein. In den nächsten Spalten sind die jährlich wiederkehrenden Nutzungskosten ersichtlich. Diese werden mit der Preissteigerungsrate von 1,4 % sowie der Diskontierungsrate von 3 % (siehe Kapitel 5.1), jeweils pro Jahr, verrechnet. Daraus ergibt sich ein jährlich steigender Betrag an Nutzungskosten, der in die LCC eingeht. Die Kosten der Umweltwirkun-

Aufstellort	Schutzeinrichtung	Kosten (Bezugsjahr 2018)								
		Baukosten (€/km)	Ausschreibung, Planung und Beauftragung (€/km)	Kehren (€/km*a)	Grünpflege (€/km*a)	Bankettschalen (€/km*a)	Reparatur nach Unfällen ¹ (€/km*a)	Umweltwirkungen für Herstellung und Lebensende (€/km)	Umweltwirkungen von Reparaturen (€/km*a)	Abriss und Rückbau (€/km)
Freie Strecke	SE 1	86.590	5.195	0	1.000	100	122	9.949	40	-10.000
	SE 2	51.590	3.095	0	1.000	100	91	9.949	47	-6.000
	SE 3	102.180	6.131	95	500	-200	175	23.578	142	28.800
	SE 4	67.260	4.036	95	500	-200	74	19.766	12	14.000
Bauwerk	SE 5	145.000	6.815	0	0	100	154	9.949	37	-8.000
	SE 6	170.000	7.990	95	0	-200	212	23.578	115	29.150
	SE 7	205.071	9.638	95	0	-200	74	19.766	12	14.000
Beengte Verhältnisse	SE 8 ²	110.000	6.600	0	0	100	128	9.949	40	-8.000
	SE 9	130.000	7.800	95	0	-200	51	23.578	35	33.030
	SE 10	84.000	5.040	95	0	-200	74	19.766	12	14.000

¹ Pkw- und Schwerlastverkehrsunfälle, nur Unfälle mit unbekanntem Verursacher (20 %)
² inkl. Fundament

Tab. 5-6: Übersicht der für die LCC angesetzten Kosten der betrachteten Schutzeinrichtungen

gen werden am Anfang (bei der Herstellung und Errichtung) sowie anteilig bei den jährlichen Reparaturkosten berücksichtigt. Abriss und Rückbau gehen als Einmalzahlung bzw. -gutschrift am Ende der Lebensdauer ein.

Aufgrund der geringen Datengrundlage für manche Systeme und/oder Kostenarten handelt es sich um exemplarische Werte, die nicht pauschal auf andere Anwendungen übertragbar sind.

6 LCC-Berechnungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der LCC-Berechnungen dargestellt, die für die zehn repräsentativen Systeme (siehe Kapitel 3.5.2) auf Basis der in Kapitel 5 festgelegten Grundlagendaten durchgeführt wurden. Aufgrund der geringen Datengrundlage handelt es sich um exemplarische Ergebnisse unter den getroffenen Annahmen und Randbedingungen, die nicht pauschal auf andere Anwendungen übertragbar sind.

Für die LCC-Berechnung wird gemäß Kapitel 3.4 die Kapitalwertmethode verwendet. Dabei werden die zahlreichen Kostenarten zusammengefasst in die drei Kostenkategorien Anfangsinvestition, Gesamtnutzungskosten und Kosten am Lebensende. Zur Anfangsinvestition zählen neben den Baukosten die Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung. Nutzungskosten entstehen als jährlich wiederkehrende Kosten während der Nutzung, während die Gesamtnutzungskosten sämtliche Nutzungskosten über die gesamte Lebensdauer bezeichnen. Von den Nutzungskosten werden gemäß den Ausführungen in Kapitel 5 nur folgende Kostenarten berücksichtigt:

- Kehren,

- Grünpflege,
- Bankettschalen und
- Reparatur nach Unfällen mit unbekanntem Verursacher.

Als Kosten am Lebensende fallen die Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung als Einmalzahlung an. Die Summe der auf das Bezugsjahr 2018 abdiskontierten Kosten aus Anfangsinvestition, Gesamtnutzungskosten und Kosten am Lebensende bildet die Lebenszykluskosten. Entsprechend der in Kapitel 3.1 definierten funktionalen Einheit beziehen sich alle Angaben auf einen Kilometer.

Zum besseren Verständnis der Darstellungen werden diese zunächst anhand eines Beispiels erläutert. Bild 6-1 zeigt die Zusammensetzung der Lebenszykluskosten. In der linken Teilgrafik stellen die ersten drei Balken die Anfangsinvestition, die Gesamtnutzungskosten und die Kosten am Lebensende in Absolutwerten dar. Da den Stahlssystemen, wie in Kapitel 5.14 beschrieben, am Lebensende der Schrotterlös gutgeschrieben wird, werden die Lebenszykluskosten um diesen Betrag reduziert (oranger Balken, negative Kosten). Der vierte Balken stellt die Lebenszykluskosten als Summe der drei Einzelwerte dar.

In der prozentualen Darstellung stellen definitionsgemäß die Lebenszykluskosten als Gesamtergebnis die 100%-Marke dar. Der Anteil der einzelnen Kostengruppen kann entsprechend als relativer Beitrag zum Gesamtergebnis dargestellt werden. Ist dabei wie im Beispiel die Anfangsinvestition höher als die berechneten Lebenszykluskosten, liegt deren Anteil an den Lebenszykluskosten entsprechend bei über 100 % (Beispiel in Bildmitte). Mit der im weiteren Verlauf gewählten Darstellung mittels gestapelter Balken ergibt sich die im rechten Teil von Bild 6-1 gezeigte Ansicht.

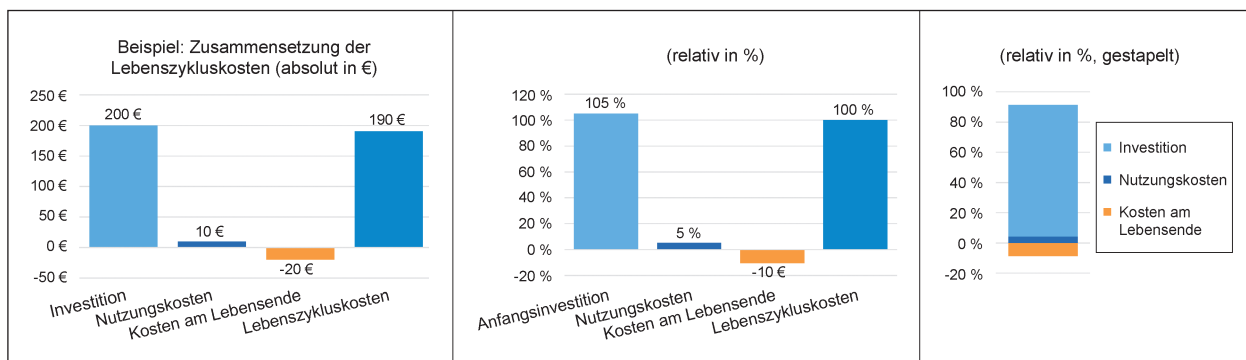


Bild 6-1: Erläuterung zur Darstellung der Lebenszykluskosten

Nach der detaillierten Darstellung der Lebenszykluskosten werden die externen Kosten betrachtet, die sich aus den Reparaturkosten nach Unfällen, bei denen der Verursacher bekannt ist, und den Kosten der Umweltwirkungen über den Lebenszyklus der Schutzeinrichtungen zusammensetzen.

Im zweiten Schritt werden anhand verschiedener Sensitivitätsanalysen die Auswirkungen von Datenunsicherheiten bzw. -varianzen auf die Ergebnisse untersucht.

6.1 Bestimmung der wesentlichen Kosten

Zur Vereinfachung der Lebenszykluskostenanalyse und damit der Erhöhung ihrer Anwendbarkeit in der Praxis soll die Berechnung auf die wesentlichen Kosten beschränkt werden. Die Herausarbeitung der wesentlichen Parameter ermöglicht in einem weiteren Schritt die Vereinfachung der Lebenszykluskostenrechnung sowie die Entwicklung eines praxisnahen Hilfsmittels zur Entscheidungsunterstützung bei Investitionsvorhaben.

Zur Bestimmung der wesentlichen Kosten wurden folgende Kriterien festgelegt:

- Hat für alle Systeme eines Aufstellortes eine einzelne Kostenart einen Anteil von < 1 % an den Lebenszykluskosten, kann diese Kostenart vernachlässigt werden.

- Hat für alle Systeme eines Aufstellortes eine Kostenkategorie (Anfangsinvestition, Gesamtnutzungskosten, Kosten am Lebensende) in Summe einen Anteil von < 5 % an den Lebenszykluskosten, kann diese Kostenkategorie vernachlässigt werden.

Die dargestellten Kriterien werden nur als erfüllt betrachtet, wenn sie auf alle Systeme eines Aufstellortes gleichermaßen zutreffen. Als nächstes wird mit den in Kapitel 5 ermittelten Grundlagendaten die Lebenszykluskostenanalyse durchgeführt. Das Ergebnis mit den jeweiligen Anteilen der Kostenkategorien ist in Bild 6-2 dargestellt.

Die Überprüfung des 1%-Kriteriums ergibt, dass die Kehrkosten am Aufstellort Bauwerk bei den drei betrachteten Systemen weniger als 1 % betragen. Diese Nicht-Berücksichtigung dieser Kosten ist jedoch bereits durch das zweite Kriterium abgedeckt und somit hinfällig. Alle anderen einzelnen Kostenarten machen mehr als 1 % der Lebenszykluskosten aus. Für die Aufstellorte Bauwerk und beengte Verhältnisse betragen die Gesamtnutzungskosten zwischen 1,5 % und maximal 3,4 %, womit sie unter dem formulierten Wesentlichkeitskriterium liegen. Damit kann für die Aufstellorte Bauwerk und beengte Verhältnisse die Betrachtung der Nutzungskosten entfallen.

Die Relevanz der Nutzungskosten kann (unter Vernachlässigung der Kosten am Lebensende) zudem sehr schnell überschlägig abgeschätzt werden, in-

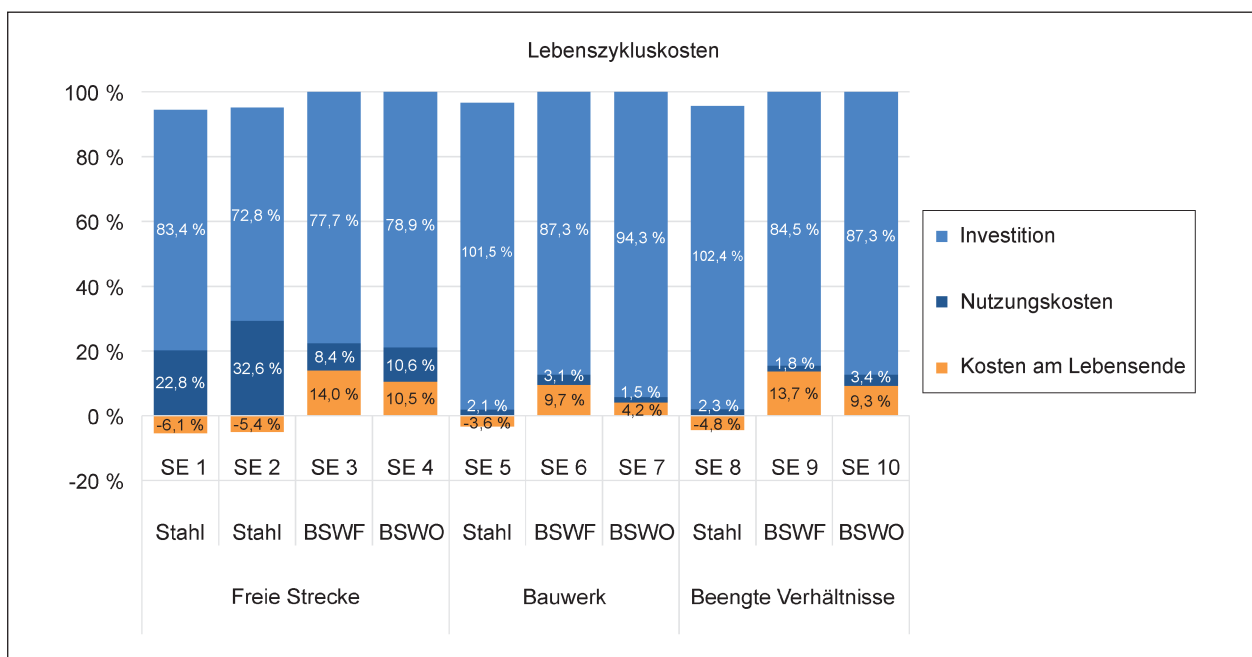


Bild 6-2: Ergebnis der Lebenszykluskostenanalyse mit sämtlichen Grundlagendaten

dem die jährlichen Nutzungskosten zur Anfangsinvestition ins Verhältnis gesetzt werden. Aus dem in Bild 6-3 dargestellten Verlauf ergibt sich, dass die Nutzungskosten bis zu einer Höhe von 0,26 % der Anfangsinvestition einen Anteil von < 5 % an den Lebenszykluskosten ausmachen.⁷ Bei einer Anfangsinvestition von 100.000 € müssten die jährlichen Nutzungskosten demnach 260 €/a übersteigen, um wesentlich zu sein. Werden aus der Anfangsinvestition noch die Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung herausgerechnet, ergibt sich ein Anteil von 0,27 % an den reinen Baukosten, ab dessen Überschreitung die Nutzungskosten relevant werden.

Aus Bild 6-3 wird anhand der Einzelergebnisse der Systeme schnell ersichtlich, dass die Nutzungskosten für die Aufstellorte Bauwerke und beengte Verhältnisse keine wesentlichen Kosten darstellen und somit vernachlässigt werden können.

