

# **Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 110**

**bast**

# **Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton**

von

Martina Schnellenbach-Held  
Michael Peeters  
Gregor Miedzinski

Universität Duisburg-Essen  
Institut für Massivbau  
Essen



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 Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, 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 Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

#### **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt FE15.0510/2011/DRB:**  
Intelligente Bauwerke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton

**Fachbetreuung**  
Tabea Neumann

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-95606-129-5

Bergisch Gladbach, Januar 2015

## Kurzfassung – Abstract

### **Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton**

Der Bericht enthält die Beurteilung von schädigungsrelevanten Einwirkungen und Schädigungspotenzialen von Betonbrücken sowie deren Erfassung am Bauteil mithilfe aussagekräftiger Parameter und geeigneter Sensoren im Rahmen des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ der BAST. Die Grundlage zur Beurteilung von Schädigungspotenzialen bildet die Auswertung tatsächlich aufgetretener Schäden an Stahlbeton- und Spannbetonbrücken (97.662 Schäden an 3.474 Brücken). Neben der Aufbereitung der chronologischen Entwicklung von Vorschriften und Normen für den Bau von Brücken wurden Schäden infolge von Planungs- und Entwurfsfehlern, sowie Ausführungsfehlern analysiert. Den Schwerpunkt des Berichts bilden die Darstellung und Bewertung von Schädigungspotenzialen getrennt für die Widerstandsseite (auffällige Bauteile/Konstruktionen) sowie für die Einwirkungsseite (relevante Einwirkungen). Bauteile und Konstruktionen werden dazu im Hinblick auf die Merkmale Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit untersucht. Darüber hinaus werden maßgebende Einwirkungen aus den Umweltbedingungen und insbesondere die Einwirkungen infolge des (Schwer-)Verkehrs bewertet. In einem weiteren Arbeitsschritt werden geeignete Schädigungsmodelle zur Beschreibung bekannter Schädigungsprozesse bei Brücken aus Stahl- und Spannbeton dargestellt und die modellspezifischen Einflussgrößen detailliert aufbereitet. Die Darstellung relevanter Parameter zur Erfassung von Einwirkungen und Schäden an Brückenbauwerken, sowie die Erfassung dieser Parameter mit geeigneten Sensoren bilden einen weiteren Schwerpunkt des Projektes. Darüber hinaus werden die Grundlagen eines Datenerfassungssystems dargestellt und abschließend Genauigkeits- und Häufigkeitsbereiche für die Datenerfassung und die Möglichkeiten der Sensorplatzierung aufgezeigt. Die Zusammenstellung der Ergebnisse erfolgt abschließend in Form eines Handbuchs.

### **Smart bridge – Relevant actions and the damage potentials of concrete bridges**

This report presents the evaluation of relevant actions and the damage potentials of concrete bridges within the project “Intelligente Brücke” by the German Federal Highway Research Institute (BAST). Further the acquisition with significant parameters and suitable sensors is described as well. The evaluation of the damage potentials is based on actually occurred damages to reinforced and prestressed concrete bridges (97.662 damages to 3.474 bridges). Both chronological development of rules and standards for the bridge construction and damages due to errors in planning, design and execution are analysed. The report focuses on the presentation and evaluation of the damage potentials separated for the resistance side (suspicious construction members or structures) and the action side (relevant actions). Therefor suspicious structural members are evaluated in relation to structural stability, durability and road safety. Furthermore relevant actions caused by environmental conditions and especially by the effect of (heavy) traffic loads are appraised. A further work step deals with the appropriate deterioration models to describe known damage processes on reinforced- and prestressed-concrete-bridges and their specific influence variables. Another research focus is the determination of significant parameters used to acquire actions and damages on bridges as well as the recording of these parameters with suitable sensors. Furthermore the principles of the data acquisition system, accuracy and frequency ranges for the data acquisition and opportunities for the sensor placements are presented. Finally the results of the research are consolidated in form of a manual.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	7	3.1.6 Mindestbewehrung/ Rissbreitenbegrenzung .....	43
1.1	Problemstellung und Zielsetzung .....	7	3.1.7 Dauerhaftigkeit/Chloride .....	44
1.2	Durchführung des Forschungs- vorhabens .....	7	3.2 Ursachen von Schäden .....	44
<b>2</b>	<b>Schadenserfassung und -auswertung</b> .....	8	3.2.1 Schäden infolge Planungs- und Entwurfsfehlern .....	45
2.1	Grundlage/Hintergrund .....	8	3.2.2 Schäden infolge Ausführungs- fehlern .....	46
2.1.1	Begriffserläuterung .....	8	3.2.3 Schäden infolge Einwirkungen .....	47
2.1.2	Grundlagen der Bauwerksprüfung und Schadenserfassung .....	9	<b>4</b>	<b>Schädigungspotenziale</b> .....
2.1.3	Merkmale des Brückenbestandes in Deutschland .....	12	4.1	Bewertungsgrundlage von Schädigungspotenzialen .....
2.2	Aufbereitung tatsächlich aufgetretener Schäden .....	14	4.1.1	Zusammenfassung relevanter Schäden .....
2.2.1	Eigenschaften und Auswahlkriterien der untersuchten Brücken .....	14	4.2	Schädigungspotenziale der Widerstandsseite (Konstruktion) .....
2.2.2	Untersuchungsgrundlage .....	16	4.2.1	Überbau .....
2.2.3	Beispiele typischer Schadensbilder ...	20	4.2.2	Unterbau .....
2.2.4	Auswertung nach Baujahr .....	22	4.2.3	Lager .....
2.2.5	Auswertung nach Brückenlänge .....	29	4.2.4	Ausrüstung .....
2.2.6	Auswertung nach Brückenklasse/ Tragfähigkeit .....	31	4.2.5	Explizite Auswertung von Brücken mit Baubeginn ab 2003 .....
2.2.7	Auswertung nach Schadensort bzw. Lage des Schadens .....	33	4.3	Schädigungspotenziale der Ein- wirkungsseite (Beanspruchungen) ...
2.2.8	Auswertung gemeinsam auftretender Schäden .....	35	4.3.1	Verkehrsbeanspruchungen .....
2.2.9	Auswertung nach Schadensrelevanz (Schadenswertung nach RI-EBW-PRÜF) .....	37	4.3.2	Temperatur .....
<b>3</b>	<b>Schadensursachen</b> .....	40	4.3.3	Umgebungsbedingungen (Chloride/CO <sub>2</sub> ) .....
3.1	Entwicklung der Bemessungs- und Konstruktionsgrundsätze .....	40	4.3.4	Frost-/Frost-Tausalz-Angriff .....
3.1.1	Einwirkungen aus Verkehr .....	40	4.3.5	Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ...
3.1.2	Koppelfugen .....	42	4.3.6	Spannungsrisskorrosion (SpRK) .....
3.1.3	Spannungsrisskorrosion (SpRK) .....	42	4.3.7	Feuchte .....
3.1.4	Schubtragfähigkeit .....	43	4.4	Implementierung der Ergebnisse in ein zuverlässigkeitsbasiertes Erhaltungsmanagement .....
3.1.5	Temperatur .....	43	4.4.1	Zuverlässigkeitsbasiertes Erhaltungsmanagement .....
			4.4.2	Implementierung der Ergebnisse .....

<b>5</b>	<b>Schädigungsmodelle</b> . . . . .	72	6.2.7	Lagerschäden . . . . .	93
5.1	Karbonatisierung . . . . .	73	6.2.8	Schäden an der Ausrüstung . . . . .	93
5.1.1	Schädigungsmodell nach SCHIEßL . . . . .	73	6.3	Übersicht der relevanten Parameter und Sensoren . . . . .	94
5.1.2	Schädigungsmodell nach Model Code . . . . .	74	<b>7</b>	<b>Messdatenerfassung</b> . . . . .	96
5.2	Chlorideindringung . . . . .	75	7.1	Datenübertragung . . . . .	97
5.2.1	Schädigungsmodell nach Model Code . . . . .	75	7.1.1	Drahtgebundene Systeme . . . . .	97
5.2.2	Empirisches Schädigungsmodell . . . . .	77	7.1.2	Drahtlose Systeme . . . . .	97
5.3	Bewehrungskorrosion . . . . .	77	7.1.3	Energieversorgung . . . . .	97
5.3.1	Schädigungsmodelle zum Materialabtrag infolge Korrosion . . . . .	78	7.2	Messwerterfassung und Sensorplatzierung . . . . .	98
5.3.2	Schädigungsmodelle zur Rissbildung infolge Korrosion . . . . .	79	<b>8</b>	<b>Handbuch zur Darstellung von Schädigungspotenzialen</b> . . . . .	100
5.4	Spannungsrissskorrosion . . . . .	80	<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> . . . . .	101
5.4.1	Handlungsanweisung des BMVBS . . . . .	80	<b>10</b>	<b>Literatur</b> . . . . .	103
5.4.2	Stochastisches bzw. vereinfachtes Verfahren nach LINGEMANN . . . . .	81	<b>11</b>	<b>Anhang</b> . . . . .	111
5.5	Frost-/Frost-Tausalz-Angriff . . . . .	82	11.1	Schadensauswertung . . . . .	111
5.5.1	Schädigungsmodell zur Schädigung der Betonstruktur . . . . .	83	11.1.1	Diagramme der Untersuchungsgrundlage . . . . .	111
5.5.2	Schädigungsmodell zur Abwitterung der Betonoberfläche . . . . .	84	11.1.2	Diagramme zur Schadensauswertung . . . . .	112
5.6	Alkali-Kieselsäure-Reaktion . . . . .	85	11.1.3	Diagramme zu gleichzeitig auftretenden Schäden . . . . .	117
5.7	Ermüdung . . . . .	85	11.2	Auszug aus der Schadens- datenbank aus SIB-Bauwerke . . . . .	119
5.8	Zusammenfassung . . . . .	87	<b>12</b>	<b>Anlage – Handbuch</b> . . . . .	123
<b>6</b>	<b>Relevante Parameter und Sensoren</b> . . . . .	87			
6.1	Einwirkungen . . . . .	88			
6.1.1	Verkehrsbeanspruchung . . . . .	88			
6.1.2	Umgebungs- und Umwelteinflüsse . . . . .	89			
6.2	Schäden . . . . .	90			
6.2.1	Unzureichende Betondeckung . . . . .	90			
6.2.2	Risse im Beton . . . . .	90			
6.2.3	Korrosion der Bewehrung . . . . .	91			
6.2.4	Schäden am Vorspannsystem . . . . .	92			
6.2.5	Bauteilverformungen/ Durchbiegungen . . . . .	93			
6.2.6	(Fundament-)Setzungen . . . . .	93			