Bild 6-4 zeigt eine entsprechende Darstellung für die Kosten am Lebensende. Diese weisen in der gewählten Darstellung einen nahezu linearen Verlauf auf. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass

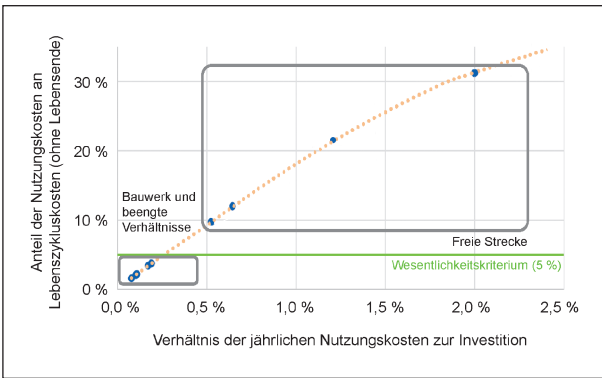


Bild 6-3: Zusammenhang zwischen Nutzungskosten und Investition

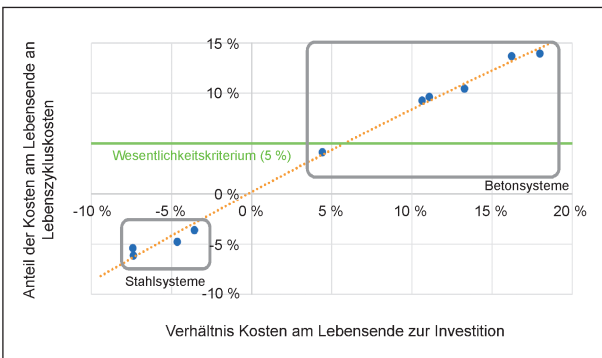


Bild 6-4: Zusammenhang zwischen Kosten am Lebensende und Investition

die Kosten bzw. Erlöse am Lebensende nicht vernachlässigt werden können, da sie für die Hälfte der betrachteten Systeme mehr als 5 % der Anfangsinvestition betragen.⁸

6.2 Ergebnisse der vereinfachten Berechnungen

Die nachfolgenden Ergebnisse basieren auf den in Kapitel 6.1 bestimmten wesentlichen Kosten. Die Nutzungskosten an den Aufstellorten Bauwerk und beengte Verhältnisse wurden im Rahmen der Vereinfachung aufgrund ihrer Unterschreitung des Wesentlichkeitsmerkmals von 5 % nicht weiter berücksichtigt.

6.2.1 Aufstellort freie Strecke

Für den Aufstellort freie Strecke werden vier Systeme untersucht. In Bild 6-5 sind die Lebenszykluskosten dargestellt. Die Anfangsinvestition macht zwischen 72,8 % und 83,4 % das Gros der Lebenszykluskosten aus, die Gesamtnutzungskosten bewegen sich zwischen 8,4 % und 32,6 %, und die Kosten am Lebensende betragen zwischen -6,1 % (aufgrund Gutschrift durch Schrotterlös) und 14,0 %.

⁷ Dies ist in jedem Fall dann zutreffend, wenn am Lebensende zusätzliche Kosten entstehen. Im Falle einer Gutschrift kann der Anteil der Nutzungskosten an den Lebenszykluskosten entsprechend höher ausfallen. Ebenso ist der dargestellte Prozentsatz nur für die hier gewählte Betrachtungsdauer von 25 Jahren gültig.

⁸ Mathematisch korrekt müssen die Erlöse kleiner als -5 % der Anfangsinvestition sein. Die hier gewählte Formulierung dürfte jedoch eher dem allgemeinen Sprachgebrauch entsprechen.

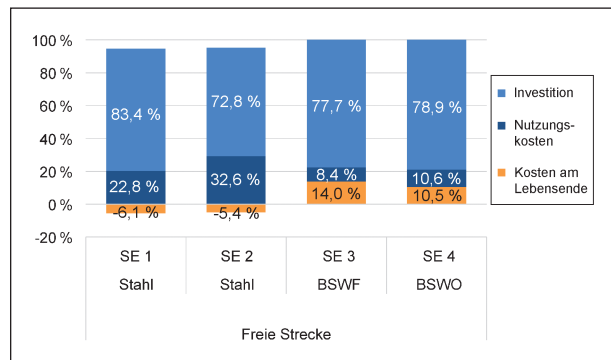


Bild 6-5: Lebenszykluskosten Aufstellort freie Strecke

Bild 6-6 zeigt die relativen Anteile der verschiedenen Nutzungskostenarten an den Gesamtnutzungskosten über den Lebenszyklus. Bei allen vier Systemen dominieren bei Weitem die Grünpflegekosten. Den zweitgrößten Einfluss teilen sich bei den Stahlsystemen die Reparaturkosten nach Unfällen sowie die Differenzkosten des Bankettschälens.

Bei den Betonsystemen beträgt die Gutschrift des Bankettschälens 35 % bis 43 %. Die Kosten für Kehrarbeiten liegen bei 17 % bzw. 20 % und die der Reparaturen nach Unfällen 31 % bzw. 16 %. Wie in Kapitel 5.6 erläutert, werden bei den Kehrarbeiten nur die durch die Schutzeinrichtung verursachten Mehrkosten berücksichtigt, weshalb bei den offenen Systemen keine Kosten für Kehrarbeiten anfallen.

Die absoluten Gesamtnutzungskosten sind in Bild 6-7 dargestellt. Diese fallen bei den offenen Systemen aufgrund der wesentlich höheren Grünpflege-

kosten (20.526 €/km) insgesamt höher aus als bei den geschlossenen. Die geschlossenen enthalten Gutschriften für das Bankettschälens sowie zusätzliche Kosten für Kehrarbeiten.

6.2.2 Aufstellort Bauwerk

Bild 6-8 veranschaulicht die Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnung für den Aufstellort Bauwerk. Hier dominiert die Anfangsinvestition bei allen drei untersuchten Systemen mit jeweils mehr als 87,3 %. Die Kosten am Lebensende schwanken bei den betrachteten Systemen zwischen -3,6 % (Schrotterlös bei Stahl) und 9,7 %.

Die Nutzungskosten der Systeme werden bei Bauwerken nicht weiter betrachtet, da diese sich als nicht wesentlich herausgestellt haben.

6.2.3 Aufstellort beengte Verhältnisse

Die Lebenszykluskosten des Aufstellorts beengte Verhältnisse gibt Bild 6-9 wieder. Wie bei den anderen beiden Aufstellorten nimmt die Anfangsinvestition den größten Anteil an den Lebenszykluskosten

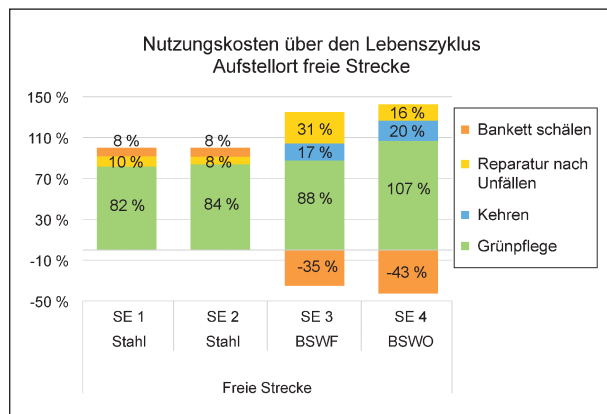


Bild 6-6: Nutzungskosten Aufstellort freie Strecke (relative Anteile)

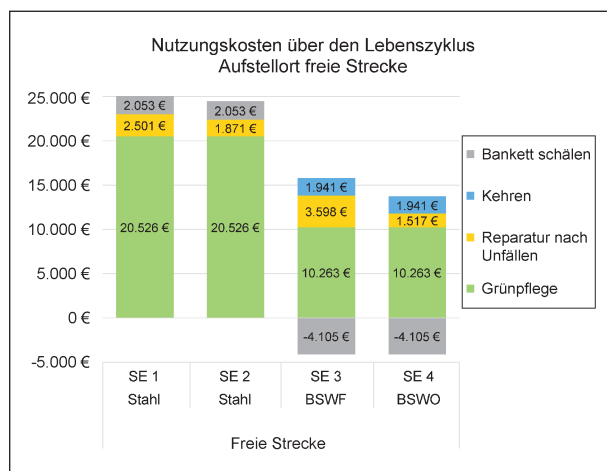


Bild 6-7: Nutzungskosten Aufstellort freie Strecke (Absolutwerte)

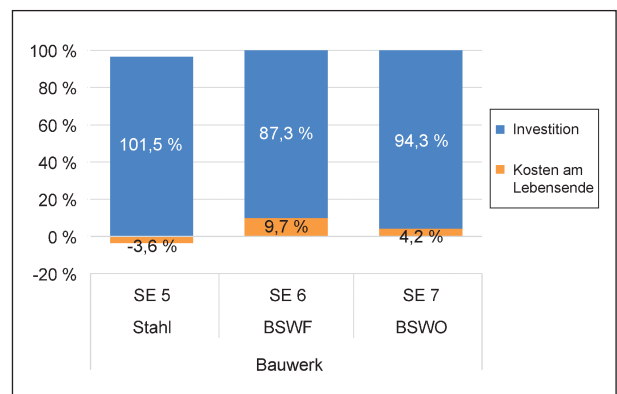


Bild 6-8: Lebenszykluskosten Aufstellort Bauwerk

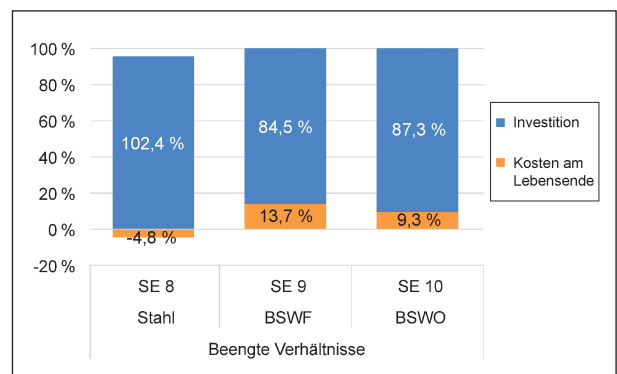


Bild 6-9: Lebenszykluskosten Aufstellort beengte Verhältnisse

ein; dieser beträgt jeweils mehr als 84,5 %. Der Anteil der Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung am Lebensende bewegt sich zwischen -4,8 % (Schrotterlös bei Stahl) und 13,7 %. Auch bei beengten Verhältnissen entfällt die Betrachtung der Nutzungskosten, da diese nicht wesentlich sind.

6.3 Externe Kosten

In Bild 6-10 sind die externen Kosten der zehn betrachteten Systeme dargestellt. Diese setzen sich aus den Kosten für Umweltwirkungen mit einem Anteil von 46 % und 86 % und für Reparaturen nach Unfällen mit bekanntem Verursacher mit einem Anteil von 14 % bis 54 %. zusammen. Beide Kostenarten sind also in Bezug auf die externen Kosten relevant.

Bild 6-11 zeigt die Relation von externen Kosten zu den Lebenszykluskosten für die zehn Systeme. Eine Internalisierung der externen Kosten, d. h. die Berücksichtigung dieser Kosten, würde zusätzliche Kosten von 10 % bis 23 % bedeuten.

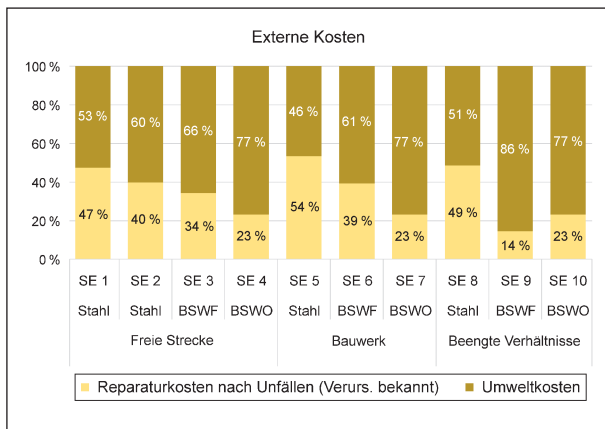


Bild 6-10: Externe Kosten der Systeme

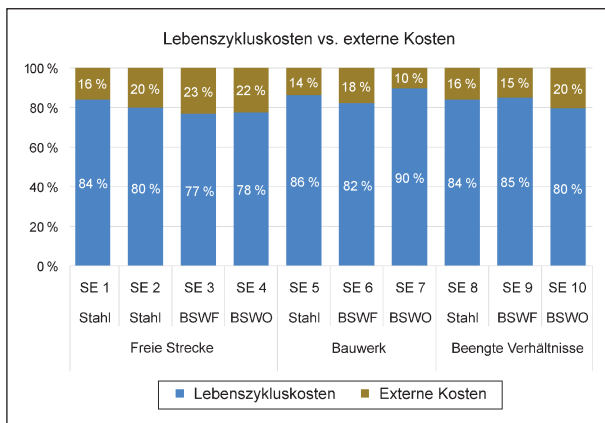


Bild 6-11: Lebenszykluskosten inklusive externer Kosten

6.4 Sensitivitätsanalysen

In diesem Unterkapitel wird eine Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse durchgeführt.

Folgende Größen wurden auf Sensitivität getestet:

- Diskontierungsrate,
- Preissteigerungsrate,
- jährliche Nutzungskosten,
- externe Kosten und
- Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung,

Bei den ersten drei Größen wird untersucht, ob bei einer Variation der Kosten diese für Bauwerke und beengte Verhältnisse das 5%-Kriterium übersteigen und die Nutzungskosten auch für diese Aufstellorte als wesentlich anzusehen sind. Bei den weiteren Größen wurde deren Einfluss auf das Gesamtergebnis betrachtet.

6.4.1 Diskontierungsrate

Die Wahl der Diskontierungsrate hat einen Einfluss auf Höhe der Nutzungskosten sowie der Kosten am Lebensende und somit deren Anteil an den Lebenszykluskosten. Generell nimmt der Einfluss der Nutzungskosten auf die Lebenszykluskosten mit steigender Diskontierungsrate ab, da die zukünftigen Ausgaben mit einem immer höheren Faktor abdiskontiert werden. Bild 6-12 zeigt die Auswirkungen einer Variation der Diskontierungsrate auf den Anteil der Nutzungskosten an den Lebenszykluskosten. Die Variation der Diskontierungsrate zwischen 0 % und 6 % ergibt ein zu den bisherigen Ergebnissen analoges Bild. Der Anteil der Nutzungskosten variiert an den Aufstellorten Bauwerk und beengte Verhältnisse zwischen 1,1 % und 4,5 % und übersteigt damit im Extremfall das 5%-Abschneidekriterium nur minimal, was als vernachlässigbar angesehen

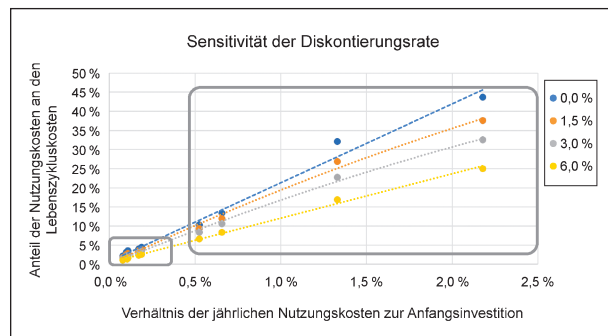


Bild 6-12: Sensitivität der Lebenszykluskosten bei einer Variation der Diskontierungsrate

hen wird. Am Aufstellort freie Strecke bewegt sich der Nutzungskostenanteil zwischen 6,7 % und 43,7 %. Somit bestätigen sich die Ergebnisse an diesem Aufstellort ebenfalls. Insgesamt erweisen sich die Ergebnisse bei der Sensitivitätsüberprüfung in Hinblick auf die Diskontierungsrate als nicht sensitiv.