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Entwicklung des Brückenbaus wurde in Westdeutschland maßgeblich vom Wiederaufbau nach dem zweiten Weltkrieg bestimmt. Der wirtschaftliche Aufschwung und der erforderliche Aufbau der Infrastruktur führten zu einem enormen Bedarf an neuen Brückenbauwerken. Der Ausbau des Brückenbestandes wurde zu dieser Zeit vor allem mit der damals relativ neuen Spannbetonbauweise vorangetrieben. Der damalige Wissensstand und die fehlenden Erfahrungen führten dazu, dass Brücken aus dieser Zeit einige typische Defizite aufweisen, die heute noch Probleme bereiten. Anders als in Westdeutschland wurde das Straßennetz in Ostdeutschland erst nach der Wiedervereinigung 1990 im großen Umfang ausgebaut. Fast alle Brückenbauwerke in den neuen Bundesländern sind in den vergangenen 20 Jahren neu gebaut worden und genügen weitgehend den heutigen Anforderungen. In den alten Bundesländern hingegen stammt ein erheblicher Anteil des Brückenbestandes aus den 60er und 70er Jahren. Da inzwischen der Ausbau des Fernstraßennetzes in Deutschland als weitgehend abgeschlossen angesehen werden kann, stellen die Erhaltung und die Anpassung des Brückenbestandes an neue Anforderungen die Hauptaufgaben für die Zukunft dar. Insbesondere die prognostizierten Steigerungen des (Schwer-)Verkehrs sowie die ungünstige Entwicklung der Altersstruktur erfordern einen enormen Aufwand zur Aufrechterhaltung der geplanten Nutzungsdauer. Aufgrund der begrenzten finanziellen und personellen Mittel ergeben sich neue Aufgaben für ein effizientes und effektives Erhaltungsmanagement. Das derzeitige schadensbasierte Erhaltungsmanagement ergibt sich maßgeblich aus den Bauwerksprüfungen. Dabei werden jedoch keine zukünftigen Entwicklungen berücksichtigt und Risiken, z. B. bezüglich der Tragfähigkeit fließen nur indirekt ein. Im Rahmen des Themenschwerpunktes „Intelligente Bauwerke“ der BAST werden daher innovative Systeme entwickelt, die individuelle Einwirkungen und Defizite, Informationen über Bauwerksreaktionen und Zustandsveränderungen sowie Zustandsprognosen und Gefährdungspotenziale berücksichtigen. Eine wesentliche Aufgabe besteht darin, relevante Informationen über Einwirkungen und Widerstände mittels intelligenter Sensorik direkt am Bauteil zu erfassen und ganzheitlich in Echtzeit zu bewerten. Dabei ist der aktuelle Kenntnisstand über schädi-

gungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brücken aus Beton zu analysieren und darauf aufbauend sind Empfehlungen für die Beurteilung von Brückenbauwerken zu erarbeiten. Die Ergebnisse stellen die Grundlage dar, zukünftige Brückenbauwerke unter Einsatz entsprechender Sensordaten zuverlässig beurteilen zu können. Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Beurteilung von schädigungsrelevanten Einwirkungen und Schädigungspotenzialen von Betonbrücken sowie deren Erfassung am Bauteil mithilfe von aussagekräftigen Parametern. Auf Grundlage der Bewertung tatsächlich aufgetretener Schäden werden schädigungsrelevante Einwirkungen systematisch aufbereitet und Bauwerkstypen sowie Konstruktionsweisen im Hinblick auf mögliche Schädigungspotenziale bewertet. Parameter und Schädigungsmodelle zur Abschätzung von Schädigungspotenzialen sowie geeignete Sensoren zur Erfassung von Einwirkungen und Reaktionen am Bauwerk werden dargestellt und bewertet. Abschließend werden grundlegende Eigenschaften von Überwachungssystemen aufgezeigt und Möglichkeiten der Energieversorgung sowie Empfehlungen zur Genauigkeit und Häufigkeit der Messdatenerfassung gegeben. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens bilden in Form eines Handbuchs die Grundlage für eine ganzheitliche Erfassung und Bewertung von schädigungsrelevanten Einwirkungen und Schadenspotenzialen an Brückenbauwerken.

## 1.2 Durchführung des Forschungsvorhabens

Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden zunächst tatsächlich aufgetretene Schadensbilder dargestellt und analysiert. Dazu werden neben den bekannten Schadensfällen aus der Literatur (z. B. Dokumentationen „Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken“ des BMV aus den Jahren 1982 und 1994) im Wesentlichen Schäden aus den Datenbanken der BAST (aus dem Programm SIB-Bauwerke) für eine systematische Aufbereitung herangezogen. Neben der Auswertung tatsächlich aufgetretener Schäden getrennt für wesentliche Unterscheidungsmerkmale, wie beispielsweise das Baujahr, die Brückenlänge, die Brückenklasse usw., wird auch das gleichzeitige Auftreten mehrerer Schäden untersucht. Dabei werden besonders die Ursachen und Auswirkungen der Schäden im Hinblick auf die Merkmale Standsicherheit, Ver-



kehrssicherheit und Dauerhaftigkeit bewertet und kategorisiert. Darauf aufbauend werden sowohl relevante Einwirkungen als auch kritische Bauwerkstypen und Konstruktionen herausgestellt. Bei den relevanten Einwirkungen wird unterschieden in Einwirkungen aus dem Bauwerk, aus der Bauwerksnutzung und aus der Bauwerksumgebung. Zur Beurteilung von Konstruktionen werden die Brücken in die Bauwerkselemente Überbau, Unterbau, Lagerung und Ausrüstung eingeteilt. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird die Schädigungsrelevanz, also das Ausmaß des Schadens auf das Bauteil oder das Gesamtbauwerk untersucht und das Schädigungspotenzial von relevanten Einwirkungen und Konstruktionen dargestellt. Nach der Identifizierung der Schäden werden zur Erfassung und Bewertung von Schadenspotenzialen zunächst derzeit vorliegende Schädigungsmodelle (beispielsweise für Korrosion, Chlorideindringung, Karbonatisierung, Ermüdung u. a.) dokumentiert und systematisch aufbereitet. Es wird herausgearbeitet, welche Schädigungsmodelle bei relevanten Schadensbildern angewendet werden können und für welche Schadensfälle derzeit keine geeigneten Modelle vorliegen. Auf Grundlage der relevanten Einwirkungen und Schäden sowie der Schädigungsmodelle, werden spezifische Parameter definiert, die zur Beurteilung des Schädigungspotenzials am Bauwerk notwendig sind. Im Anschluss werden geeignete Sensoren zur Erfassung dieser definierten Parameter zusammengestellt und beurteilt. Vorrangig werden dazu Sensoren ausgewählt, die für die Installation bei den herrschenden Umgebungsbedingungen geeignet sind. Dabei werden sowohl ausgereifte Sensortechnologien (Dehnungsmessstreifen oder faseroptische Fiber-Bragg-Gitter Sensoren) als auch Sensoren, bei denen noch Forschungsbedarf besteht, betrachtet. Darüber hinaus werden drahtgebundene und drahtlose Überwachungssysteme dargestellt und Möglichkeiten der Energieversorgung, insbesondere bei drahtlosen Sensornetzwerken, aufgezeigt. Abschließend werden Anforderungen für die Genauigkeits- und Häufigkeitsbereiche der Messdatenerfassung vorgeschlagen.

## 2 Schadenserfassung und -auswertung

### 2.1 Grundlage/Hintergrund

#### 2.1.1 Begriffserläuterung

Vor der Erfassung und Bewertung aufgetretener Schäden an Betonbrücken werden im Vorfeld die Begriffe Fehler, Mangel, Schaden und Schädigungsrelevanz definiert, da diese im allgemeinen Sprachgebrauch nicht deutlich voneinander abgegrenzt werden.

Der Begriff „Fehler“ ist im Zusammenhang mit einer menschlichen Handlung zu sehen. Er beschreibt die Abweichung zwischen tatsächlichen zielgerichteten Handlungen und den Zielen der Handlung [KöMZ86]. Ein Fehler kann dabei einen oder mehrere Mängel nach sich ziehen.

Der Begriff „Mangel“ hingegen ist im Zusammenhang mit dem Zustand einer Sache zu sehen. Ein Mangel ist im Sinne der Bauwerksprüfung nach [RI-EBW-PRÜF] die Abweichung der Bauwerks- oder Bauteilbildung vom planmäßigen Sollzustand oder von den zum Prüfzeitpunkt geltenden Regelwerken. Er kann eine Beeinträchtigung der Standsicherheit (S), der Verkehrssicherheit (V) und/oder der Dauerhaftigkeit (D) darstellen.

Der Begriff „Schaden“ wird im Sinne der Bauwerksprüfung nach [RI-EBW-PRÜF] als Veränderung des Bauwerks- oder Bauteilzustandes definiert und kann zu einer Beeinträchtigung der Standsicherheit (S), der Verkehrssicherheit (V) und/oder der Dauerhaftigkeit (D) führen. Die Ursache eines Schadens ergibt sich aus einem Mangel auf der Widerstandsseite oder einer Überbeanspruchung auf der Einwirkungsseite bzw. aus der Kombination von beidem [vgl. Schn08]. Dem Begriff Schaden wird im Weiteren auch der natürliche Verschleiß (z. B. Materialalterung) zugeordnet.

Der Begriff „Schädigungsrelevanz“ beschreibt das Ausmaß (die Signifikanz) eines Schadens auf das Bauteil und/oder das Gesamtbauwerk. Die Grundlage zur Bewertung der Schädigungsrelevanz bilden die Bewertungszahlen nach [RI-EBW-PRÜF], getrennt für die Kriterien „Standsicherheit“ (S), „Dauerhaftigkeit“ (D) und „Verkehrssicherheit“ (V) (siehe Kapitel 2.2.9). Bei der Bewertung jedes Einzelschadens bezüglich der Standsicherheit und Verkehrssicherheit werden dazu die aktuellen Einflüsse des Schadens berücksichtigt, wohingegen

die Bewertung der Dauerhaftigkeit die Auswirkungen in zeitlicher Hinsicht umfasst. Zur Bewertung eines Schadens bzw. zur Zuweisung einer Bewertungszahl steht dem Bauwerksprüfer eine Datenbank mit Schadensbeispielen (Anhang zur RI-EBW-PRÜF) zur Verfügung. Auf Grundlage der Schädigungsrelevanz ergibt sich unter Berücksichtigung der Schadensursache und der Schadenshäufigkeit das Schädigungspotenzial. Dieses lässt sich sowohl für die Einwirkungsseite als auch für die Widerstandsseite beschreiben (vgl. Kapitel 4).

### 2.1.2 Grundlagen der Bauwerksprüfung und Schadenserfassung

Die Erfassung des Zustandes von Brückenbauwerken erfolgt im Rahmen planmäßiger sowie situationsbedingter Inspektionen durch die zuständigen Verwaltungen und stellt im Rahmen der Bauwerkserhaltung ein zentrales Element des Bauwerks-Management-Systems (BMS) dar. Die grundsätzlichen Möglichkeiten einer Zustandserfassung sind nach [Bram10]: (i) eine visuelle Inspektion, bei der aus dem äußeren Erscheinungsbild auf den Bauwerkszustand geschlossen wird, (ii) der Einsatz von Monitoringsystemen, bei dem das Trag- und Verformungsverhalten unter Verwendung technischer

Hilfsmittel bewertet wird und (iii) die Zustandserfassung mit Belastungsversuchen.

Die Grundlagen für die Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen und Wegen regelt die DIN 1076. Dabei unterscheidet die Norm zwischen der Bauwerksprüfung und der Bauwerksüberwachung.

Die Bauwerksprüfung setzt sich aus einer Hauptprüfung, einer einfachen Prüfung und einer Prüfung aus besonderem Anlass (Sonderprüfung) zusammen. Eine Hauptprüfung ist alle sechs Jahre an jedem Brückenbauwerk vorzunehmen. Dabei sind alle, auch schwer zugängliche Bauwerksteile, ggf. unter Zuhilfenahme von Besichtigungseinrichtungen, Rüstungen und Ähnlichem, handnah zu prüfen. Die einfache Prüfung ist drei Jahre nach einer Hauptprüfung durchzuführen, sodass sich Hauptprüfung und einfache Prüfung im Rhythmus von drei Jahren abwechseln. Sie erfolgt, soweit vertretbar als intensive, erweiterte Sichtprüfung ohne Verwendung von Besichtigungsgeräten oder -einrichtungen. Eine Sonderprüfung ist durchzuführen, wenn größere Ereignisse (Brand, Fahrzeuganprall, usw.) einen Einfluss auf den Zustand der Brücke haben und wenn die Ergebnisse aus der laufenden Beobachtung oder Besichtigung diese erforderlich

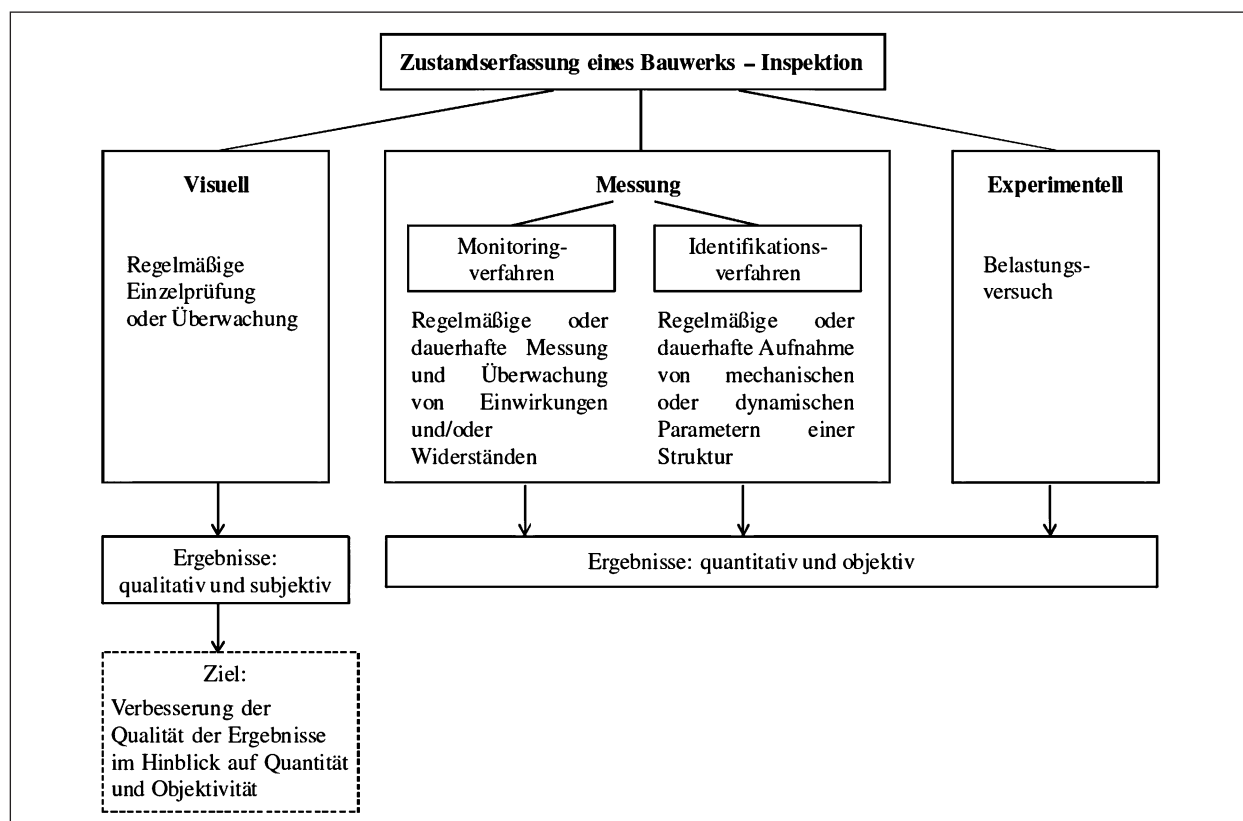


Bild 1: Überblick über die Verfahren zur Zustandserfassung eines Bauwerks [aus Bram10]



machen. Eine Sonderprüfung ersetzt jedoch weder eine Haupt- noch eine einfache Prüfung.

Im Rahmen der Bauwerksüberwachung sollen ohne Einsatz von Hilfsmitteln offensichtliche Mängel bzw. Schäden dokumentiert werden. Dabei wird zwischen der regelmäßig einmal jährlich durchzuführenden Besichtigung sowie der laufenden Beobachtung im Rahmen der Streckenkontrolle unterschieden. Bei komplexen, schwerwiegenden oder unklaren Schadensbildern können über die Bauwerksprüfung hinausgehende Untersuchungen zum Schadensausmaß und zur Schadensursache sowie zu einer sicheren Schadensbewertung erforderlich werden. Diese Untersuchungen sind im Rahmen der objektbezogenen Schadensanalyse (OSA) in Absprache mit den zuständigen Straßenbauverwaltungen der Länder, durchzuführen.

Die Datenerfassung und -auswertung bei Brückenbauwerken wird in der „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076“ (RI-EBW-PRÜF) geregelt.

Nach [RI-EBW-PRÜF] ist die Schadensbewertung für jeden Einzelschaden getrennt nach den Kriterien Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) und Dauerhaftigkeit (D) vorzunehmen. Die Definition gemäß diesen Abgrenzungskriterien innerhalb der Richtlinie ist nachfolgend zusammengestellt.

### **Standsicherheit (S)**

„Die Standsicherheit kennzeichnet die Eigenschaft eines Bauwerks bzw. einzelner Bauwerksteile, die planmäßigen Beanspruchungen (bei Nutzungsbeschränkungen entsprechend reduziert) schadlos aufnehmen zu können.“

„Die Standsicherheit ist gegeben, wenn Bauteilzustand, Baustoffqualität, Bauteilabmessungen und Bauwerksbeschilderung sowie die Beanspruchungen aus der planmäßigen Bauwerksnutzung, den Annahmen der Bemessung/Nachrechnung/Tragfähigkeitseinstufung und ggf. den Nutzungsbeschränkungen des Bauwerkes entsprechen.“

„Die Standsicherheit ist nicht gegeben, wenn Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen oder die Beanspruchungen aus der planmäßigen Bauwerksnutzung nicht den Annahmen der Bemessung/Nachrechnung/Tragfähigkeitseinstufung des Bauwerkes entsprechen bzw. erforderliche Nutzungsbeschränkungen nicht vorhanden oder nicht wirksam sind.“

### **Verkehrssicherheit (V)**

„Die Verkehrssicherheit ist ein Maß für die Bauwerksausbildung nach anerkannten Regeln der Technik zum jeweiligen Prüfungszeitpunkt, welche die Anforderungen an Sicherheit und Ordnung hinsichtlich der gefahrlosen und bestimmungsgemäßen Nutzung des Bauwerkes beinhaltet. Sie schließt damit sowohl die Sicherheit für Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge als auch die Sicherheit für Personen und Sachen im Bauwerksumfeld ein. Dabei wird eine verständige, unter Würdigung der äußeren Umstände gebotene Vorsicht und die im Verkehr übliche Sorgfalt der Verkehrsteilnehmer vorausgesetzt.“

„Die Verkehrssicherheit ist gegeben, wenn das Bauwerk keine oder lediglich geringfügige Mängel/Schäden aufweist, die keinen Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben und im Rahmen der planmäßigen Bauwerksunterhaltung behoben werden können. Sie ist ebenfalls gegeben, wenn der Bauwerksnutzer die Gefährdung rechtzeitig erkennen kann bzw. wenn die Verkehrsteilnehmer in geeigneter Weise auf Gefährdungen besonders hingewiesen und damit zu erhöhter Vorsicht angehalten werden.“

„Die Verkehrssicherheit ist nicht gegeben, wenn das Bauwerk Mängel/Schäden aufweist, von denen eine nicht erkennbare Gefahr bei der planmäßigen Bauwerksnutzung ausgeht.“

### **Dauerhaftigkeit (D)**

„Die Dauerhaftigkeit kennzeichnet die Widerstandsfähigkeit des Bauwerkes bzw. einzelner Bauwerksteile gegenüber Einwirkungen, um eine möglichst lange Nutzungsdauer unter Aufrechterhaltung der Standsicherheit und Verkehrssicherheit bei planmäßiger Nutzung und planmäßiger Bauwerkserhaltung zu erreichen.“

„Die Dauerhaftigkeit ist gegeben, wenn das Bauteil/Bauwerk keine oder lediglich geringfügige Mängel/Schäden aufweist, die im Rahmen der Bauwerksunterhaltung oder im Zuge von geringfügigen Instandsetzungsmaßnahmen behoben werden können. Es ist zu erwarten, dass das Bauteil/Bauwerk ohne Nutzungseinschränkungen entsprechend der Verkehrsbedeutung der Straße seine Nutzungsdauer erreicht.“

„Die Dauerhaftigkeit ist nicht gegeben, wenn das Bauteil/Bauwerk solche Mängel/Schäden aufweist, die nur durch umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen oder Erneuerung behoben werden kön-

nen. Werden die erforderlichen Maßnahmen nicht durchgeführt, ist zu erwarten, dass das Bauwerk lediglich mit eingeschränkter Nutzung seine konzipierte Nutzungsdauer erreicht oder eine vorzeitige Erneuerung erforderlich wird.“

## Bewertung

Die Bewertung erfolgt für die einzelnen Kriterien (S, V, D) mit Noten von 0 bis 4. Bei der Note 0 hat der Schaden keinen Einfluss auf das vorliegende Kriterium. Bei der Note 4 ist umgehend eine Nut-

zungseinschränkung vorzunehmen. Zu Einstufung und Bewertung von Schäden steht ein Katalog von Schadensbeispielen, die vom Bauwerksprüfer übernommen oder gezielt abgeändert werden können, als Anhang zur RI-EBW-PRÜF zur Verfügung. Die Umsetzung der Datenerfassung, -verwaltung und -auswertung erfolgt mit dem Programmsystem SIB-Bauwerke auf Grundlage der „Anweisung Straßeninformationsbank Teilsystem Bauwerksdaten“ (ASB-ING) des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung.

Noten	Beschreibung	Schadensausmaß/Maßnahme
1,0-1,4	sehr guter Zustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit des Bauwerks sind gegeben.</li> <li>Laufende Unterhaltung erforderlich.</li> </ul>
1,5-1,9	guter Zustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Standsicherheit und Verkehrssicherheit des Bauwerks sind gegeben.</li> <li>Die Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe kann beeinträchtigt sein.</li> <li>Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann langfristig geringfügig beeinträchtigt werden.</li> <li>Laufende Unterhaltung erforderlich.</li> </ul>
2,0-2,4	befriedigender Zustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Standsicherheit und Verkehrssicherheit des Bauwerks sind gegeben.</li> <li>Die Standsicherheit und/oder Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe können beeinträchtigt sind.</li> <li>Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann langfristig beeinträchtigt werden. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung des Bauwerks, die langfristig zu erheblichen Standsicherheits- und/oder Verkehrsbeeinträchtigungen oder erhöhtem Verschleiß führt, ist möglich.</li> <li>Laufende Unterhaltung erforderlich.</li> <li>Mittelfristige Instandsetzung erforderlich.</li> <li>Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit können kurzfristig erforderlich werden.</li> </ul>
2,5-2,9	ausreichender Zustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Standsicherheit des Bauwerks ist gegeben.</li> <li>Die Verkehrssicherheit des Bauwerks kann beeinträchtigt sein.</li> <li>Die Standsicherheit und/oder Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe können beeinträchtigt sein.</li> <li>Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann beeinträchtigt sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung des Bauwerks, die mittelfristig zu erheblichen Standsicherheits- und/oder Verkehrsbeeinträchtigungen oder erhöhtem Verschleiß führt, ist dann zu erwarten.</li> <li>Laufende Unterhaltung erforderlich.</li> <li>Kurzfristige Instandsetzung erforderlich.</li> <li>Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit können kurzfristig erforderlich sein.</li> </ul>
3,0-3,4	nicht ausreichender Zustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit des Bauwerks sind beeinträchtigt.</li> <li>Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann nicht mehr gegeben sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung kann kurzfristig dazu führen, dass die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben sind.</li> <li>Laufende Unterhaltung erforderlich.</li> <li>Umgehende Instandsetzung erforderlich.</li> <li>Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit oder Nutzungseinschränkung sind umgehend erforderlich.</li> </ul>
3,5-4,0	ungenügender Zustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit des Bauwerks sind erheblich beeinträchtigt oder nicht mehr gegeben.</li> <li>Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann nicht mehr gegeben sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung kann kurzfristig dazu führen, dass die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben sind oder dass sich ein irreparabler Bauwerksverfall einstellt.</li> <li>Laufende Unterhaltung erforderlich. Umgehende Instandsetzung bzw. Erneuerung erforderlich.</li> <li>Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit oder Nutzungseinschränkung sind sofort erforderlich.</li> </ul>

Tab. 1: Zustandsnoten nach [RI-EBW-PRÜF]

Die Bewertung des Zustands eines Bauwerks erfolgt mit dem Programm durch Berechnung einer Zustandsnote. Sie wird vom Programm mithilfe eines speziellen Algorithmus durch Überlagerung der einzelnen Schadensbewertungen (S, V, D) ermittelt. Die Zustandsnote beinhaltet alle Schäden im Hinblick auf die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit und geht zur optimierten Erhaltungsplanung in das Bauwerks-Management-System (BMS) ein.