6.4.2 Preissteigerungsrate

Ein zur Diskontierungsrate gegenläufiger Zusammenhang ergibt sich bei der Sensitivitätsanalyse der Preissteigerungsrate. Wird die jährliche Preissteigerungsrate erhöht, steigen auch die Nutzungskosten sowie die Kosten am Lebensende und folglich ihr Anteil an den Lebenszykluskosten. Die Veränderung zum Vorjahr im Zeitraum 1995 bis 2017 der deutschen Verbraucherpreise schwankte zwischen 0,3 % (2009 sowie 2015) und 2,6 % (2008). Die Sensitivität der Ergebnisse dieser Studie wurde daher durch eine Variation der Preissteigerungsrate im Bereich 0 % bis 5,2 % (dem Doppelten der maximalen realen Preissteigerungsrate) überprüft. In Bild 6-13 ist die Sensitivität der Preissteigerungsrate dargestellt. Es ist festzuhalten, dass sich der Anteil der Nutzungskosten an den Lebenszykluskosten bei den Aufstellorten Bauwerken und beengte Verhältnisse auf maximal 4,7 % erhöht. Dies ist der Fall bei einer angenommenen Preissteigerungsrate von 5,2 %, d. h. einer Vervielfachung des Basisfalls, was als Extremwert und damit vernachlässigbar angesehen wird. Die Systeme, die am Aufstellort freie Strecke betrachtet wurden, sind stärker von der Änderung der Preissteigerungsrate beeinflusst und bewegen sich zwischen 7,5 % und 47,1 %.

Damit bestätigen sich die anhand des 5%-Abschneidekriterium getroffenen Entscheidungen und die Ergebnisse erweisen sich im Rahmen der Sen-

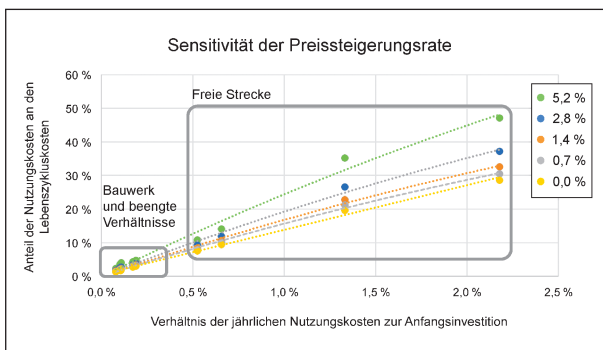


Bild 6-13: Sensitivität der Lebenszykluskosten bei einer Variation der Preissteigerungsrate

sitivitätsüberprüfung der Preissteigerungsrate als stabil.

6.4.3 Jährliche Nutzungskosten

Um die Sensitivität der jährlichen Nutzungskosten zu untersuchen, wurden die jährlichen Nutzungskosten der freien Strecke halbiert sowie die jährlichen Nutzungskosten der Aufstellorte Bauwerk und beengte Verhältnisse verdoppelt. Wie in Bild 6-14 dargestellt, machen die Nutzungskosten für den Aufstellort freie Strecke auch bei Halbierung mindestens einen Anteil von 6,5 % aus und bleiben relevant. Somit erweisen sich die Ergebnisse für die freie Strecke als stabil.

Bei einer Verdopplung der Gesamtnutzungskosten für die Aufstellorte Bauwerk und beengte Verhältnisse steigen die Anteile der Gesamtnutzungskosten auf maximal 6,6 % an (Bild 6-15). Es würden an

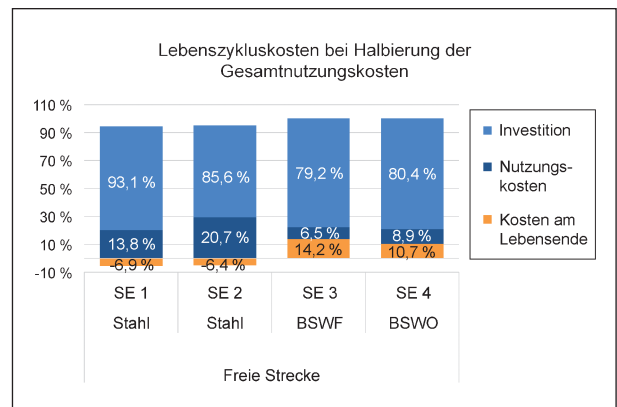


Bild 6-14: Sensitivität der Ergebnisse bei Halbierung der Gesamtnutzungskosten freie Strecke

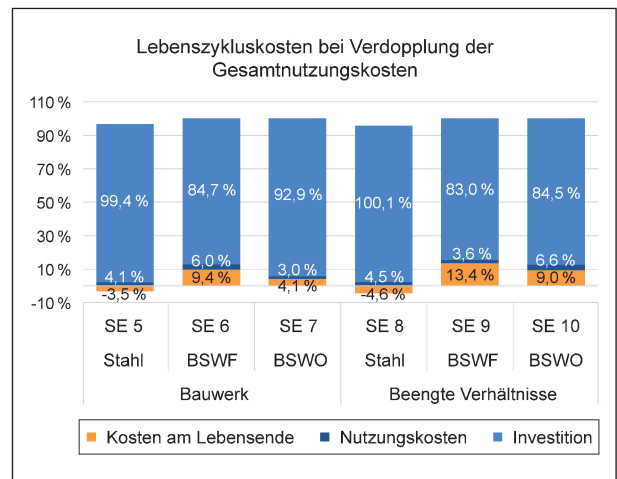


Bild 6-15: Sensitivität der Ergebnisse bei Verdopplung der Gesamtnutzungskosten Bauwerk und beengte Verhältnisse

jedem Aufstellort zwei der betrachteten Systeme das 5%-Kriterium übersteigen. Folglich ist hier eine Sensitivität des Ergebnisses bei einer Verdopplung der Gesamtnutzungskosten an den Aufstellorten Bauwerk und beengte Verhältnisse festzuhalten. Die Vernachlässigung der Nutzungskosten muss somit bei deutlich höheren Nutzungskosten kritisch hinterfragt werden.

6.4.4 Externe Kosten

In der UBA-Methodenkonvention 3.0⁹ wird eine Sensitivitätsanalyse der CO₂-Kosten mit einem Emissionspreis von 640 €/t_{CO₂-Äq} empfohlen (MATTHEY & BÜNGER, 2018). Dieser Satz beträgt mehr als das Dreifache der Standardkosten von 180 €/t_{CO₂} für das Jahr 2016. Auch ist die hierbei vorgegebene jährliche Preissteigerungsrate von 2,65 €/t_{CO₂} deutlich höher als im Standardfall. Bild 6-16 zeigt die Sensitivität der Lebenszykluskosten bei der genannten Erhöhung der Umweltkosten. Die externen Kosten machen nun bei einer Internalisierung z. B. über einen entsprechenden Treibhausgas-Emissionspreis einen Anteil an den Gesamtkosten zwischen 25 % und 46 % aus.

⁹ Die Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten enthält Kostensätze zu den Themen Treibhausgase, Luftschadstoffe, Lärm, Verkehr und Energie (Teil „Kostensätze“). Die Kostensätze verdeutlichen, welche gesellschaftlichen Kosten durch unterlassenen Umweltschutz entstehen. Sie ermöglichen eine bessere Abschätzung der Folgen von gesetzlichen Regelungen und öffentlichen Investitionen sowie der Ausgestaltung von ökonomischen Instrumenten.

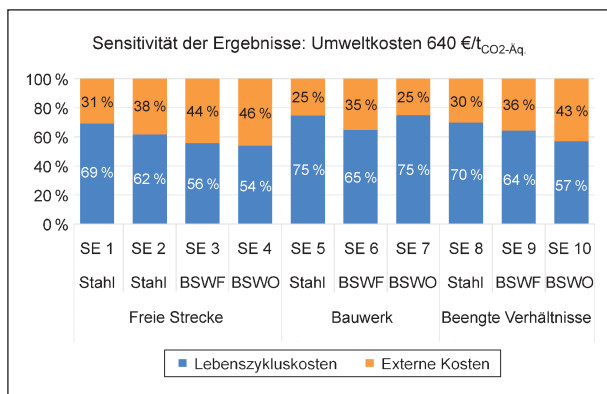


Bild 6-16: Sensitivität der Lebenszykluskosten bei einer Varianz der Umweltkosten

6.4.5 Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung

Die Sensitivität der Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung auf das Gesamtergebnis wurde überprüft, indem die Kosten dafür verdoppelt und halbiert wurden. Damit kann z. B. der Einfluss einer Änderung der Entsorgungskosten für Beton bzw. der Schrotterlös für Stahl auf das Gesamtergebnis bestimmt werden.

Bild 6-17 zeigt am Beispiel des Systems DB 80F auf, wie sich der Anteil der Kosten für Abriss Rückbau und Entsorgung auf die Lebenszykluskosten auswirken würde. Im mittleren Balken ist der Standardfall dargestellt, bei welchem die Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung 19.472 € bzw. 12,7 % ausmachen. Wird dieser Wert absolut verdoppelt (linker Balken), steigt der Anteil auf 22,6 %. Wird er halbiert (rechter Balken), sinkt er auf 5,6 %. Bei einer Verdopplung des Absolutwerts steigt der relative Anteil also auf weniger als das Doppelte als beim Standardfall; bei einer Halbierung des Absolutwerts sinkt der relative Anteil wiederum auf mehr als die Hälfte.

Führt man diese Untersuchung bei allen Systemen durch, ergibt sich bei einer Verdopplung der absoluten Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung eine Erhöhung des relativen Anteils an den Lebenszykluskosten um den Faktor 1,76 bis 2,13. Bei einer Halbierung der absoluten Kosten ergibt sich ein Faktor zwischen 0,44 und 0,53.

Dieser nicht-lineare und systemabhängige Einfluss ist durch zwei Faktoren zu erklären. Erstens nehmen die Lebenszykluskosten bei einer Verdopplung zu bzw. bei einer Halbierung ab, wodurch sich wiederum auch die relativen Anteile verändern. Zwei-

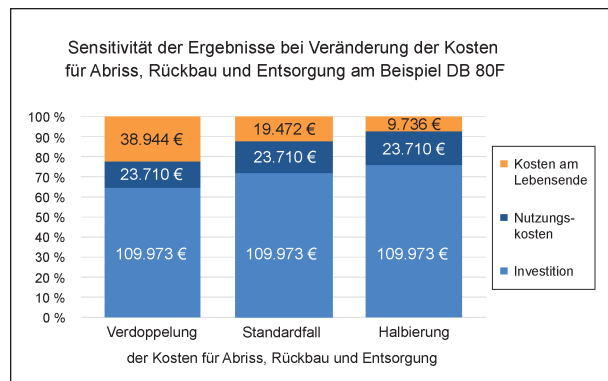


Bild 6-17: Sensitivität der Ergebnisse bei Veränderung der Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung am Beispiel DB 80F

tens sind bereits im Standardfall die Anteile der Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung unterschiedlich hoch, weshalb der Einfluss durch die Preissteigerung und Diskontierung zwischen den Systemen unterschiedlich hoch ist.

Es ist festzuhalten, dass die Kosten am Lebensende der betrachteten Systeme unterschiedliche Sensitivitäten aufweisen. Während eine Verdopplung dieser Kosten bei den betrachteten Schutzeinrichtungen aus Stahl zu mehr als einer Verdopplung der Erlöse führt, sind die Schutzeinrichtungen aus Beton weniger sensitiv. Umgekehrt verhält es sich bei einer Halbierung. Hier verhalten sich die Schutzeinrichtungen aus Stahl weniger sensitiv, während sich die Kosten am Lebensende der Schutzeinrichtungen aus Beton mehr als halbieren.

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Auf der Basis der hier vorliegenden Datengrundlagen und den darauf aufbauenden Lebenszykluskostenanalysen können folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

1. Bei allen untersuchten Systemen nimmt die Investition zu Beginn der Betrachtung (Baukosten sowie Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung) den größten Anteil an den Lebenszykluskosten ein.
2. Die Nutzungskosten spielen eine untergeordnete Rolle. Ist Grünfläche vorhanden, wie dies am Aufstellort der freien Strecke der Fall ist, haben die Grünpflegekosten den größten Anteil an den Nutzungskosten.
3. Werden externe Kosten internalisiert, erhöhen sich die Lebenszykluskosten um 10 % bis 23 %.
4. Im Rahmen der Sensitivitätsanalysen erwiesen sich die Ergebnisse innerhalb der hier gewählten Grenzen als robust. Lediglich die Erhöhung des Emissionspreises auf 640 €/t_{CO₂-Äq.} nach MATTHEY & BÜNGER (2018) führt zu einer signifikanten Erhöhung der Ergebnisse.
5. Bei einer Entscheidung im konkreten Anwendungsfall sind die Randbedingungen ein entscheidender Faktor. Ein Beispiel hierfür sind wesentlich höhere Baukosten durch die Wahl eines nicht betrachteten Systems. Ein weiteres Beispiel ist eine spezielle Bepflanzung der Grünfläche und dadurch häufigere bzw. aufwendigere

Grünpflege und folglich auch höhere Kosten. Um deren Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten zu ermitteln, können in der Praxishilfe die maßnahmenbezogenen Randbedingungen spezifisch eingegeben werden.

6.6 Weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen der vorliegenden Studie konnten nicht alle Fragestellungen abschließend beantwortet werden. Hieraus lässt sich weiterer Forschungsbedarf ableiten, der im Rahmen eines Folgeprojektes zu bearbeiten wäre.