### 2.1.3 Merkmale des Brückenbestandes in Deutschland

Bei der Auswahl von Brückenbauwerken zur Schadens Erfassung und -beurteilung wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens die Verteilung des Gesamtbestandes von Betonbrücken in Zuge der Bundesfernstraßen im Hinblick auf folgende grundlegende Kriterien berücksichtigt:

- Altersstruktur,
- Bauwerkslänge,
- Zustandsnote,
- Brückenklasse.

Zur Ermittlung entsprechender Verteilungen wurden Daten und Statistiken über den Bauwerksbestand aus verschiedenen Literaturstellen ausgewertet und das Ergebnis im Folgenden zusammengefasst.

#### Altersstruktur

Bei der Altersstruktur der Brücken in Deutschland zeigt sich, dass die Anzahl der gebauten Brücken ab den 60er Jahren, aufgrund der Bautätigkeiten im Zuge des Wirtschaftsaufschwungs stetig angestie-

gen ist. In den Jahren zwischen 1970 und 1975 wurde der Höhepunkt der neugebauten Brückenfläche erreicht. Bis zum Jahr 1990 nahm der Anteil neugebauter Brücken wieder stetig ab, bis nach der Wiedervereinigung im Jahr 1990 das Verkehrsnetz der neuen Bundesländer großflächig ausgebaut wurde. Da der Ausbau des Verkehrsnetzes in ganz Deutschland mittlerweile nahezu abgeschlossen ist, ist auch die Fläche der neugebauten Brücken in den letzten 5-10 Jahren wieder rückläufig.

#### Bauwerkslänge

Die Verteilung der Brückenlängen im Gesamtbestand (Bild 3) zeigt, dass die meisten Brücken eine Gesamtlänge zwischen 5 m und 30 m haben. Der Anteil dieser Brücken beträgt etwa 44 % am Gesamtbestand. Bezogen auf die gebaute Brückenfläche beträgt der Anteil von Brücken mit einer Gesamtlänge zwischen 5 m und 30 m jedoch nur etwa 17 %. Im Gegensatz dazu ist der Anteil von Großbrücken mit einer Gesamtlänge zwischen 100 m und 500 m bezogen auf die Brückenfläche mit circa 36 % deutlich höher. Die Statistik zeigt, dass eine relativ geringe Anzahl von Brücken (zwischen 100 m und 500 m Länge) den größten Anteil an der Brückenfläche im Gesamtbestand des Bundesfernstraßennetzes hat.

#### Regionale Verteilung

Bild 4 veranschaulicht, dass etwa ein Viertel der Spannbetongroßbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen in Nordrhein-Westfalen gebaut wurden. Im Vergleich dazu wurden in den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg und Hessen im Durchschnitt nur etwa halb so viele Spannbetongroßbrücken wie in Nordrhein-Westfalen errichtet.

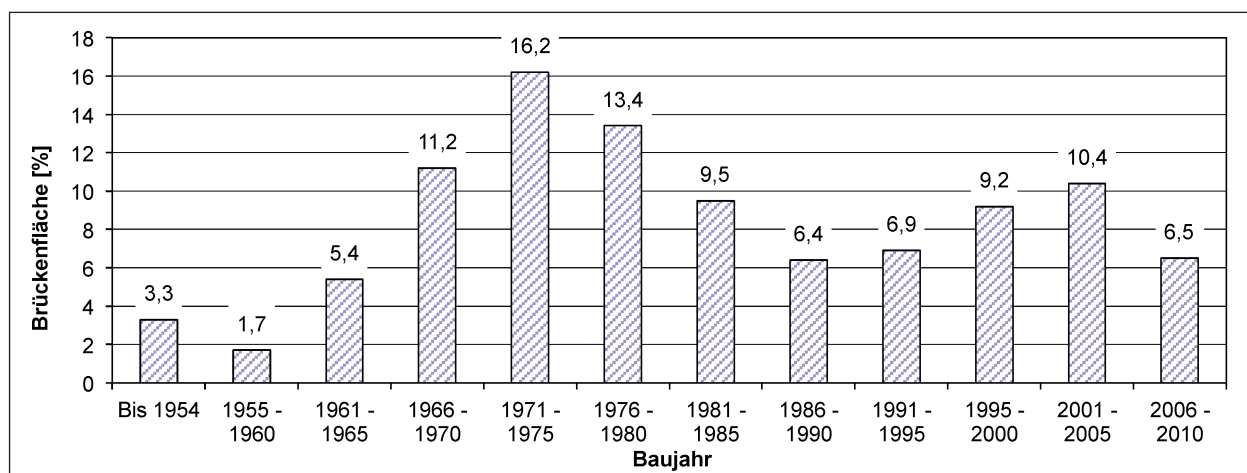


Bild 2: Altersstruktur der Brücken im Gesamtbestand aus [Bund11]

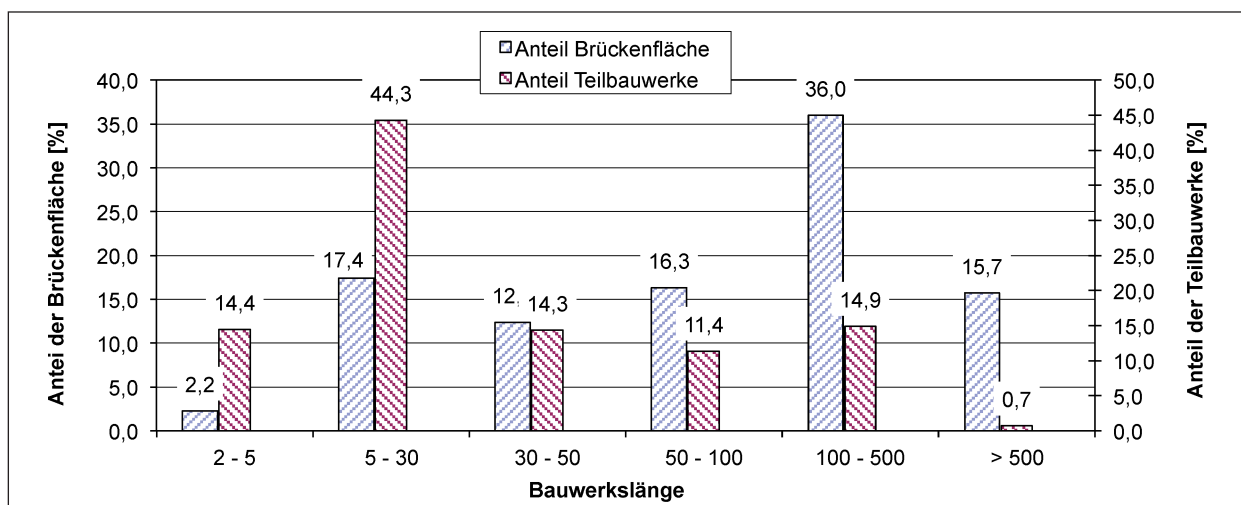


Bild 3: Verteilung der Bauwerkslängen im Gesamtbestand nach [Naum09]

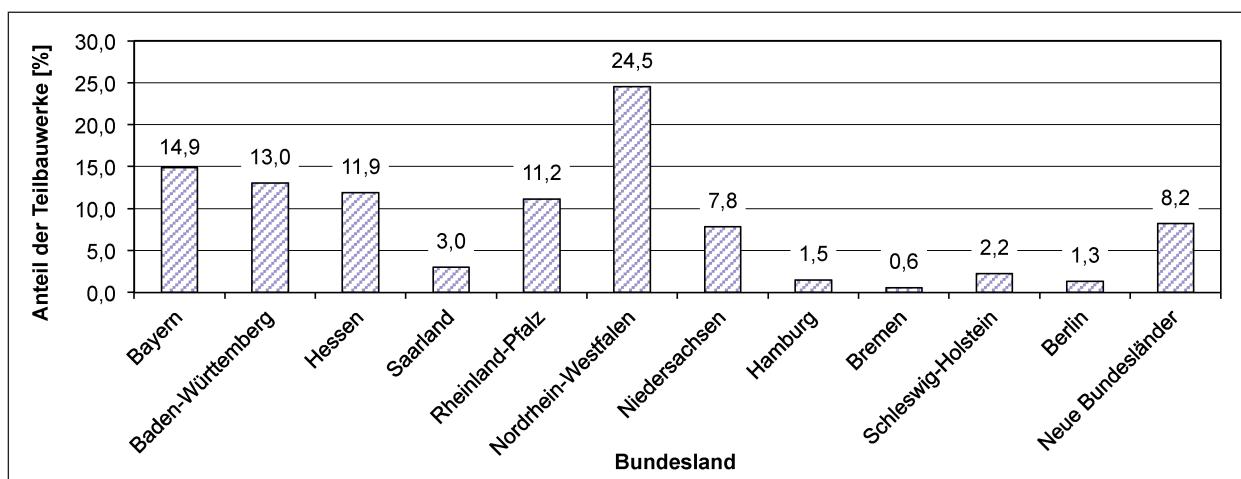


Bild 4: Regionale Verteilung von Spannbetongroßbrücken aus [ZiWe07]

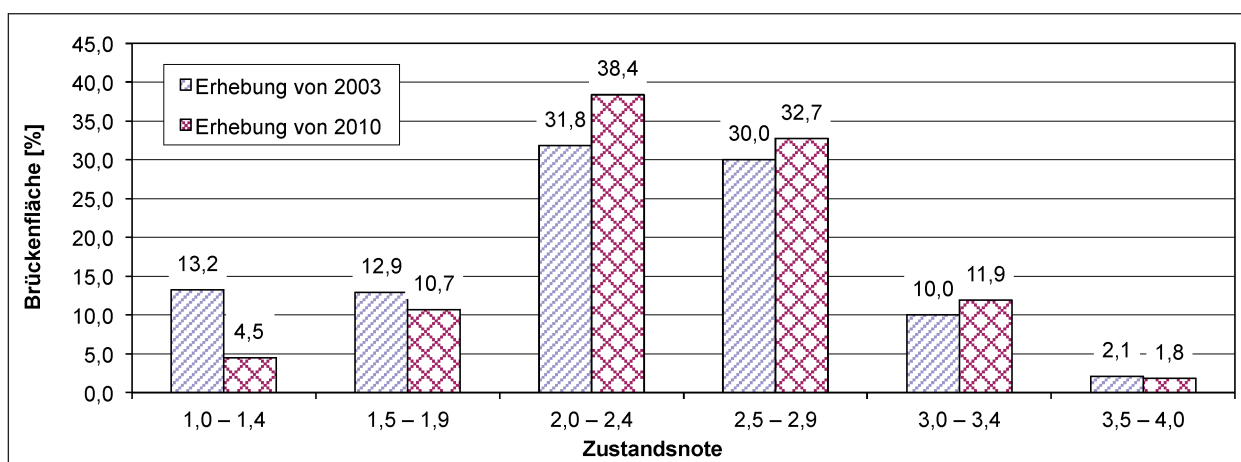


Bild 5: Verteilung der Zustandsnoten bezogen auf die Brückenfläche

### Zustandsnoten

Die Verteilung der aktuellen Zustandsnoten von Brücken (Erhebung von 2010 in [Bund11]) zeigt, dass die meisten Brücken bezogen auf die Brü-

ckenfläche einem Zustand zwischen 2,0 und 3,0 (befriedigender bis ausreichender Zustand) aufweisen. Jedoch besteht bei etwa 14 % der Brücken akuter Handlungsbedarf, da diese eine Zustandsnote schlechter als 3,0 aufweisen. Im Vergleich zu

früheren Verteilungen von Zustandsnoten (Erhebung von 2003 aus [NaHa03]) zeigt sich zudem, dass der Anteil von Bauwerken in einem schlechten Zustand (3,0 bis 4,0) eher zugenommen hat und der Anteil von Brücken in einem guten Zustand (1,0 – 2,0) etwa im gleichen Maß abgenommen hat.

## 2.2 Aufbereitung tatsächlich aufgetretener Schäden

### 2.2.1 Eigenschaften und Auswahlkriterien der untersuchten Brücken

Die Auswertung tatsächlich aufgetretener Schäden an Brückenbauwerke aus (Stahl-) Beton und Spannbeton an Bundesfernstraßen bildet die Grundlage für die anschließende Differenzierung und Bewertung von Schädigungspotenzialen. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden insgesamt 97.662 Schäden an 3.474 Brücken mit insgesamt 4.803 Teilbauwerken untersucht. In einer ersten Datenreihe wurden 1.312 Brücken (2.078 Teilbauwerke) mit einem Baubeginn ab 1935 ausgewertet. Diese Bauwerke stellen knapp 4 % des Gesamtbestandes von Massivbrücken an Bundesfernstraßen in Deutschland dar. Der größte Anteil von Brücken (1.222) stammt dabei aus der Datenbank des Programmsystems SIB-Bauwerke und wurde von der BAST zur Verfügung gestellt (Auszug siehe Anhang 11.2). Zusätzlich zu den Daten aus dem Datenbestand der SIB-Bauwerke wurden 90 Brücken aus der Literatur (Schadensdokumentationen des Bundesministeriums für Verkehr, die in den 1980er (BMV82) und in den 1990er (BMV94) Jahren erstellt wurden) zur Auswertung herangezogen. Die Brücken aus der

Datenbank SIB-Bauwerke (ca. 93 %) stammen aus dem Zuständigkeitsbereich der Straßenbauverwaltung Nordrhein-Westfalen (NRW), die übrigen Brücken aus den Schadensdokumentationen (ca. 7%) können aufgrund fehlender Angaben nicht eindeutig regional zugeordnet werden. Zusätzlich zur ersten Datenreihe wurde von der BAST eine zweite Datenreihe mit 2.162 Brücken (2.725 Teilbauwerken) mit einem Baubeginn ab 2003 zur Verfügung gestellt (Auswertung siehe Kapitel 4.2.5). Bei der Auswahl der Bauwerke (aus der ersten Datenreihe) für die Untersuchungen von Bauwerksschäden wurden zunächst, unter Berücksichtigung der Verteilung im Gesamtbestand (vgl. Kapitel 2.1.3), folgende Kriterien zugrunde gelegt:

- Baujahr: 1935 bis 2010,
- Brückenlänge: 5 m bis 1.500 m,
- Zustandsnote: 1,0 (sehr gut) bis 3,5 (ungenügend),
- Brückenklassen: BK 12, 16, 16/16, 30, 30/30, 45, 60, 60/30, LM1.

Die Verteilung der Altersstruktur der untersuchten Brücken spiegelt in etwa die Verteilung im Gesamtbestand wider (Bild 6). Die meisten Brücken wurden in den 60er und 70er Jahren gebaut (sowohl auf die Anzahl als auch auf die Brückenfläche bezogen). Im Gegensatz zum Gesamtbestand ist bei der untersuchten Verteilung jedoch kein Anstieg der neugebauten Brücken ab den 1990er Jahren zu erkennen, da bei der vorliegenden Verteilung etwa 94 % der Brücken aus dem Bestand der Straßenbauverwaltung NRW stammen, und somit der Einfluss im Zuge der Wiedervereinigung nicht abgebildet wird.

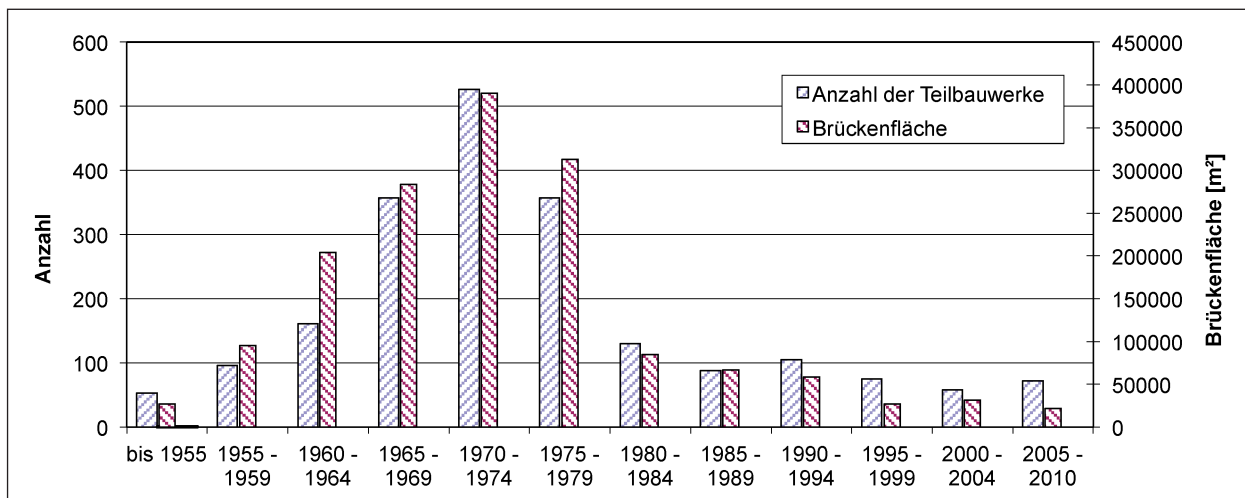


Bild 6: Altersstruktur der untersuchten Brücken



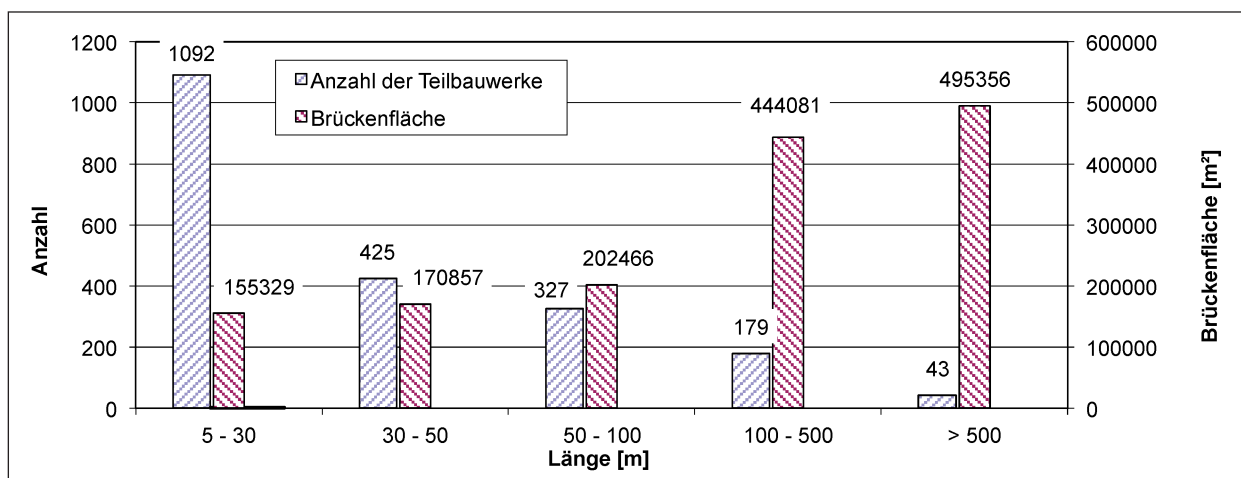


Bild 7: Verteilung der Brückenlängen untersuchter Brücken

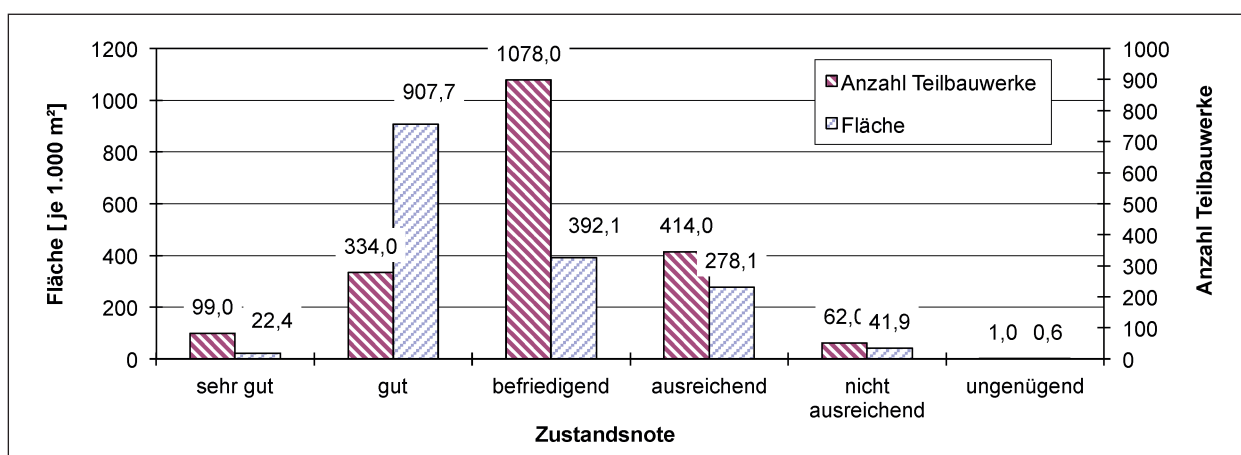


Bild 8: Verteilung der Zustandsnoten untersuchter Brücken

Analog zur Verteilung der Brückenlängen im Gesamtbestand zeigt sich auch bei der Untersuchungsgrundlage, dass die meisten Brücken bezogen auf die Anzahl der Teilbauwerke eine Länge zwischen 5 und 30 m aufweisen (Bild 7). Entsprechend dem Gesamtbestand, stellen auch bei der vorliegenden Verteilung Brücken mit einer Gesamtlänge zwischen 100 m und 500 m den weitaus größten Anteil bezogen auf die Brückenfläche dar.

Bild 8 zeigt, dass die Zustandsnoten der untersuchten Brücken in etwa der Verteilung der Zustandsnoten im Gesamtbestand entsprechen. Lediglich der Anteil von Brücken in einem guten Zustand (1,0-2,0) liegt bei der Untersuchungsgrundlage im Vergleich zum Gesamtbestand etwas höher, wohingegen der Anteil von Brücken in einem schlechten Zustand (3,0-4,0) im Vergleich zum Gesamtbestand etwas geringer ist.

Die Verteilung der Brückenklassen zeigt, dass der weitaus größte Teil (ca. 62 %) in die Brückenklasse

60 eingestuft ist (Bild 9). Somit deckt sich die Verteilung der untersuchten Brücken größtenteils mit der Verteilung im Gesamtbestand.

Neben der übergeordneten Auswahl von Bauwerken für die gesamte Schadensauswertung wurden weitere Merkmale definiert, die eine genauere Kategorisierung von Bauwerksteilen und Konstruktionen zur detaillierten Auswertung von Schäden ermöglichen:

- Baustoff: Beton/Stahlbeton, Spannbeton,
- Bauteil: Überbau, Unterbau (Widerlager, Stützen, Pfeiler, Gründung), Lagerung, Ausrüstung (Belag, Abdichtung, Geländer, Leitungen, Beschilderung, Fahrbahnübergang, Markierung),
- Bauwerksart: Platte, Plattenbalken, Hohlkasten, Balken, Rahmen, Bogen, Sonstiges,
- statisches System: Einfeldsysteme, Mehrfeldsysteme.