1. Im Rahmen der Studie wurden weitere betriebsdienstliche Arbeiten (z. B. Entwässerung, Winterdienst) als mögliche zusätzlich relevante Kostenart identifiziert. Jedoch konnten die Kosten durch die fehlenden Datengrundlagen nicht in den Berechnungen berücksichtigt werden. Daher besteht hier weiterer Bedarf, die Datengrundlagen zu ergänzen und zu verdichten.
2. Die in dieser Studie angenommenen Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung werden tendenziell überschätzt. Der relative Anteil der zulässigen Planungskosten am Bauvolumen sinkt mit zunehmendem Bauvolumen und Autobahnen werden in der Regel in längeren Bauabschnitten mit entsprechend hohen Baukosten geplant. Es fehlen jedoch zum aktuellen Zeitpunkt Erfahrungswerte, um die Höhe der Planungskosten anhand des Bauvolumens und der Honorarzone genauer abzuschätzen. Da die Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung rund 5 % der Lebenszykluskosten ausmachen, könnte das Ziel eines Folgeprojektes sein, diese näher zu quantifizieren, um die hier bestehende Unsicherheit zu reduzieren.
3. Bei den Grünpflegekosten ist zu beachten, dass der theoretische Wert der Grünpflege im Mittelstreifen (d. h. die ohne Schutzeinrichtung entstehenden Kosten) nicht ermittelt werden konnte. Es ist zu vermuten, dass der der Schutzeinrichtung anzurechnende Kostenanteil nur einen Teil der für die Straße insgesamt entstehenden Kosten ausmacht. Damit ist diese Kostenart aktuell vermutlich zu hoch angesetzt. Damit würde auch ihr Anteil an den Nutzungskosten im Vergleich zu den aktuellen Berechnungen abnehmen. Hierzu wäre notwendig, den theoretischen Wert ohne Schutzeinrichtung zu ermitteln.

4. Die Kosten für das Bankettschalen konnten nur sehr grob abgeschätzt werden, zudem wurde Entsorgung des Schälguts nicht berücksichtigt. Abhängig von dessen Menge und Schadstoffbelastung können durch die Entsorgung unter Umständen nochmals relevante Mehrkosten verursacht werden. Hier ist eine umfassendere Datenaufnahme erforderlich, um die Datenunsicherheit zu reduzieren und die Abhängigkeit der Gesamtkosten von der Art der Schutzeinrichtung besser zu quantifizieren.
5. Die jährlichen Kosten für Verwaltung finden aufgrund der mangelnden Datenbasis bislang keine Berücksichtigung. Diese könnten ermittelt und in die Berechnungen aufgenommen werden.
6. Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich aus der Aufstellung der Schutzeinrichtung im Mittelstreifen. Die Kostenermittlung und Analyse einer Aufstellung im Seitenstreifen wäre ein sinnvoller Schritt, um auch hierfür eine umfassenderen Kostenvergleich von Schutzeinrichtungen mittels Lebenszykluskostenanalyse zu ermöglichen.
7. Die verwendeten Daten zu den Umweltwirkungen beziehen sich auf drei spezifische Systeme, die in der vorliegenden Untersuchung als Näherungswerte für die zehn betrachteten Systeme verwendet wurden (siehe Spalte drei Tabelle 5-5). Werden die resultierenden externen Kosten der Umweltwirkungen internalisiert, hat dies deutliche Auswirkungen auf das Gesamtergebnis (siehe Bild 6-11 und Bild 6-16). Für eine spezifischere Betrachtung der Umweltkosten sollten daher die Datengrundlage verbessert und die Umweltwirkungen weiterer Systeme untersucht werden.

7 Excel-Rechner zur praktischen Anwendung der LCC

Ein Ziel der Studie ist die Entwicklung eines vereinfachten Ansatzes, der eine praxisnahe und anwenderfreundliche Lebenszykluskostenanalyse ermöglicht. Auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse wurde hierzu ein Excel-Rechner entwickelt, der eine vergleichende Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen ermöglicht und darstellt.

In Anlehnung an Kapitel 6.1 beschränkt sich der Rechner zunächst auf die vier Systeme, die als re-

präsentativ für den Aufstellort freie Strecke gewählt wurden, da lediglich bei diesen die Nutzungskosten einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Die Systeme für die Aufstellorte Bauwerke und beengte Verhältnisse sind nicht hinterlegt, da hier die Anwendung der Wesentlichkeitskriterien ergab, dass deren Nutzungskosten vernachlässigbar sind. Für diese Aufstellorte kann näherungsweise die Summe aus Investition und Kosten am Lebensende (unter Vernachlässigung der Diskontierung) als ausreichendes Entscheidungskriterium herangezogen werden.

Als Standardvorgaben sind die in dieser Studie ermittelten Werte für die vier Beispielsysteme hinterlegt. Es ist zu beachten, dass aufgrund der bestehenden Datenunsicherheiten diese Werte lediglich exemplarisch sind und für einen konkreten Lebenszykluskostenvergleich die maßnahmenspezifischen Besonderheiten zu berücksichtigen sind. Dazu können die vorgegebenen Standardwerte geändert und mit den projektspezifischen Werten überschrieben bzw. die entsprechenden Parameter angepasst werden. Die vom Tool berücksichtigten Parameter sind folgende:

- Betrachtungszeitraum,
- Baukosten,
- Anteil der Kosten für Ausschreibung und Planung,
- Grünpflegekosten inkl. Häufigkeit,
- Kosten für Kehren inkl. Häufigkeit,
- Reparaturkosten infolge von Unfällen inkl. Unfallhäufigkeit und
- Ökonomische Parameter (Preissteigerungs- und Diskontierungsrate).
- Darüber hinaus können in dem Excel-Rechner weitere Systeme betrachtet werden, deren Namen sowie Kosteninformationen frei eingetragen werden können.

Auf Basis der gemachten Angaben werden die Lebenszykluskosten automatisiert berechnet. Das kostengünstigste System sowie dessen Kosten werden als Ergebnis ausgewiesen. Zudem werden Abbildungen generiert, die die Ergebnisse der Lebenszykluskosten der betrachteten Schutzeinrichtungen im Vergleich darstellen. Die Ergebnisse werden sowohl absolut in Euro je Kilometer (€/km) als auch relativ in Prozent (%) über den definierten Nutzungszeitraum dargestellt.

Bild 7-1 und Bild 7-2 veranschaulichen den prinzipiellen Aufbau des Rechners. Weitere Erläuterungen zu dessen Anwendung und den einzugebenden Parametern sind direkt im Rechner hinterlegt.

1. Einleitung

Gelb markierte Zellen können überschrieben werden.

2. Betrachtungszeitraum der Lebenszykluskostenanalyse

Betrachtungszeitraum in Jahren: 25 (entspricht der Mindestlebensdauer der Schutzanrichtung)

3. Eingangsdaten

Referenzsystem (Dropdown-Menü) oder anderes System wählen	System 1	System 2	System 3
	System 1 (Stahl)	System 2 (Bauh)	System 3 (BSWF)
	Name hier eintragen	Name hier eintragen	Name hier eintragen
Baukosten	86.590	51.590	102.180
Anteil Kosten für Ausschreibung und Planung	90.660	51.590	102.180
Kosten für einmalige Grünpflege	500	500	500
Anzahl Grünpflegevorgänge pro Jahr	2	2	1
Jährliche Kosten Grünpflege	1.000	1.000	500
Kosten für einmaliges Kehren	0	0	32
Anzahl Kehearbeiten pro Jahr	3	3	3
Jährliche Kosten Kehren	0	0	95
Jährliche Kosten Bankettschalen	100	100	-200
Weitere jährliche Betriebskosten	1.000	1.000	1.000
Abriss, Rückbau und Entsorgung	-10.000	6.000	28.800
Unfallhäufigkeit	0,44		
Anteil der Fahrerflüchtigen	20%		
Kosten pro Unfall	1.385	1.036	1.992
Jährliche Kosten Reparaturen infolge Unfällen	122	91	175
Diskontierungsrate	3,0%		
Preissteigerungsrate	1,4%		

Erläuterungen

Der vorliegende Rechner dient der vergleichenden Lebenszykluskostenrechnung von Schutzanrichtungen. Da die Handbedingungen entscheidenden Einfluss haben, können die in der zugrundeliegenden Studie ermittelten und im Rechner hinterlegten Werte durch anwendungsspezifische Angaben des Nutzers ersetzt werden. Weitere Informationen finden sich im Reiter "Einführung".

Das Basisjahr der Berechnungen ist 2018. Der in der Studie betrachtete Zeitraum beträgt in Anlehnung an die Mittelstlebensdauer 25 Jahre. Hier kann auch ein längerer oder kürzerer Zeitraum gewählt werden.

Hier kann über die Dropdown-Auswahl eines der vier in der Studie untersuchten Systeme gewählt werden. Alternativ kann ein weiteres System ausgewählt werden. Dessen Werte sind im Reiter "Hinterlegte Werte" sowie in den gelb markierten Feldern manuell einzugeben.

Hier sind die reinen Baukosten für 1 km Schutzanrichtung anzugeben.

Mithilfe dieses Anteils werden die Kosten für Ausschreibung und Planung der Schutzanrichtung an den Baukosten abgeschätzt. Er wurde näherungsweise mithilfe der HOAI 2013 Abschnitt 4. Verkehrsanlagen mit vier Honorarzone IV bestimmt.

Die Anfangsinvestition beinhaltet die Baukosten sowie die Kosten für Ausschreibung und Planung zum Zeitpunkt t = 0 und wird aus den vorstehenden Angaben automatisch berechnet.

Die Grünpflege umfasst Mähen, Bodenabtrag und Gehölzpflege. Die jährlichen Kosten für die Grünpflege werden aus dem Produkt der Anzahl der Grünpflegevorgänge pro Jahr und den Kosten für einen einzelnen Grünpflegevorgang bestimmt.

Zusätzliche Kosten für das Kehren fallen nur an, wenn es sich um ein geschlossenes System handelt. Die hier dargestellten Kosten stellen somit die Mehrkosten für Kehren bei geschlossenen Systemen dar. Die jährlichen Kosten für die Kehearbeiten bilden sich aus dem Produkt der Anzahl der Kehearbeiten pro Jahr und den Kosten für einen einzelnen Kehrvorgang.

Hier werden die Kosten des Bankettschalens angegeben. Auch wenn dies seltener als einmal jährlich durchgeführt wird, sind die anfallenden Kosten auf Jahresbasis umzurechnen.

Wenn gewünscht, können hier weitere Betriebskostentypen ergänzt werden, die in der Berechnung berücksichtigt werden sollen.

Die Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung am Lebensende sind hier einzutragen. Während bei Betonsystemen in der Regel Entsorgungskosten anfallen, ergeben sich bei Stahlsystemen üblicherweise Schroterlöse, die hier als negative Kosten dargestellt sind.

Die Unfallhäufigkeit bezieht sich auf die Summe der PKW- und Schwerlastverkehrsunfälle.

In diese Berechnung gehen nur der Anteil an Unfallkosten ein, der durch Fahrerflüchtige, d.h. unbeachtete, Verursacher, entstehen. Dieser Anteil wird hier mit 20% hinterlegt, ist aber überschreibbar.

Hier werden die anfallenden Kosten pro Unfall angegeben. Diese sind mittlere Unfallkosten und basieren auf einem gewichteten Mittelwert aus PKW- und Schwerlastverkehrsunfällen.

In der Studie wurde die Diskontierungsrate entsprechend der DIN EN 15627 auf 3,0% festgelegt. (Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der ökonomischen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethoden; Deutsche Fassung EN 15627:2015)

In der Studie wurde die Preissteigerung als mittlere Änderung des Verbraucherpreisindex über die letzten zehn Jahre mit 1,4% bestimmt. (Verbraucherpreisindex für Deutschland - Lange Reihen ab 1948 - Dezember 2018, Wiesbaden: Statistisches Bundesamt)

Bild 7-1: Veranschaulichung des Excel-Rechners – Eingangsdaten und Erläuterungen

4. Ergebnis

	System 1	System 2	System 3
Kosten für Ausschreibung, Planung und Bau	90.660	51.590	102.180
Grünpflege	20.526	20.526	10.263
Kehtarbeiten	0	0	1.941
Bankettschalen	2.053	2.053	-4.105
Weitere jährliche Betriebskosten	20.526	20.526	20.526
Reparaturen	2.501	1.871	3.598
Nutzungskosten	45.606	44.976	32.223
Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung	-6.761	-4.057	19.472
Gesamtlebenszykluskosten	129.505	92.510	153.875

	System 1	System 2	System 3
Kosten für Ausschreibung, Planung und Bau	70%	40%	79%
Grünpflege	16%	16%	8%
Kehtarbeiten	0%	0%	1%
Bankettschalen	2%	2%	-3%
Weitere jährliche Betriebskosten	16%	16%	16%
Reparaturen	2%	1%	3%
Nutzungskosten	35%	35%	25%
Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung	-5%	-3%	15%
Gesamtlebenszykluskosten	100%	71%	119%

In dieser Ergebnistabelle finden sich die Lebenszykluskosten, die sich im Laufe des Nutzungszeitraums anfallen, für die drei gewählten Systeme im Vergleich. Während die Kosten für Ausschreibung, Planung und Bau unverändert in die Gesamtkosten einfließen, werden die Nutzungskosten und Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung durch die Preissteigerungs- und Diskontierungsrate beeinflusst. Die Nutzungskosten setzen sich aus den während des Nutzungszeitraums jährlich anfallenden Nutzungskosten zusammen und werden für jedes Jahr mit der Preissteigerung versehen, abdiskontiert und schließlich über die Jahre aufsummiert. Die Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung, die einmalig am Lebensende anfallen, werden ebenfalls mit der Preissteigerung und Diskontierungsrate versehen.

Hier ist das kostengünstigste System über den Lebenszyklus ausgewiesen.

In der links dargestellten Abbildungen können die Lebenszykluskosten der drei betrachteten Systeme im Vergleich abgelesen werden. Die obere Abbildung stellt die Ergebnisse in Absolutwerten dar, die untere Abbildung gibt die Ergebnisse auf 100% skaliert an. Das System mit den niedrigsten Lebenszykluskosten entspricht über die gewählte Nutzungsdauer gesehen der günstigsten Option. Dieses System ist in Zelle G1 ausgewiesen.

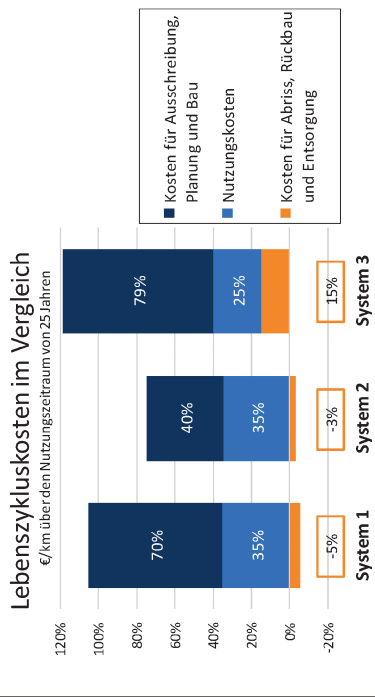
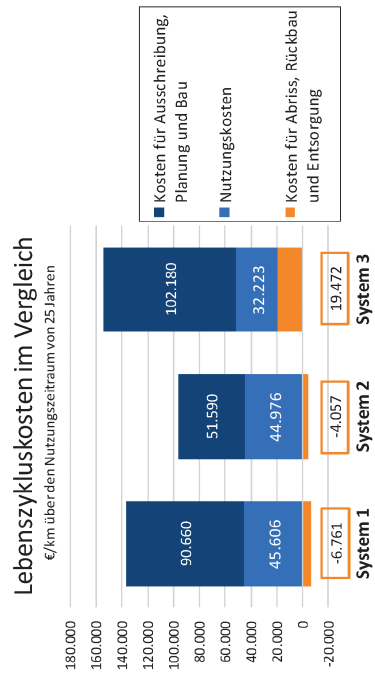


Bild 7-2: Veranschaulichung des Excel-Rechners – Ergebnis

Literatur

- BMUB (2016): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
- BNB (2017): Steckbrief – Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus. Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Büro- und Verwaltungsgebäude
- CONNELL, M. et al. (2008): Sustainability Benefits of concrete Step Barrier, s.l.: Britpave
- DAVIS LANGDON (2007): Life Cycle Costing (LCC) as a contribution to sustainable construction: a common methodology. Literature Review., Davis Langdon Management Consulting: s.n.
- Destatis (2018): Verkehrsunfälle. Fachserie 8 Reihe 7 – 2017 Hrsg. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis)
- Destatis (2019): Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz) nach dem Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken, Ausgabe 2009 (GP 2009). Fachserie 17 Reihe 2 Hrsg. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis)
- Destatis (2019): Verbraucherpreisindex für Deutschland – Lange Reihen ab 1948 – Dezember 2018. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis)
- DIN 18960 (2008): Nutzungskosten im Hochbau
- DIN EN 1317-1 (2011): Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 1: Terminologie und allgemeine Kriterien für Prüfverfahren
- DIN EN 16627 (2015): Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der ökonomischen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethoden
- EUPAVE (2012): Concrete Safety Barriers: A Safe and Sustainable Choice. European Concrete Paving Association
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement (2009): Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (RPS), Ausgabe 2009
- FGSV (1989): Richtlinien für passive Schutzrichtungen an Straßen (RPS 89). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- FGSV (1997a): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- FGSV (1997b): Kommentar zum Entwurf: Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen EWS Aktualisierung der RAS-W ,86. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung
- FGSV (2009): Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (RPS 2009). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- FGSV (2017): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fahrzeug-Rückhaltesysteme : ZTV FRS, Ausgabe 2013/Fassung 2017
- FIEDLER, A. et al. (2016): Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, (271)
- finanzen.net (2019): CO₂ European Emission Allowances. [Online] Available at: <https://www.finanzen.net/rohstoffe/co2-emissionsrechte/historisch> [Zugriff am 16 01 2019]
- FISCHER, O.; GEHRLEIN, S.; LINGEMANN, J. & JUNGWIRTH, J. (2016a): Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchtigungskonzepte von Straßenbrücken
- FISCHER, O. et al. (2016b): Einheitliche Bewertungskriterien fuer Elemente der Strassenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Strasse und Tunnel. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band Unterreihe Straßenbau, (97)
- FLUNKERT, E.-M. & GERLACH, J.; (2010): Unfälle mit Durchbruch der Schutzrichtungen in Mittelstreifen auf Bundesautobahnen. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 2, pp. 85-90
- FRÖHLICH, P. (1999): Rückhaltesysteme auf Autobahnen – Einsatzformen, Anforderungen, Erfahrungen aus betrieblicher Sicht. Diplomarbeit am

- Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung
der Technischen Universität Wien
- GEORGEN, V. (2018): Umweltschutz – Ein Kriterium für passive Schutzeinrichtungen? Straßenverkehrstechnik, 7, pp. 503-504
- GRAUBNER, C.-A.; KNAUFF, A. & PELKE, E. (2011): Lebenszyklusbetrachtungen als Grundlage für die Nachhaltigkeitsbewertung von Straßenbrücken. In: J. 80, Hrsg. Stahlbau, Heft 3. Berlin: Ernst & Sohn
- GRAUBNER, C.-A. et al. (2016): Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Brücken- und Ingenieurbau, (132)
- Haufe-Lexware (2017): Finance Office Professional, Freiburg: s.n.
- HOAI (2013): Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen) vom 10.07.2013. s.l.:BGBl. I S. 2276
- ISO 14044 (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, s.l.: s.n.
- ISO 15686-5 (2017): Buildings and constructed assets -- Service life planning -- Part 5: Life-cycle costing
- KARIM, H. (2011): Road Design for Future Maintenance – Life-cycle cost Analyses for Road Barriers. Stockholm, Schweden: s.n.
- KATHMANN, T. (2003): Wirtschaftlichkeitsüberprüfung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen
- KATHMANN, T. (2005): Modell zur Auswahl und Wirtschaftlichkeitsüberprüfung von Schutzeinrichtungen. Dissertation am Lehrstuhl für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau der RWTH-Aachen
- KATHMANN, T. (2006): Vortrag: Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Schutzeinrichtungen – ein Widerspruch?. Vortragsveranstaltung Sicherheit im Verkehrswegebau, Forum Zukunft Bauen Mainz: s.n.
- KATHMANN, T. & JANSEN, F. (2013): Detailanalyse von Schutzeinrichtungen Probleme und Erkenntnisse
- KUHLMANN, U. et al. (2011): Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit. Stahlbau, Band 80(10), pp. 703-710
- KUHLMANN, U. et al. (2015): Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, (B 112)
- KUHLMANN, U. et al. (2014): Nachhaltigkeitsanalysen von Stahlverbundbrücken. Stahlbau, 83(7), pp.476-486. Stahlbau, Issue 83(7), pp. 476-486
- LATORRE, F. et al. (2016): Selection of the most appropriate roadside vehicle restraint system – the SAVeRS project
- MATTHEY, A. & BÜNGER, B. (2018): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze, Dessau Roßlau: Umweltbundesamt
- MENSINGER, M.; HOGGER, H.; BREIT, M. & EISELE, J. (2011): Nachhaltige Bürogebäude mit Stahl. Band Stahlbau, 80(10), pp. 740-749
- MIELECKE, T. et al. (2016a): Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band Unterreihe Brücken- und Ingenieurbau, (133)
- MIELECKE, T.; GRAUBNER, C.-A. & ROTH, C. (2016b): Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Brücken- und Ingenieurbau
- MIELECKE, T. et al. (2016c): Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke in Hinblick auf Nachhaltigkeit. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band Unterreihe Brücken- und Ingenieurbau, (125)
- MIELECKE, T. (o. J.): Leitfaden nachhaltige Straßeninfrastruktur – Endbericht
- MIERITZ, L. & KIRWIN, B. (2005): Defining Gartner total cost of ownership
- MONTELLA, A. (2000): Benefit/Cost Analysis for the Selection of Roadside Safety Alternatives. Pretoria, South Africa: s.n.

- Ove Arup & Partners International Ltd. (2006): Barrier Acoustic Study: The acoustic effect of concrete central reserve safety barriers. Britpave
- RAY, M. H.; CARRIGAN, C. & PLAXICO, C. (o. J.): Roadside Safety Analysis Programme (V3) (RSAP). [Online] Available at: <http://rsap.road-safellc.com> [Zugriff am 2017 09 26]
- RAY, M. H.; WEIR, J. A. & HOPP, J. A. (2003): In-service performance of traffic barriers. Washington D.C.: Transportation Research Board
- RICHARDS, J. (2018): Vortrag: Life Cycle and Cost Benefit Analysis of Vehicle Restraint Systems on the A55 and A483 Trunk Roads
- SCHMELLEKAMP, C. (2016): Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, (129)
- SCHMIDT-THRÖ, G. et al. (2016): Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Strassenbruecken im Lebenszyklus. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band Unterreihe Brücken- und Ingenieurbau, (131)
- STEINAUER, B.; KATHMANN, T.; MAYER, G. & BECHER, T. (2004): Einsatzkriterien für Betonschutzwände, Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- Transportation Professional (2004): Barriers entering the Spotlight
- UBA (2012): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden – Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UBA (2018): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten, s.l.: s.n.
- Verkehrsrundschau (2014): Hintergrund: Was kostet ein Kilometer Autobahn?. [Online] Available at: www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/hintergrund-was-kostet-ein-kilometer-autobahn-1546054.html [Zugriff am 23 09 2019]
- WILLIAMS, G. (2004): Whole Life Cost-Benefit Analysis for Median Safety Barriers. Unpublished Project Report
- ZINKE, T. (2016): Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken – Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte, s.l.: Karlsruher Institut für Technologie, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
- ZINKE, T.; SCHMIDT-THRÖ, G. & UMMENDORFER, T. (2012): Entwicklung und Verwendung von externen Kosten für die Nachhaltigkeitsbewertung von Verkehrsinfrastruktur. Jahrgang 107, Issue Heft 8

Bilder

- Bild 2-1: Lebenszyklusphasen und kostenrelevante Prozesse der DIN EN 16627
- Bild 2-2: Sensitivität der Lebenszykluskosten von Betonschutzwänden gegenüber Kostentreibern (KARIM, 2011)
- Bild 2-3: Sensitivität der Lebenszykluskosten von Schutzeinrichtungen aus Stahl gegenüber Kostentreibern (KARIM, 2011)
- Bild 2-4: Effekt der Verkehrsstärke auf die Lebenszykluskosten der untersuchten Fahrzeug-Rückhaltesysteme (KARIM, 2011)
- Bild 2-5: Lebenszykluskosten für einen 5km-Abschnitt verschiedener Schutzeinrichtungen über 50 Jahre (RICHARDS, 2018)
- Bild 6-1: Erläuterung zur Darstellung der Lebenszykluskosten
- Bild 6-2: Ergebnis der Lebenszykluskostenanalyse mit sämtlichen Grundlagendaten
- Bild 6-3: Zusammenhang zwischen Nutzungskosten und Investition
- Bild 6-4: Zusammenhang zwischen Kosten am Lebensende und Investition
- Bild 6-5: Lebenszykluskosten Aufstellort freie Strecke
- Bild 6-6: Nutzungskosten Aufstellort freie Strecke (relative Anteile)
- Bild 6-7: Nutzungskosten Aufstellort freie Strecke (Absolutwerte)

- Bild 6-8: Lebenszykluskosten Aufstellort Bauwerk
- Bild 6-9: Lebenszykluskosten Aufstellort beengte Verhältnisse
- Bild 6-11: Lebenszykluskosten inklusive externer Kosten
- Bild 6-10: Externe Kosten der Systeme
- Bild 6-12: Sensitivität der Lebenszykluskosten bei einer Varianz der Diskontierungsrate
- Bild 6-13: Sensitivität der Lebenszykluskosten bei einer Varianz der Preissteigerungsrate
- Bild 6-14: Sensitivität der Ergebnisse bei Halbierung der Gesamtnutzungskosten freie Strecke
- Bild 6-15: Sensitivität der Ergebnisse bei Verdoppelung der Gesamtnutzungskosten Bauwerk und beengte Verhältnisse
- Bild 6-16: Sensitivität der Lebenszykluskosten bei einer Varianz der Umweltkosten
- Bild 6-17: Sensitivität der Ergebnisse bei Veränderung der Kosten für Abriss, Rückbau und Entsorgung am Beispiel DB 80F
- Bild 7-1: Veranschaulichung des Excel-Rechners – Eingangsdaten und Erläuterungen
- Bild 7-2: Veranschaulichung des Excel-Rechners – Ergebnis
- Tab. 5-1: Baukosten der betrachteten Schutzeinrichtungen
- Tab. 5-2: Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung auf Basis der (HOAI, 2013)
- Tab. 5-3: Übersicht der Reparaturkosten nach Unfällen
- Tab. 5-4: Jährliche Reparaturkosten nach Unfällen mit unbekanntem Schädiger (20 % der Unfälle)
- Tab. 5-5: Kosten der Umweltwirkungen
- Tab. 5-6: Übersicht der für die LCC angesetzten Kosten der betrachteten Schutzeinrichtungen

Tabellen

- Tab. 2-1: Überblick über betrachtete Normen, Richtlinien und Leitfäden
- Tab. 3-1: Kostenarten für die LCC von Fahrzeug-Rückhaltesystemen
- Tab. 3-2: Für die Datenerhebung berücksichtigte Systeme
- Tab. 3-3: Für die Lebenszykluskostenanalyse ausgewählte Systeme
- Tab. 4-1: Übersicht über die Anzahl der Antworten
- Tab. 4-2: Übersicht über den Eingang von Fragebogen

Anhang

1 Zusammenfassung der Literaturrecherche

Beton											
Lebenszyklusphase	Kostenart	Quellen									
		Fröhlich (1999)	SAVeRS LaTorre et al. (2016)	Williams (2004)	Steinauer et al. (2004)	Karim (2011)	Kathmann & Jansen (2013)	Kathmann (2005)	RSAP	Richards (2018)	
Herstellung	Planungskosten				9.100 €/((km ² *a) Fertigteile: 12.424,35 €/((km ² *a) Ortbeton: 8.436,29€/8 km ² *a)	0,0023 %					
	Investitionskosten					46,69 %	92 €/m (Ortbeton) 134 €/m (Fertigteil)				
	Installationskosten; Lieferungskosten			32,33 % (249.151,43 €)			Ortbeton: 66 €/m – 85 €/m Fertigteil: 110 €/m; Bodenklasse 3-5			2.800 €	
	Herstellungskosten									ca. 130 €/m	
	Beschaffung und Installation Schutzeinrichtung					45,37 %					
	Beschaffung und Installation Reflektoren					0,12 %					
	Investition und Installation von Anfangs- und Endkonstruktionen sowie Gründungen					1,21 %					
	Kosten aus Verkehrsmanagement										
	Nutzungskosten										5.600 €/d
	Nutzung	Reparatur- und Wartungskosten inf. Unfall				Reparaturkosten: 1,6 % (12.330,41€) Wartungskosten: 1,08 % (8.323,03€)					
Staukosten					1,76 % (13.563,45€)						
Staukosten: Säubern der Reflektoren						1,32 %					
Staukosten: Kehren						0,22 %					
Staukosten: Unfall mit Getötetem						0,17 %					