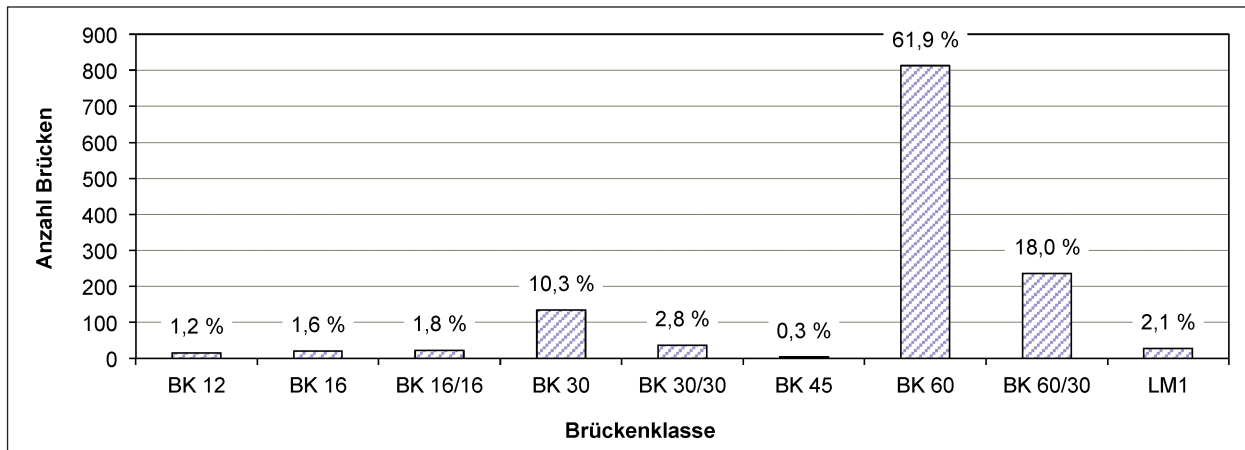


Bild 9: Brückenklassen der untersuchten Brücken

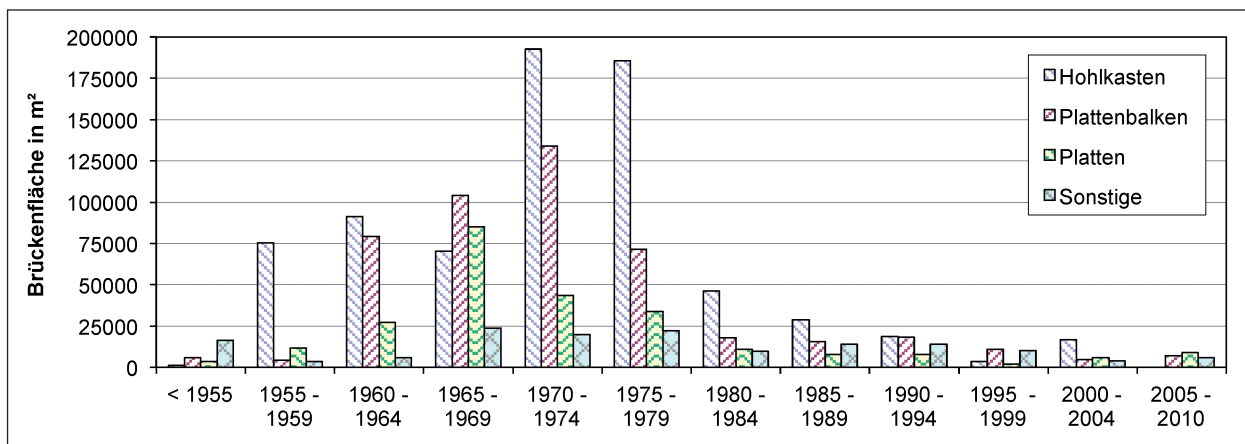


Bild 10: Verteilung der Brückenflächen (jahresbezogen) für die unterschiedlichen Bauwerksarten

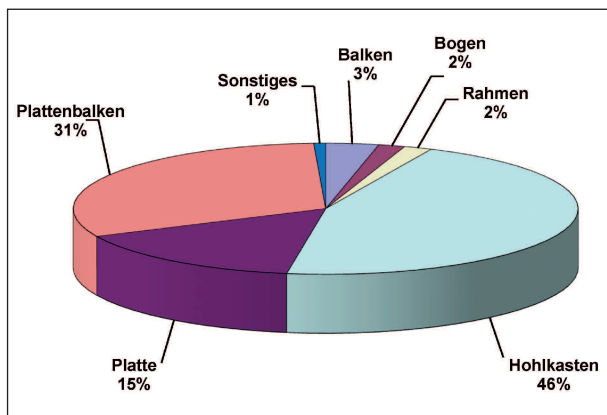


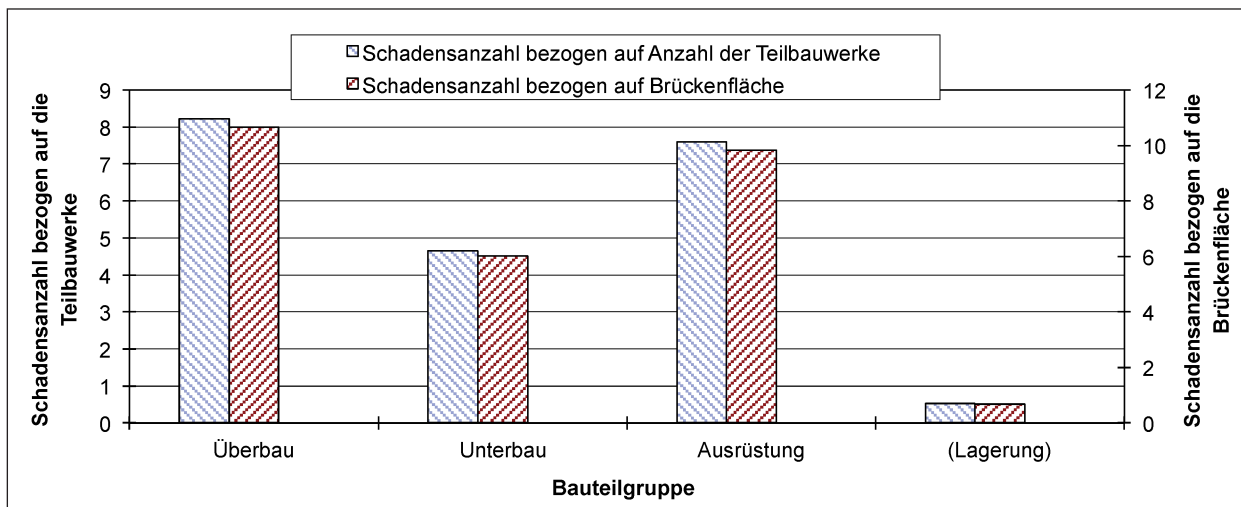
Bild 11: Verteilung der Bauwerksart nach Gesamtfläche für die untersuchten Brücken (Grundlage: 1.312 Brücken)

Die Auswertung der untersuchten Brücken hinsichtlich des Baustoffs ergibt, dass der überwiegende Anteil der Brücken in Spannbetonbauweise hergestellt wurde. Bezogen auf die Anzahl der Brücken entfallen ca. 67 %, bezogen auf die Brückenfläche entfallen ca. 91 % auf die Spannbetonbauweise.

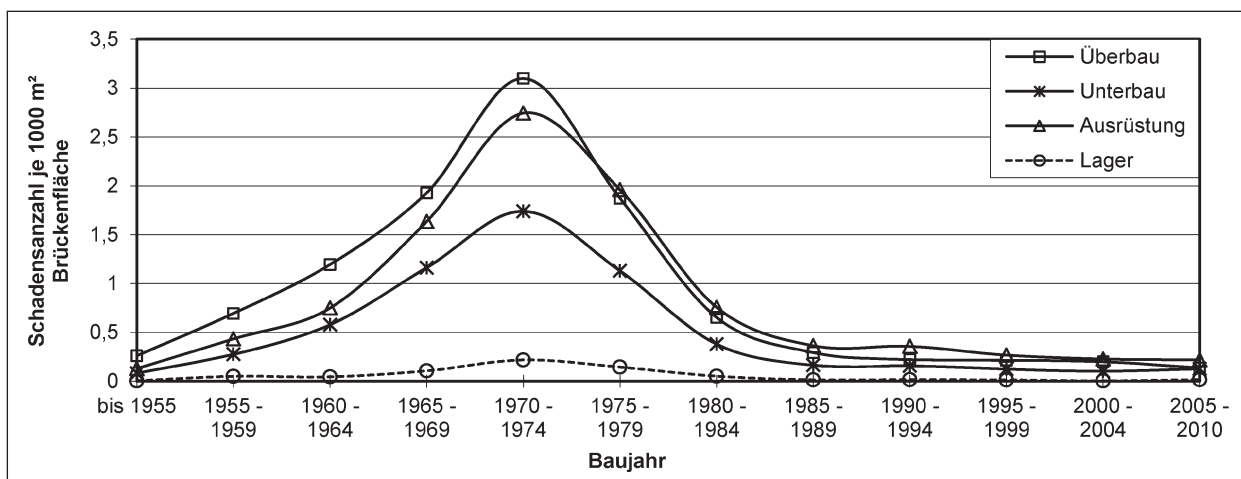
Bezüglich der Verteilung der Bauwerksarten belegt Bild 11, dass Hohlkastenbrücken, Plattenbalken- und Plattenbrücken mit einem Flächenanteil von über 90 % die häufigsten bzw. wichtigsten Bauwerksarten für die Schadensauswertungen darstellen. Bezogen auf die neugebaute Brückenfläche ergibt sich zudem der größte Anteil für Hohlkastenbrücken mit einem Baubeginn von 1960 bis 1980, dabei insbesondere mit Baubeginn in den 70er Jahren (Bild 10).

### 2.2.2 Untersuchungsgrundlage

In einem ersten Schritt wurde die Schadensverteilung für die einzelnen Bauteilgruppen aufbereitet, um festzustellen welche Bauwerksteile besonders schadensbehaftet sind. Dazu wurden unabhängig von der Schadensart und dem Schadensausmaß die Bauteilgruppen Überbau, Unterbau, Lagerung und Ausrüstung verglichen. Zur einheitlichen Beurteilung der Schadenshäufigkeiten der unterschiedlichen Bauwerksteilen werden die Schäden bei allen



**Bild 12:** Schadensverteilung der Bauteilgruppen für die untersuchten Brücken (Grundlage: insgesamt 43.605 Schäden bezogen auf 2.078 Teilbauwerke bzw. 1.604.172 m<sup>2</sup> Brückenfläche)



**Bild 13:** Schadensverlauf der Bauteilgruppen für die untersuchten Brücken (Grundlage: 43.788 Schäden bezogen auf 1.604.172 m<sup>2</sup> Brückenfläche)

Auswertungen auf die Brückenfläche (1.000 m<sup>2</sup> Brückenfläche) der jeweiligen Kategorie bezogen. Bild 12 zeigt, dass die meisten Schäden am Überbau und an der Brückenausrüstung auftreten. Die Schadensanzahl von Schäden an den Brückenlagern ist hingegen im Vergleich zu den anderen Bauteilgruppen deutlich geringer. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Schäden an der Lagerung in keinem direkten Zusammenhang mit der Brückenfläche stehen und zudem in der Datenbank keine Informationen über das Alter der Lager bzw. den Zeitpunkt des letzten Lagerwechsels hinterlegt sind. Somit ist die Auswertung bezüglich der Schäden an den Lagern nur bedingt aussagekräftig und wird in den nachfolgenden Diagrammen (Bild 12 und Bild 13) entsprechend gekennzeichnet (mit Klammern oder als gestrichelte Linie). Der in Bild 13 abgebildete Schadensverlauf soll Aufschluss darüber geben, wie

sich die Anzahl von aufgetretenen Schäden im Hinblick auf das Baujahr der Brücken entwickelt hat. Das Diagramm zeigt eine deutliche Abnahme der Schadensanzahl für alle Bauteilgruppen ab den 1980er Jahren. Zu beachten ist dabei allerdings, dass sich analog dazu die Fläche der neugebauten Brücken auch deutlich verringert hat. Weitergehende Untersuchungen für einzelne Schadensarten bezogen auf die Brückenflächen für die jeweiligen Jahre und das Auftreten dieser Schadensarten im zeitlichen Verlauf sind in Kapitel 2.2.3 dargestellt.