Tab. A-1: Zusammenfassung der Literaturrecherche

Beton													
Lebenszyklusphase	Kostenart	Quellen											
		Fröhlich (1999)	SAVeRS LaTorre et al. (2016)	Williams (2004)	Steinauer et al. (2004)	Karim (2011)	Kathmann & Jansen (2013)	Kathmann (2005)	RSAP	Richards (2018)			
Nutzung	Staukosten: Unfall mit Schwerverletzten					0,35 %							
	Staukosten: Unfall mit Leichtverletzten					0,32 %							
	Staukosten: Unfall mit Sachschaden					0,04 %							
	Unfallkosten mit Getöteten					29,97 %							
	Unfallkosten mit Schwerverletzten					1,11 %							
	Unfallkosten mit Leichtverletzten					16,87 %							
	Unfallkosten mit Sachschaden					0,15 %							
	Unfallkosten			42,27 % (325.754,11€)	74,12 % (ca. 61.000€)			12,673 €/(km²a)					
	Reparaturkosten	Ortbeton: etwa 4.360 € bis 5.087 € bzw. etwa 3.633 € bis 4.360 € Fertigteile: etwa 2.543 €			0,002 %			32,16 €/(km²a)					
	Reinigung				3,31 %			1.822,19 €/(km²a)					
Säubern der Reflektoren					2,08 %								
Kehren					0,69 %								
Grünpflege				1,05 %			300,71 €/(km²a)						
Abschreibungskosten				21,52 %									
Rückbau/Entsorgung			2,72 % (20.961,70€)										
Gesamt			768.509,1 € (für 50 Jahre oder 2 x 25 Jahre; Streckenlänge: 1 km)		20.305.504 € (über 30 Jahre)							666.534,4 € (Installation and maintenance over a 50 year period; Streckenlänge: 5.000 m)	

Tab. A-1: Fortsetzung

Stahl													
Lebenszyklusphase	Kostenart	Quellen											
		Fröhlich (1999)	SAVeRS LaTorre et al. (2016)	Williams (2004)	Steinauer et al. (2004)	Karim (2011)	Kathmann & Jansen (2013)	Kathmann (2005)	RSAP	Richards (2018)			
Herstellung	Planungskosten				3.594,37 €/(km²a)	0,0022 %							
	Investitionskosten					20,00 %				37 €/m (EDSP 2.0) 91 €/m (Super Rail)			
	Installationskosten; Lieferungskosten			9,49 % (66.980,3 €)						25 €/m (EDSP 2.0) 77 €/m (Super Rail); Bodenklasse 3-5			
	Herstellungskosten											ca. 160 €/m	
	Beschaffung und Installation Schutzeinrichtung					45,37 %							
	Beschaffung und Installation Reflektoren					0,13 %							
	Investition und Installation von Anfangs- und Endkonstruktionen sowie Gründungen					0,06 %							
	Kosten aus Verkehrsmanagement					27,74 % (195.788,56 €)							
	Nutzungskosten												
	Nutzung	Reparatur- und Wartungskosten inf. Unfall											
Staukosten													
Staukosten: Reparatur													
Staukosten: Säubern der Reflektoren													
Staukosten: Unfall mit Getötetem													
Staukosten: Unfall mit Schwerverletztem													
Staukosten: Unfall mit Leichtverletztem													
Staukosten: Unfall mit Leichtverletztem													

Tab. A-1: Fortsetzung

Stahl														
Lebens- zyklus- phase	Kostenart	Quellen												
		Fröhlich (1999)	SAVeRS LaTorre et al. (2016)	Williams (2004)	Steinauer et al. (2004)	Karim (2011)	Kathmann & Jansen (2013)	Kathmann (2005)	RSAP	Richards (2018)				
Nutzung	Staukosten: Unfall mit Sachschaden					0,05 %								
	Unfallkosten mit Getriebem					55,57 %								
	Unfallkosten mit Schwer- verletztem					0,94 %								
	Unfallkosten mit Leicht- verletztem					13,75 %								
	Unfallkosten mit Sach- schaden					0,20 %								
	Unfallkosten			46,19 % (326.008,42€)	86,49 % (ca. 61.000€)			31.632 €/(km*a)						
	Reparaturkosten	etwa 1.293 € bis 1.831 €			2,08 %				mittlere Reparaturkosten: 1.004,66 €/(km*a) einfache Stahlschutz- planen: 18.250 €/(km*a) doppelte Distanzschutz- planen: 34.150€/(km*a)				5.040€/(km*a)	
	Reparatur von Schutz- einrichtungen					4,86 %								
	Reinigung				0,95 %				909,07 €/(km*a)					
	Säubern der Reflektoren					1,97 %								
Kehren														
Grünpflege				0,55 %				309,05 €/(km*a)						
Abschreibungskosten				9,93 %										
Rückbau/ Entsorgung			3,54 % (24.985,27€)											
Gesamt			703.837,21 € (für 50 Jahre oder 2 x 25 Jahre; Streckenlänge: 1 km)		21.448.262 € (über 30 Jahre)									N2W2 Barrier: Single Sided Corrugated 2.502.080 € Double sided Corrugated 2.940.000 € (Installation and Maintenance over a 50 year period; 5.000 m)

Tab. A-1: Fortsetzung

2 Auswertetabellen der Datenerhebung

Aufstellort	Fahrzeug- rückhaltesystem	Baukosten (€/km)			Kosten für Ausschreibung, Planung und Beauftragung (€/km)			Inspektionskosten (€/km*a)		
		Max.	Min.	Median	Max.	Min.	Median	Max.	Min.	Median
freie Strecke	Super Rail	763.500	50.940	86.590	101.800	3.078	42.478	0	0	0
	Super Rail Eco	144.737	42.327	51.590	30.780	1.500	3.078	124	0	0
	DB 80F	108.304	65.904	102.180						
	NJ 93 BK	117.645	117.645	117.645						
	LT 205-10	67.389	66.455	67.256						
	LT 104	619.930	619.930	619.930	82.031	82.031	82.031	313	313	313
	Super Rail BW	646.309	120.044	175.626	1.023	1.023	1.023			
Bauwerk	Super Rail Eco BW	201.798	87.518	106.331	4.092	4.092	4.092	0	0	0
	DB 80AS-R	1.930.223	1.930.223	1.930.223				2.621	2.621	2.621
	SB 90 BW									
	LT 101 ME	208.570	204.450	205.071						
	LT 104 ME	356.440	356.440	356.440	11.969	11.969	11.969	689	689	689
	Super Rail Eco HS	113.337	113.337	113.337						
	Super Rail VZB	153.973	120.955	126.555						
Beengte Verhältnisse	Super Rail Eco HS BW	298.270	298.270	298.270						
	DB 80AS-E									
	EP 80BAS-E	54.345	54.345	54.345	11.310	11.310	11.310	49	49	49
	LT 205-12	65.802	64.029	64.915						

Tab. A-2: Ergebnisse der Datenerhebung

Aufstellort	Fahrzeug- rückhaltesystem	Reinigungskosten €/(km*a)			Grünpflegekosten €/(km*a)			Winterdienstkosten €/(km*a)		
		Max.	Min.	Median	Max.	Min.	Median	Max.	Min.	Median
freie Strecke	Super Rail	0	0	0	2.545	2.036	2.291	5.904	0	2.952
	Super Rail Eco	0	0	0	1.328	0	437	0	0	0
	DB 80F									
	NJ 93 BK	0	0	0						
	LT 205-10									
	LT 104	252	252	252						
Bauwerk	Super Rail BW									
	Super Rail Eco BW				0	0	0	0	0	0
	DB 80AS-R									
	SB 90 BW	3.483	3.483	3.483	2.621	2.621	2.621			
	LT 101 ME									
	LT 104 ME							23	23	23
beengte Ver- hältnisse	Super Rail Eco HS				3.306	3.306	3.306			
	Super Rail VZB									
	Super Rail Eco HS BW									
	DB 80AS-E									
	EP 80BAS-E	8.103	8.103	8.103	427	427	427	0	0	0
	LT 205-12									

Tab. A-3: Ergebnisse der Datenerhebung (Fortsetzung)

Aufstellort	Fahrzeug- rückhaltesystem	Kosten der Entwässerung €/km*a			Reparaturkosten nach Unfällen €/km*a			Kosten für Abriss und Rückbau €/km		
		Max.	Min.	Median	Max.	Min.	Median	Max.	Min.	Median
freie Strecke	Super Rail	0	0	0	9.000	5.882	7.441	36.828	0	12.788
	Super Rail Eco	395	0	0	10.716	301	2.196	6.672	0	376
	DB 80F									
	NJ 93 BK							3.478	3.478	3.478
	LT 205-10									
	LT 104									
Bauwerk	Super Rail BW				39.839	9.701	24.770	1.756	108	932
	Super Rail Eco BW	0	0	0	4.706	4.281	4.493	8.982	8.982	8.982
	DB 80AS-R				190.836	190.836	190.836			
	SB 90 BW				74.095	74.095	74.095			
	LT 101 ME									
	LT 104 ME				290	290	290	14.048	14.048	14.048
beengte Verhältnisse	Super Rail Eco HS									
	Super Rail VZB									
	Super Rail Eco HS BW				11.381	11.381	11.381			
	DB 80AS-E									
	EP 80BAS-E	366	366	366				0	0	0
	LT 205-12									

Tab. A-4: Ergebnisse der Datenerhebung (Fortsetzung)

3 Dokumentation des Workshops

Arbeitsgruppe Betriebsdienst

Im Rahmen des Projektes wurden Kosten und Aufwände des Betriebsdienstes abgefragt und ausgewertet, die über den Lebenszyklus einer Schutzeinrichtung entstehen. Die ermittelten Ansätze werden vorgestellt. Dazu sind aber noch einige Fragen nicht abschließend beantwortet, die im Workshop diskutiert werden sollen, dies sind u. a.:

- Bestehen für verschiedene Rückhaltesysteme Unterschiede beim Inspektionsaufwand (Aufwand, Häufigkeit)? Lassen sich diese beziffern? Welcher Anteil an der Inspektion entfällt auf die Schutzeinrichtung?
- Welches sind die entscheidenden Parameter bei den Kosten für die Reinigung der Entwässerungseinrichtung? Welche Rolle spielt die Bauart der Schutzeinrichtung im Vergleich zur Örtlichkeit? Gibt es eine (Faust-)Formel zur Kostenermittlung?
- Welche Mehrkosten verursachen verschiedene Schutzeinrichtungen bei der Grünpflege? Wovon hängen diese ab? Ist für die Grünpflege im Mittelstreifen ein Zuschlagfaktor notwendig?
- Wie wirken sich verschiedene Schutzeinrichtungen auf den Winterdienst aus (z. B. andere Geräte)? Beeinflusst die Art der Schutzeinrichtung die Räumgeschwindigkeit?
- Wie lassen sich die notwendigen Reparaturkosten aufgrund von Unfällen abschätzen? Liegt eher die Zahl der Unfälle und/oder die Zahl der Reparaturen für einen Streckenabschnitt vor?

In der Arbeitsgruppe „Betriebskosten“ wurde zunächst festgestellt, dass es sich bei den Systemen um H2-Systeme handelt und daher nur eine Betrachtung von Systemen im Mittelstreifen durchführbar ist, da nur hier H2-Systeme im Regelbetrieb vorgesehen sind. Im Seitenstreifen sind in der Regel H1-Systeme vorgesehen.

Alle Betriebsdiensttätigkeiten, die in den einzelnen Ländern durchgeführt werden, sind in der B-Kost-Liste enthalten. Hierin werden neben den Vorgaben des Bundes hinsichtlich der Häufigkeit von Arbeiten auch die Häufigkeiten festgehalten, welche länderintern für diese Arbeiten gelten. Sofern die spezifischen Kosten (je km) bekannt sind, könnten die Gesamtkosten daher über die B-Kost-Liste ermittelt werden.

Weiterhin wurde der Nutzen eines zu entwickelnden Tools in Frage gestellt. In den Planungen der Schutzeinrichtungen gibt es laut Arbeitskreis nur wenige Abschnitte, in denen ein solches Tool Anwendung finden könnte, da es durch äußere Vorgaben und Zwangspunkte in der Planung sehr häufig nur eine begrenzte Auswahl an Systemen gibt.

Die Kostenkomponente Inspektion kann nach Ansicht der Experten entfallen, da es sich bei den Arbeiten um die Streckenkontrolle handelt, in der die Schutzeinrichtung zwar mit beachtet wird, jedoch nicht als eigenständiger Punkt mit abgearbeitet wird. Vielmehr handelt es sich hierbei um eine Art Zusatz, da die Kontrolle gemacht werden muss, kann auch auf die Schutzeinrichtung geachtet werden. Hierdurch entstehen auch keine Mehraufwände, egal bei welcher Schutzeinrichtung. Somit kann diese Kostenkomponente komplett entfallen.

Der Winterdienst kann für den Fall Mittelstreifen ebenfalls entfallen. Da in der Regel von „innen nach außen“ geräumt wird, hat es keinen Einfluss, welche Schutzeinrichtung im Mittelstreifen steht. Jedoch ist für den Fall Seitenstreifen die Schutzeinrichtung schon relevant. Jedoch konnte dieser hier nicht verifiziert werden. Eventuell werden für den Fall Seitenstreifen weitere Erhebungen notwendig sein.

Für die Reinigung der Entwässerungseinrichtungen ist zunächst zu klären, ob eine Entwässerungseinrichtung an der betroffenen Stelle vorzusehen ist. Falls dies nicht der Fall ist, fallen auch keine Kosten für die Reinigung dieser an. In diesem Fall wäre die Art der Schutzeinrichtung egal. Fall eine Entwässerungseinrichtung vorhanden ist, muss diese vor der Schutzeinrichtung liegend etwa doppelt so häufig gereinigt werden, wenn ein geschlossenes System zum Einsatz kommt. Wie hoch die Kosten der Reinigung liegen konnte nicht verifiziert werden.

Um die Kosten der offenen Systeme im Lebenszyklus nicht zu niedrig anzusetzen, muss auch die Kostenkomponente „Bankett schälen“ eingeführt werden. Die Schälung des Bankettes erfolgt einmal alle 10 Jahre. Das Bankett kann hierbei nur bei „offenen“ oder keinen Systemen geschält werden. Jedoch ist der Aufwand höher mit Schutzeinrichtung. Auch erhöht sich der Aufwand mit kleinerem Pfostenabstand.