Bei der Aufbereitung und Auswertung der Schäden aus der Datenbank SIB-Bauwerke ist generell anzumerken, dass die Schadensdokumentationen zum Teil nicht vollständig sind und eine fehlerhafte Eingabe in das Programm während der Bauwerksprüfung nicht ausgeschlossen werden kann. Aufgrund



der großen Anzahl von Schäden und Bauwerken, die für die Auswertung herangezogen wurden, ist dennoch von einer aussagekräftigen Auswertung auszugehen. Darüber hinaus ist in der Datenbank SIB-Bauwerke keine Brückenhistorie hinterlegt. Somit stehen keine oder nur bedingt Informationen zu durchgeführten Verstärkungsmaßnahmen oder dem Austausch von Lagern und Fahrbahnübergängen zur Verfügung. Dieser Umstand muss bei der Beurteilung von aufgetretenen Schäden, insbesondere bei diesen Konstruktionsteilen berücksichtigt werden.

Um die einzelnen Bauwerksteile genauer beurteilen zu können und relevante Schadensbilder zu identifizieren, wurde im Folgenden die Verteilung der einzelnen Schadensarten untersucht. Die Auflistung zeigt die möglichen Schadensarten, die bei der Beurteilung als Merkmale herangezogen werden:

i) Betonschäden

- (1) Ver-/Beschmutzung
- (2) Abwitterung
- (3) Ausblühungen/Wasserspuren
- (4) Durchfeuchtung
- (5) Kiesnester, Hohlstellen
- (6) Abplatzungen, Ausbrüche
- (7) Risse
- (8) Freiliegende Bewehrung
- (9) Dicke der Betondeckung
- (10) Dichtheit/Porosität
- (11) Karbonatisierung
- (12) Chloridbelastung
- (13) Brandschäden

Oberfläche

Betondeckung

ii) Bewehrungsschäden

- (1) Falsche Lage der Bewehrung
- (2) Falsche Anzahl oder Durchmesser der Bewehrung
- (3) Korrosion von Beton-/Spannstahl
- (4) Risse entlang der Bewehrung
- (5) Risse entlang der Spannglieder/Hüllrohre
- (6) Unvollständig gefüllte Hüllrohre
- (7) Schäden am (Koppel)Anker
- (8) Spannstahlbrüche

iii) Bauwerksschäden

- (1) Abdichtung
- (2) Fahrbahnübergang
- (3) Belag/Fahrbahn
- (4) Lager
- (5) Bauteilverformung
- (6) Entwässerung/Leitungen
- (7) Setzungen

iv) Sonstige Schäden

- (1) Graffiti/Schmierereien
- (2) Bewuchs
- (3) Unzugänglichkeit von Bauwerksteilen, usw.

Als häufigste Schäden am Überbau treten freiliegende Bewehrung, Risse im Beton sowie Abplatzungen und Betonausbrüche (Bild 14) auf. Bei diesen Schäden lässt sich jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den Bauwerksarten feststellen. Hohlräume und Kiesnester sowie Durchfeuch-

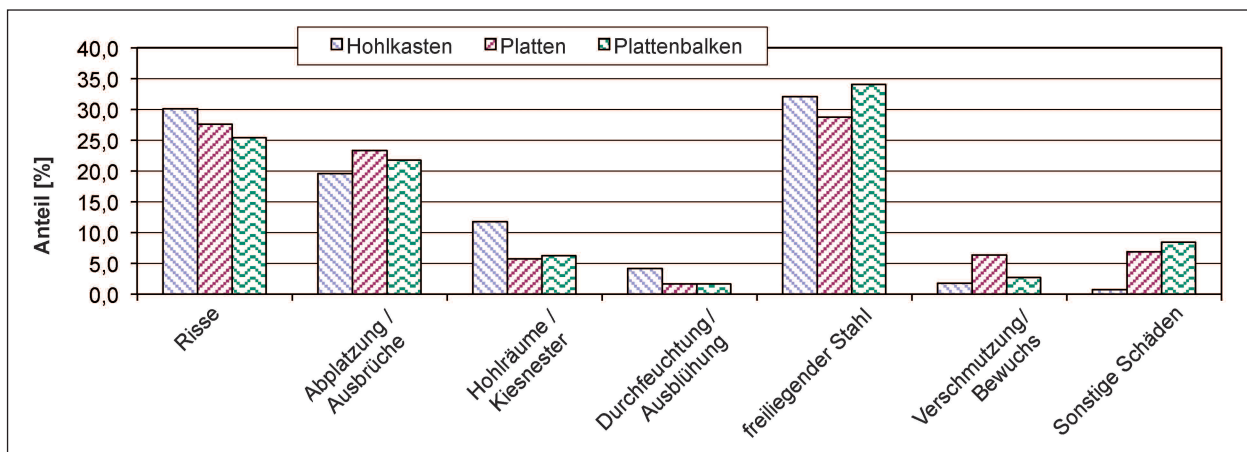


Bild 14: Schadensverteilung am Überbau (Grundlage: 2.991 Schäden an Hohlkästen, 4.763 Schäden an Platten, 6.745 Schäden an Plattenbalken)

tungen und Ausblühungen hingegen sind an Plattenbalkenbrücken deutlich häufiger festzustellen als an Hohlkasten- oder Plattenbrücken.

Die Auswertung aller am Bauwerk aufgetretener Risschäden hinsichtlich des Baustoffs ergibt, dass etwa 68 % der Risschäden bei Spannbetonbrücken auftreten (Bild 15). Vor dem Hintergrund, dass auch der Anteil von Spannbetonbrücken am Gesamtbestand etwa 67 % beträgt, zeigt sich somit kein Einfluss des Baustoffs (Stahl-, Spannbeton) bezüglich des Auftretens von Rissen.

Bei der Unterscheidung von Rissarten am Überbau (Bild 16) zeigt sich, dass Querrisse mit etwa 41 % am häufigsten auftreten. Bei der Verteilung der

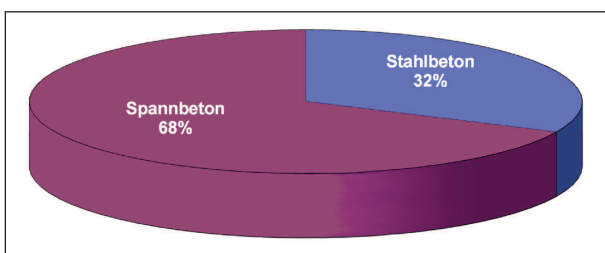


Bild 15: Verteilung aller Risschäden an Stahlbeton- und Spannbetonbrücken (Grundlage: 9.925 Risschäden)

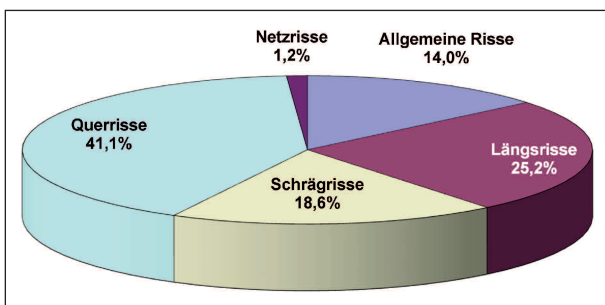


Bild 16: Verteilung von Rissarten am Überbau (Grundlage: 4.763 Risschäden)

Rissarten ist zu beachten, dass ein relativ großer Anteil von Risschäden (ca. 14 %) nicht genau definiert ist.

Die Schadensverteilung am Unterbau wurde getrennt für die Bauwerksteile Widerlager und Pfeiler/Stütze ausgewertet (Bild 17). Die häufigsten Schäden am Widerlager sind Risse und freiliegende Bewehrung. An den Pfeilern/Stützen sind die häufigsten Schäden Abplatzungen und Betonausbrüche sowie freiliegende Bewehrung. Auffällig ist, dass Hohlräume und Kiesnester deutlich häufiger an Pfeilern/Stützen auftreten als an Widerlagern.

Die Auswertung von Lagerschäden belegt, dass Korrosionsschäden mit etwa 42 % die häufigste Schadensart an Brückenlagern darstellt (Bild 18). Weitere häufig auftretende Schäden sind Beschädigungen des Elastomers und eine fehlerhafte Lage (z. B. verschobene oder verdrehte Lager, verbogene Führungsschienen, usw.).

Die Auswertung von Schäden an der Brückenausrüstung wurde in einem ersten Schritt zunächst für

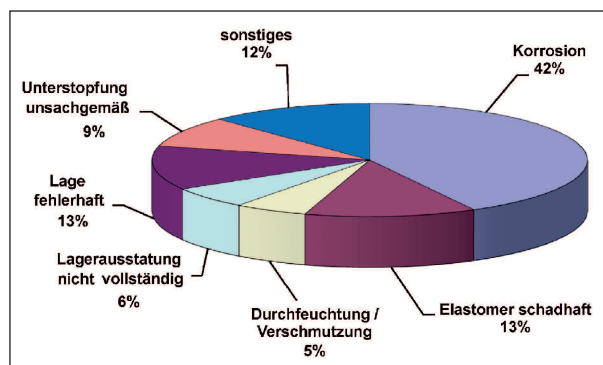


Bild 18: Schadensverteilung an Lagern (Grundlage: 1.086 Schäden an der Lagerung)

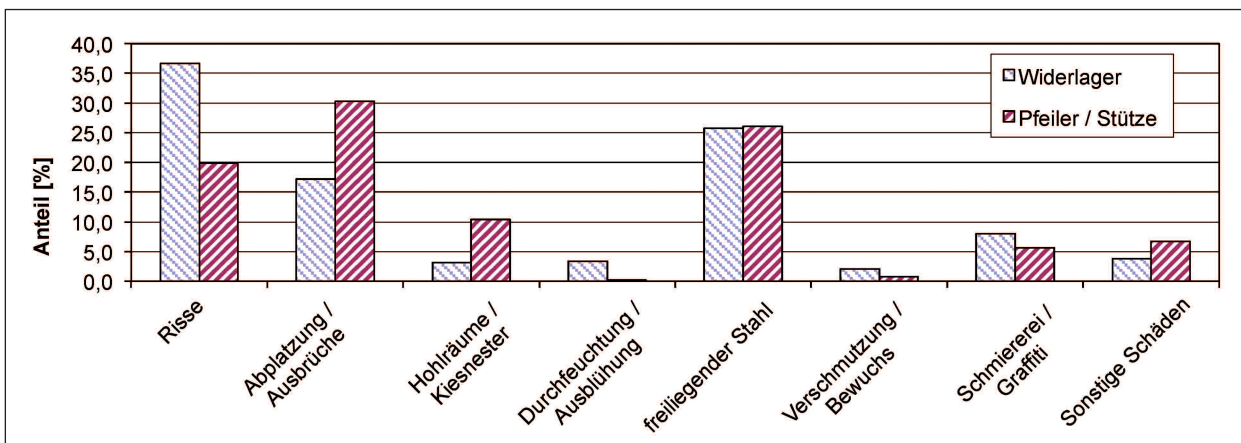
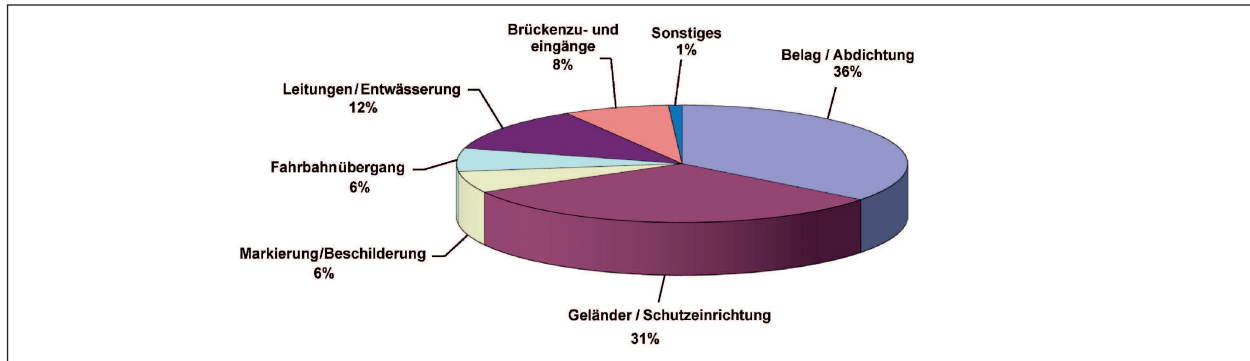