Das Schälen unter normalen Bedingungen (ohne Schutzeinrichtung) wird mit 2-3 €/m angegeben. Hierauf müsste dann der Aufschlag für die Schutzeinrichtung noch aufgeschlagen werden. Die Entsorgung des Bankettschälguts schlägt mit 30 €/t zu buche. Wie viel Bankettschälgut anfällt hängt von der zu schälenden Breite und Dicke des zu schälenden Bereichs ab. Wie viel Bankettschälgut anfällt konnte nicht konkretisiert werden.

Bei den Kosten für die Reparatur nach Unfall wurde die Vorgehensweise „Normanprall“ nach Prüfung TB11 und TB51 positiv bewertet. Hier werden immer gleiche Unfälle verglichen. Die Anzahl der Unfälle kann entweder aus der Zahl der Reparaturen erfolgen oder aus der Anzahl der Unfälle nach Unfallanzeigen. Hier konnte sich der Arbeitskreis nicht auf ein Vorgehen einigen und es wurde vorgeschlagen, beide Werte miteinander zu vergleichen. Hierzu müsste perspektivisch eine weitere Erhebung stattfinden, die sowohl die Unfälle auf einem Abschnitt als auch die Anzahl der Reparaturen als Grundlage für eine Berechnung der Kostenkomponente liefert.

In diesem Zusammenhang wurde auch die externe Kostenkomponente „Staukosten“ diskutiert. Diese sind eine wichtige Einflussgröße nicht nur für Reparaturarbeiten, sondern für alle Arbeiten unter fließendem Verkehr an der Schutzeinrichtung. Der Arbeitskreis hat festgestellt, dass die Staukosten in diesen Fällen als Einflussgröße nicht zu vernachlässigen ist, jedoch die Kosten hieraus sehr schwer quantifizierbar sind. Hierfür sollte es ebenfalls weitergehende Untersuchungen geben.

Leider konnten die Fragen bezüglich der Grünpflege nicht mehr in dem Arbeitskreis besprochen werden. Jedoch liegen hier bereits erste Zahlen vor und ähnlich zu der Kostenkomponente „Bankett schälen“ werden auch hier die Kosten höher erachtet, je enger die Pfofen stehen.

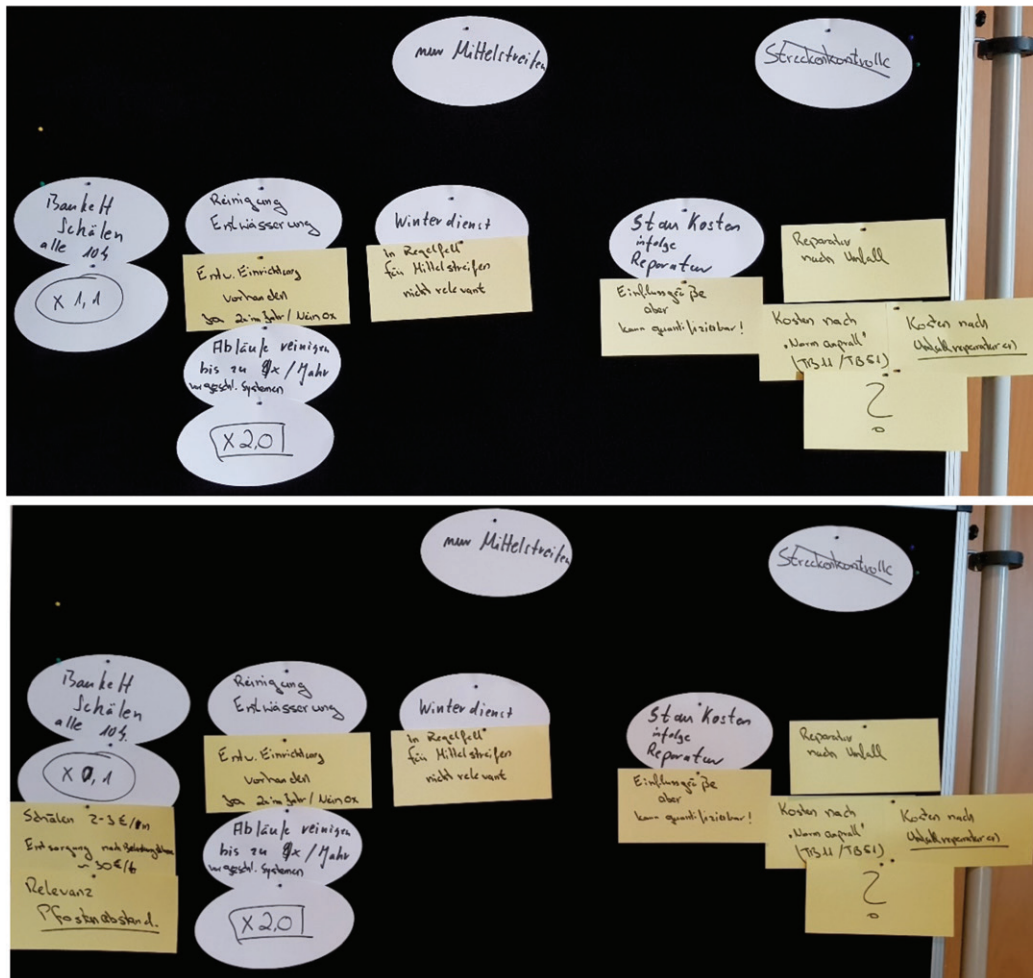
Arbeitsgruppe Festlegung noch fehlender Kostendaten und/oder Festlegung wie Kosten ermittelt werden

In der zweiten Arbeitsgruppe nach dem Mittagessen, wurden die Ergebnisse der Arbeitsgruppe am Vormittag erläutert und mit Teilnehmern der anderen beiden Arbeitsgruppen vom Vormittag diskutiert. Die eigentlichen Ergebnisse wurden hierbei nicht in Frage gestellt, jedoch wurden grundsätzlichere Fragen aufgeworfen. So wurde angemerkt, dass für ein Rechentool die Möglichkeiten der Auswahl reduziert werden müssten, um die Anwender nicht von Beginn an zu überfordern. Hier wäre eine Reduktion der Kostenkomponenten zu untersuchen. Diese könnten evtl. als allgemeingültige Kosten im Lebenszykluskostenmodell hinterlegt werden. Zudem sollten die Verhältnisse gewahrt bleiben. Eine sehr detailreiche Eingabe für eine Kostenkomponente, welche am Ende nur einen sehr geringen Prozentsatz der Lebenszykluskosten ausmacht, wird als nicht zielführend angesehen.

Zudem wurde diskutiert, die anfallenden Betriebskosten zu saldieren und zu untersuchen, ob sich diese bei unterschiedlichen Systemen ggf. aufheben. Wenn dem so ist, würden diese Kosten für eine vergleichende Bewertung auch nicht notwendig sein. Jedoch sollen die Lebenszykluskosten auch einen Anhaltspunkt liefern, welche Kosten evtl. im Lebenszyklus auftreten. Somit müssten alle Kosten enthalten bleiben.

Zusammenfassung der beiden AGs (Vormittag und Nachmittag)

- Alle abgefragten Systeme für „Regelfall“ Mittelstreifen, für Seitenstreifen andere Systeme.
- Kostenkomponente Inspektion kann entfallen
- Winterdienst kann für Mittelstreifen entfallen, im Seitenstreifen wichtig. Evtl. genauere Erhebung zu Systemen in Seitenstreifen.
- Reinigung der Entwässerungseinrichtungen vor Schutzeinrichtung abhängig, ob Einrichtung vorhanden, und bei geschlossenen Systemen mit Faktor 2 zu Grundkosten. Grundkosten bei offenen Systemen.
- Bankettschälen bei offenen Systemen in Berechnung einfügen. Faktor für geringen Pfofenabstand einfügen. Daten müssen in zusätzlicher Erhebung eingeholt werden.
- Reparatur nach Unfall wie in Berechnung, evtl. Verifizierung der Kosten durch Reparaturlisten in Meistereien.
- Externe Kosten „Staukosten“ in allen Arbeiten unter Verkehr einrechnen.



Arbeitsgruppe Baukosten/Rückbau

Im Rahmen des Projektes wurden die Baukosten abgefragt und ausgewertet, die über den Lebenszyklus einer Schutzeinrichtung entstehen. Die ermittelten Ansätze wurden vorgestellt. Dazu wurden folgende einzelne Fragen diskutiert:

- Baukosten fallen nicht nur bei der Errichtung, sondern auch bei Reparaturen (Austausch von Elementen) an. Welcher Anteil der ursprünglichen Baukosten ist für Reparaturen zu veranschlagen?
- Welchen Preissteigerungsraten unterliegen die Kosten für Schutzeinrichtungen? Sind diese unterschiedlich für die verschiedenen Systeme? Muss die Preissteigerung nach Lohn- und Materialanteil differenziert werden?
- Am Ende der Lebensdauer sowie ebenfalls beim Austausch von Elementen sind Rückbaukosten zu veranschlagen. Können diese separat angegeben werden? Wie gehen die Gutschriften für das Materialrecycling von Stahlschutzplanken ein? In welcher Höhe sind diese aktuell und zukünftig anzusetzen?

Zusammenfassung der AG (Vormittag)

Bereits vor dem Workshop wurden die Reparaturkosten im forschungsbegleitenden Ausschuss auf Erfahrungswerten basierend angegeben. Bei den Reparaturkosten sind die Kosten für die Verkehrssicherung zu berücksichtigen. Der Autobahnmeister zieht zur Entscheidung, ob repariert wird, die ZTV-FRS heran (FGSV, 2017).

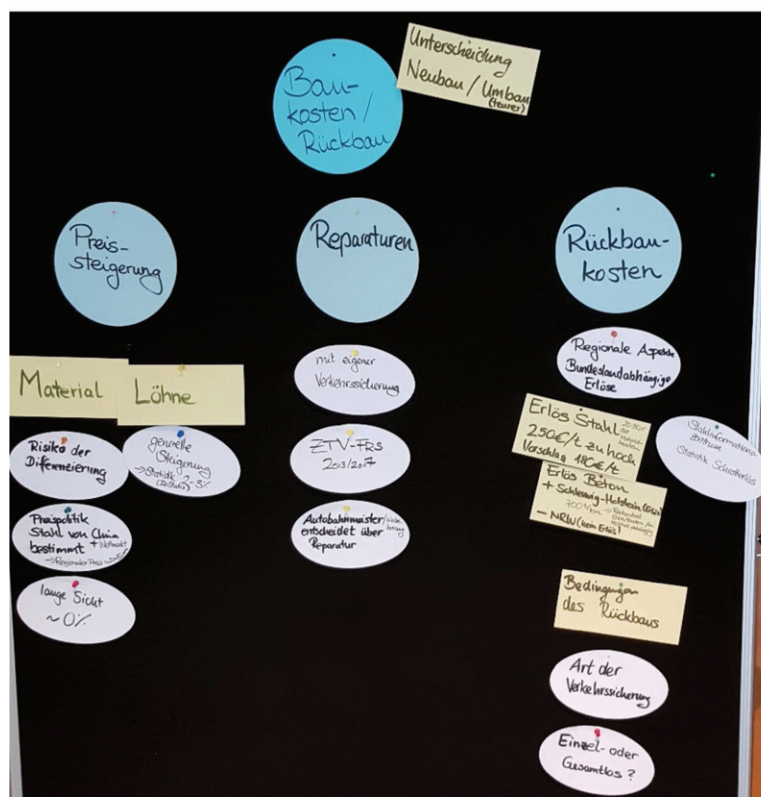
Die Preissteigerung wird in Lohn und Material unterteilt. Für Lohnkosten wird eine Steigerung auf Basis vergangener Werte vorgeschlagen. Für Materialkosten wäre eine Differenzierung mit einer hohen Unsicherheit verbunden, da die Preisbildung für Stahl z. B. durch den Weltmarkt als Ganzes, China sowie regionale Aspekte innerhalb Europas und Deutschlands sehr komplex ist. Deshalb wird für Materialkosten

auf lange Sicht (wie z. B. bei der vorgenommenen Lebenszykluskostenberechnung über 25 Jahre) 0 % vorgeschlagen.

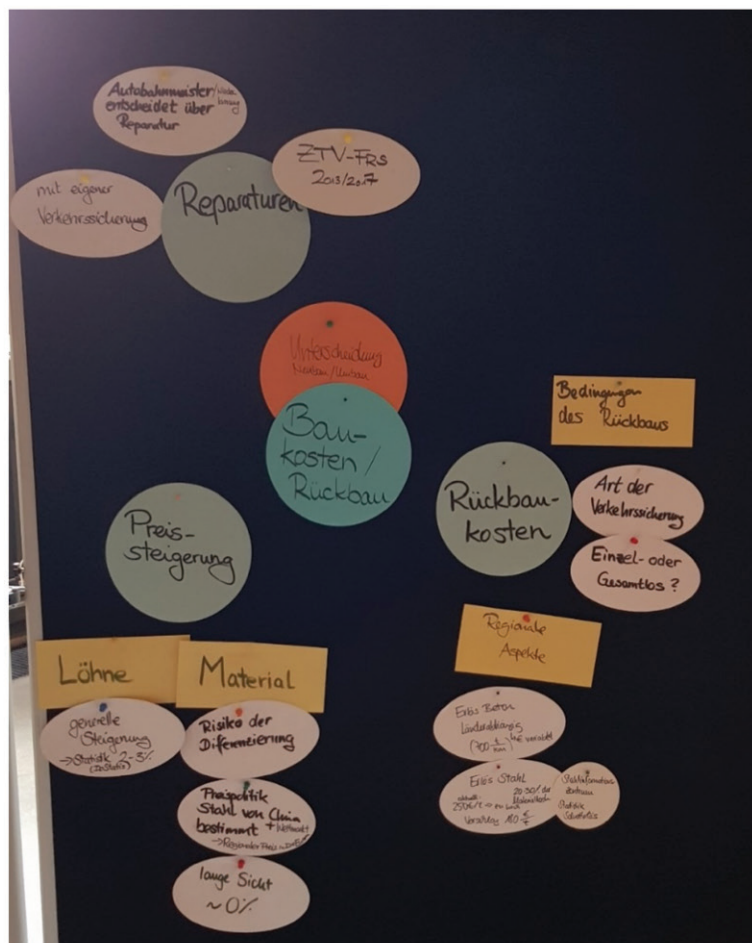
Auch die Rückbaukosten wurden schon vor dem Workshop vom forschungsbegleitenden Ausschuss mit Hilfe von Erfahrungswerten angegeben. Die Rückbaukosten hängen stark von individuellen Parametern ab. Diese wurden im Workshop identifiziert:

- Die Vergabe der Errichtung der Schutzeinrichtung kann als Einzel- oder Gesamtlös erfolgen. Dies hat jedoch im Rahmen der Studie zunächst keine Relevanz, sondern kann höchstens beim Einsatz des Tools zur Entscheidungsfindung berücksichtigt werden.
- Die Art der Verkehrssicherung während des Rückbaus nimmt Einfluss auf die Kosten. Es wird versucht, Daten für verschiedene Arten der Verkehrssicherung zu erhalten. Erste Werte wurden bereits vor dem Workshop von den Herren Petersen und Schmidt genannt.
- Die mit dem Material verbundenen Kosten bzw. Erlöse am Lebensende unterliegen starken Schwankungen. Während der Betonerlös stark vom Bundesland abhängt, variiert der Stahlpreis weniger nach Region, sondern mehr im zeitlichen Verlauf. Es wurde auf das Stahlinformationszentrum verwiesen, welches eine Schrotterlös-Statistik führt. Als Richtwert wurden 180 €/t vorgeschlagen.

Bei den Baukosten ist entscheidend, ob es sich um einen Neubau oder einen Umbau der Straße handelt. Der Umbau macht laut Workshop-Teilnehmern das Gros der Bauvorhaben von Schutzeinrichtungen aus. Dies hat aber für die aktuellen Berechnungen keine Relevanz.



(alte Anordnung)



(neue Anordnung)

Arbeitsgruppe Planer- und Anwenderbedürfnisse

Ziel des Projekts ist u. a. die Entwicklung eines Rechentools, das es den ausschreibenden Stellen von Schutzzeineinrichtungen ermöglicht, die Kosten von verschiedenen Schutzzeineinrichtungen über den gesamten Lebenszyklus zu vergleichen.

- Welche Erwartungen haben Sie an ein solches Tool?
- Welche Eingangsdaten für die Ermittlung der Lebenszykluskosten sind aktuell mit welchem Aufwand und an welcher Stelle verfügbar? Welche Vereinfachungen sind ggf. erforderlich, um das Tool möglichst anwenderfreundlich zu gestalten? Welche weiteren Daten können zukünftig generiert werden? Welche Voraussetzungen müssen dafür geschaffen werden?
- Lassen sich generelle Empfehlungen für die Datenerhebung ableiten, die unabhängig vom spezifischen Anwendungsfall eingehalten werden sollten?
- Welche Beweggründe führen bei ausschreibenden Stellen zur Vorab-Festlegung des Materials der Schutzzeineinrichtung?
- Werden die Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen (EWS) bei der Ausschreibung von Schutzzeineinrichtungen angewendet? Stellt die Ermittlung der Lebenszykluskosten hier eine sinnvolle Ergänzung dar?
- Unterscheiden sich die Planungskosten für die verschiedenen Systeme? Welches sind die entscheidenden Einflussfaktoren auf die Höhe der Planungskosten? Lassen sich die Planungskosten für Schutzzeineinrichtungen entsprechend der HOAI nach den Herstellungskosten und der Honorarzone ermitteln? Was ist hier anzusetzen?

Die Erkenntnisse dieser AG wurden am Nachmittag weiterentwickelt und finden sich unter „Zusammenfassung der beiden AGs“

Arbeitsgruppe Ansätze für vereinfachte LCC-Berechnung – Zusammenfassung der beiden AGs (Vor- und Nachmittag)

Im Verlauf des Workshops am Vormittag und Nachmittag wurde der Fokus der Betrachtung von Daten hin zu Ablauf und Prozess verschoben, um zu erörtern, wo das Tool den besten Nutzen erzeugen kann.

Es wird festgestellt, dass sich eine realistische Akzeptanz nur ergibt, wenn eine Win-Win-Situation erzeugt wird, d. h., wenn sowohl der Datenlieferant als auch der Auswerter bzw. Nutzer des Tools einen Nutzen daraus ziehen. Dies wird z. B. dann erzeugt, wenn das Tool Bestandteil eines integrierten oder strategischen Qualitätsmanagements wird.

Durch die Diskussion ergibt sich, dass das Tool eher als Planungstool sowie ggf. bereits davor als Ausgangspunkt für Planungen, d. h. als politische Vorgabe für Planungen, genutzt werden sollte. Dem steht der Einsatz als ausschreibungsbegleitendes / -bewertendes Tool gegenüber.

Um das Tool während der Planungsphase unterstützend einzusetzen, wird festgestellt, dass zunächst ein (politisches) Fernziel vom Auftraggeber definiert und bekanntgegeben sein muss. Es wird die Frage gestellt, ob das Tool sogar unterstützend bei der Definition (politischer) Fernziele wirken kann. Diese Fernziele können z. B. sein:

- Lebenszykluskosten als Bestandteil von Ausschreibungen
- Wie ist dieses Kriterium im Planungsprozess bzw. in Ausschreibungen einzubringen?

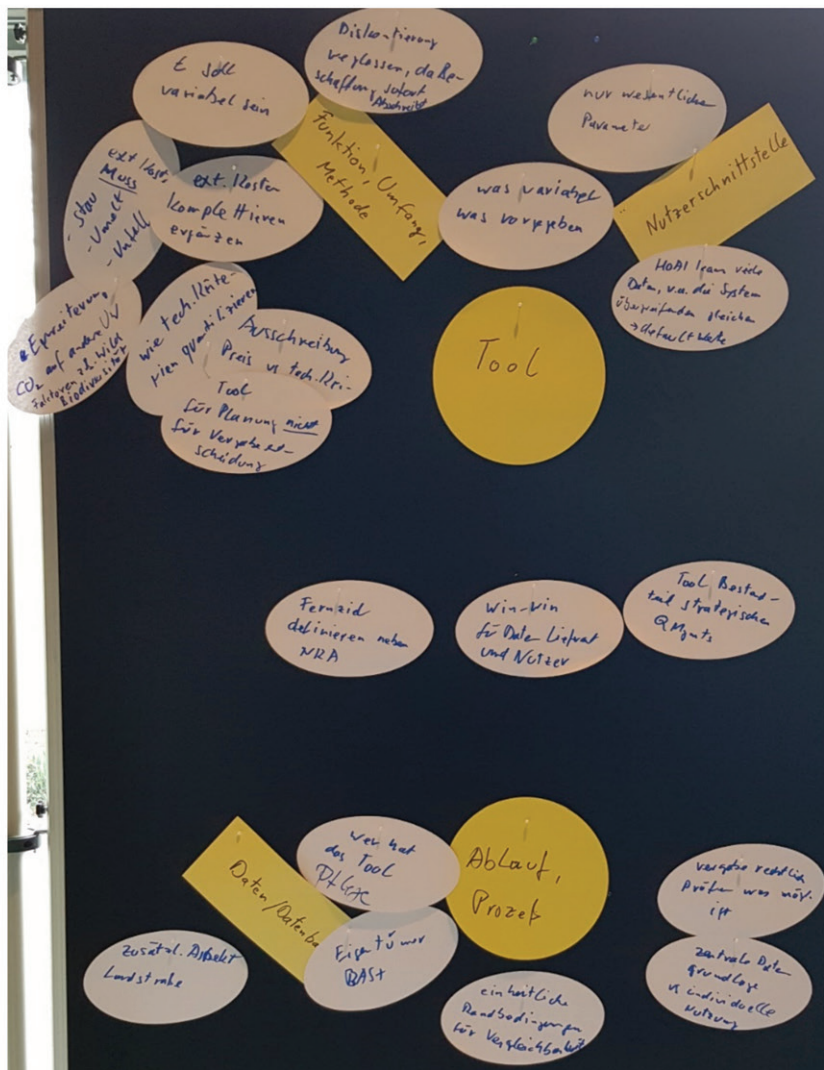
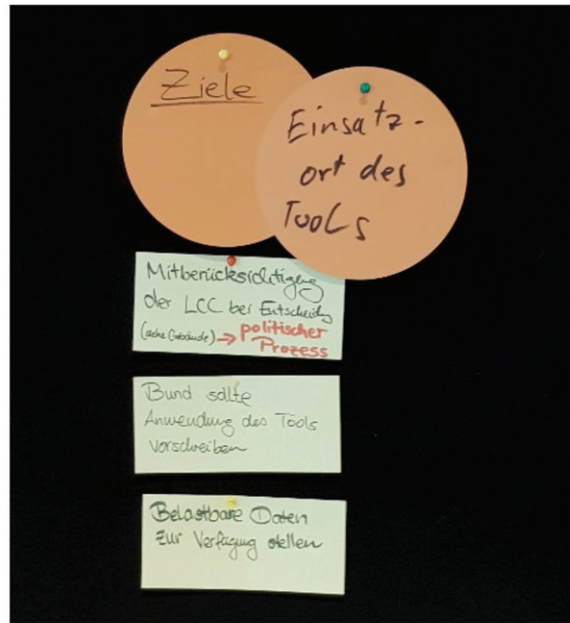
Um das Tool gewinnbringend einzusetzen, gilt es zunächst, einheitliche und rechtlich stabile Daten sowie Randbedingungen zu erzeugen. Es wird vermutet, dass dies einen Eigentümer benötigt, der sicherstellt, dass Daten gesammelt, einheitlich gehalten und gepflegt werden. Als potentieller „Eigentümer“ wird hierfür die BAST angedacht.

Sollte das Tool mehr im Planungsbereich eingesetzt werden, wird empfohlen, dass hauptsächlich „Standard“-Werte zu finden sind, aus welchen der Planer auswählen kann. Lediglich wirklich individuelle und freie Parameter sollten frei einzugeben sein. Dies sind sehr wenige. Es wird der Wunsch ausgesprochen, dass diese Studie dies erkennen lassen sollte. Die Teilnehmer schlagen vor, dass, falls entschieden wird, dass das Tool nach der Planung auch für die Entscheidung eingesetzt wird, Standard-Werte überschreibbar sein sollten, sodass die Berechnung maximal individualisierbar ist.

Es wird mehrheitlich darauf hingewiesen, dass externe Kosten unbedingt zu berücksichtigen sind und evtl. noch diversifizierter betrachtet werden sollen. Dies betrifft umweltbezogene Kosten (z. B. Kosten für CO₂-Äquivalente) sowie Folgen aus Unfällen und Stau.

Weitere Angaben und Hinweise mit Blick auf das Tool sind:

- Die Nutzungsdauer sollte immer variabel sein. Der Standard kann 25 Jahre als Einstieg sein, sollte aber nicht eingefroren werden.
 - Schließlich wurde angemerkt, dass kritisch zu überdenken sei, ob das Tool alle LCC-relevanten Kosten aufsummiert, auch wenn diese nicht relevant oder identisch über alle Systeme hinweg sind. Damit tragen sie zwar zu den Gesamtkosten bei, sind für die Entscheidungsfindung bzw. zur Unterscheidung verschiedener Schutzeinrichtungen nur insofern relevant, als die relativen Unterschiede zwischen den Systemen von den Gesamtkosten abhängen.
- ➔ Hieraus ergibt sich die Frage nach der Aussagefähigkeit des Tools. Es kann entweder nur zur Entscheidungsfindung dienen, indem es auf die Unterschiede der SE-Systeme fokussiert, oder alle relevanten Kosten erfassen und Gesamtwerte ermitteln, auch wenn diese z. B. identisch oder marginal sind.



Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2018

V 300: Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten

Werkenthin, Kluge, Wessolek

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 301: Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung

Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 302: Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB

Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 303: Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer

Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter,

Jeschke, Skottke € 19,50

V 304: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015

Fitschen, Nordmann € 31,00

Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,00

V 305: Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen

Hartmann, Londong € 16,00

V 306: Anpassung des bestehenden Straßennetzes an das Entwurfskonzept der standardisierten Straßen – Pilotprojekt zur Anwendung des M EKLBest

Lippold, Wittig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 307: Evaluation des Sicherheitsaudits von Straßen in der Planung

Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Bark, Beaulieu, Theis € 17,50

V 308: Überarbeitung und Aktualisierung des Merkblattes für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 1999)

Gerstenberger, Hösch, Listl, Schwietering

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 309: Photokatalytische Oberflächen zur Minderung von Stickoxidbelastungen an Straßen – TiO₂-Pilotstudie Lärmschutzwand

Baum, Lipke, Löffler, Metzger, Sauer € 16,50

V 310: Umweltfreundlicher Straßenbelag – photokatalytischer Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie

Wang, Oeser, Steinauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 311: Feldversuch mit Lang-Lkw

Irzik, Kranz, Bühne, Glaeser, Limbeck, Gail, Bartolomeaus, Wolf,

Sistenich, Kaundinya, Jungfeld, Ellmers, Kübler, Holte, Kaschner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 312: Sicherheitswirkung, Dauerhaftigkeit und Lärmemission von eingefrästen Rüttelstreifen

Hegewald, Vesper, Irzik, Krautscheid, Sander, Lorenzen, Löffler, Ripke, Bommert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

2019

V 313: Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen

Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50

V 314: Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten

Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50

V 315: Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung

Kappich, Westermann, Holst € 15,50

V 316: Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände

Lindner, Hartmann, Schulze, Hübel € 18,50

V 317: Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen

Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Walther € 22,00

V 318: Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen

Wolf, Berger, Bärwolff € 15,50

V 319: Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen

Lippold, Vettters, Ressel, Alber

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 320: Einsatzbereiche und Entwurfs Elemente von Rad-schnellverbindungen

Malik, Lange, Andriese, Gwiasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00

V 322: Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren

Hausmann € 18,00

V 323: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016

Fitschen, Nordmann € 31,50

Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,00

2020

V 321: Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement

Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00

V 324: Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA

Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckließ, Schimpf, Schmotz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 325: Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete

D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 326: Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen

Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50

V 327: Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse

Frenken, Mahmoudi € 16,50

- V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**
Meisel, Balzer-Hebborn, Ellmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 329: **Streckenbezogene Glättevorhersage**
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50
- V 330: **Führung des Radverkehrs an Landstraßen**
Baier, Leu, Rittershaus
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 331: **Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**
Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00
- V 332: **Räumliche Linienführung von Autobahnen**
Lippold, Zösch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 333: **Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit**
Hänisch, Heidebrunn € 17,00
- V 334: **Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**
Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00
- V 335: **Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen**
Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00
- V 336: **Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten**
Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50
- V 337: **Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung**
Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50

2021

- V 338: **Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs**
Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 339: **Aktualisierung der Datenbank MARLIS**
Schneider, Turhan, Pelzer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 340: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017**
Fitschen, Nordmann € 31,00
- V 341: **Lebenszykluskostenbewertung von Schutzzeirrichtungen**
Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

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

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

www.schuenemann-verlag.de

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