Bild 17: Schadensverteilung am Unterbau (Grundlage: 7.904 Schäden an Widerlagern, 800 Schäden an Pfeilern/Stützen)



**Bild 19:** Schadensverteilung an der Ausrüstung (Grundlage: 15.650 Schäden an der Ausrüstung)

die betroffenen Bauteilgruppen durchgeführt (Bild 19). Die vornehmlich betroffenen Bauteile sind Belag und Abdichtung sowie Geländer und Schutzeinrichtung. Die Anzahl von geschädigten Fahrbahnübergangskonstruktionen ist hingegen mit ca. 6 % vergleichsweise gering. Es ist jedoch anzumerken, dass die Auswertung von Schäden stets bezogen auf die Brückenfläche vorgenommen wurde. Da der Anteil von Fahrbahnübergängen bezüglich der Brückenfläche im Vergleich zu anderen Bauteilen, wie z. B. dem Belag, sehr gering ist, ergibt sich auch eine vergleichsweise ge-

ringe Anzahl von Schäden an den Fahrbahnübergängen.

Neben der generellen Schadensverteilung an der Brückenausrüstung sind Verteilungen der einzelnen Schadensarten für die jeweiligen Bauteile der Ausrüstung dem Anhang 11.1.1 zu entnehmen.

### 2.2.3 Beispiele typischer Schadensbilder (siehe Bilder 20-27)



**Bild 20:** Risse am Überbau (Fotos: IfM)



**Bild 21:** Ausbrüche am Überbau (links) und Abplatzungen an der Kappe (rechts) (Fotos: IfM)





**Bild 22:** Fehlstelle im Beton (links) und Hohlraum im Bereich der Spannglieder (rechts) (Fotos: IfM)



**Bild 23:** Ausblühungen (links) und Durchfeuchtungen im Hohlkasten (rechts) (Fotos: IfM)



**Bild 24:** Freiliegende Bewehrung (Fotos: IfM)



**Bild 25:** Schäden am Brückenlager (links: Lagerverdrehung, rechts: starke Korrosion am Rollenlager) (Fotos: IfM)





**Bild 26:** Schäden am Fahrbahnbelag (links) und an der Brückenkappe (rechts) (Fotos: IfM)



**Bild 27:** Schäden am Fahrbahnübergang (links: abgesackt, rechts: gerissen) (Fotos: IfM)

#### 2.2.4 Auswertung nach Baujahr

Mit der Auswertung von Brückenschäden nach dem Baujahr der Brücken kann beurteilt werden, wie sich die Anzahl aufgetretener Schäden relativ zur neu gebauten Brückenfläche eines Jahresabschnitts entwickelt hat und ob der Schaden auch bei neuen Brückenbauwerken weiterhin eintritt. Im Folgenden sind die Schadensverläufe für die einzelnen Bauteilgruppen (Überbau, Vorspannsystem, Unterbau, Lager, Ausrüstung) und häufig aufgetretener Schadensbilder in Diagrammen zusammengestellt.

##### Häufig auftretende Schäden am Überbau

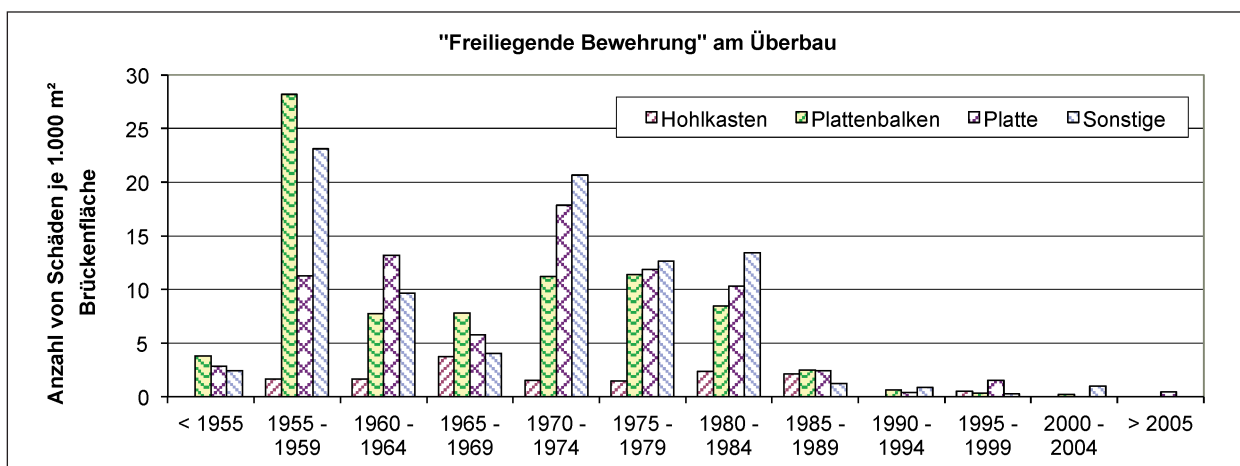
In den Diagrammen (Bild 28 bis Bild 31) sind die Anzahl von Schäden bezogen auf 1.000 m<sup>2</sup> neu gebaute Brückenfläche des jeweiligen Jahresabschnitts aufgetragen. Dabei wird jeweils zwischen den einzelnen Bauwerksarten (Hohlkasten, Plattenbalken, Platte und Sonstige) unterschieden.

Freiliegende Bewehrung sowie Abplatzungen und Hohlstellen sind die häufigsten Schäden am Überbau. Besonders an Brücken, die bis 1980 gebaut

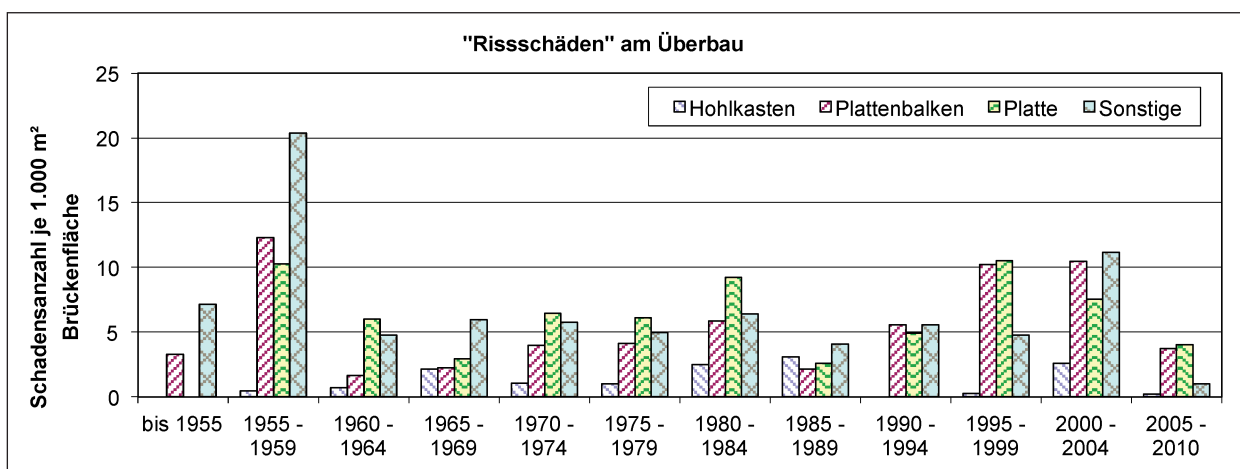
wurden, sind diese Schäden mit 5-15 Schäden pro 1.000 m<sup>2</sup> Brückenfläche besonders auffällig. Bild 28 verdeutlicht eine signifikante Abnahme des Schadens „freiliegende Bewehrung“ zu Beginn der 80er Jahre. Die Einführung der ZTV-K von 1980 mit den darin enthaltenen Verbesserungen zur Dauerhaftigkeit, insbesondere die Erhöhung der Betondeckung ist dabei als Begründung zu nennen.

Für aufgetretene Risse am Betonquerschnitt des Überbaus ist hingegen keine Abnahme der Schadenshäufigkeit bezogen auf die neugebaute Brückenfläche zu erkennen (Bild 29). Der Anteil von Rissen an Hohlkastenbrücken ist dabei über die gesamte Zeit deutlich geringer als der Anteil von Rissen bei den übrigen Bauwerkstypen. Bei Platten- und Plattenbalkenbrücken ist eine Zunahme der Schadenshäufigkeit ab etwa 1990 festzustellen. Ab 2005 hingegen nimmt der Anteil von Rissen am Überbau für alle Bauwerkstypen wieder ab.

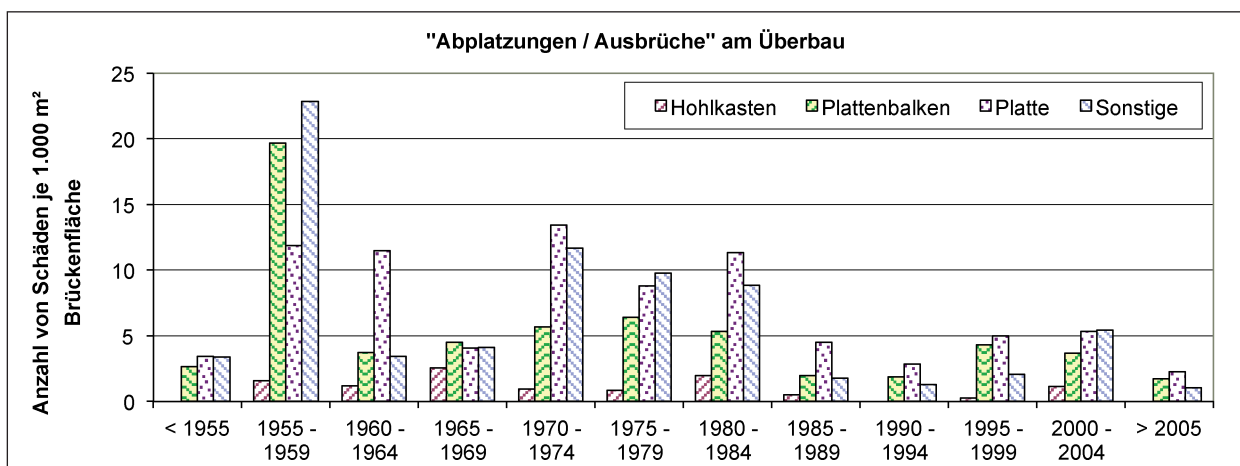
Bei Brücken, die mit Betonabplatzungen und -ausbrüchen behaftet sind, ist ähnlich wie bei Bauwerken mit freiliegender Bewehrung auch der Einfluss der im Jahr 1980 eingeführten ZTV-K mit der Abnahme von Schadensfällen ab 1980 zu belegen



**Bild 28:** Auftreten von freiliegender Bewehrung am Überbau (Grundlage: 8.833 Schäden bezogen auf die neugebaute Brückenfläche der Bauwerksart im jeweiligen Baujahr)



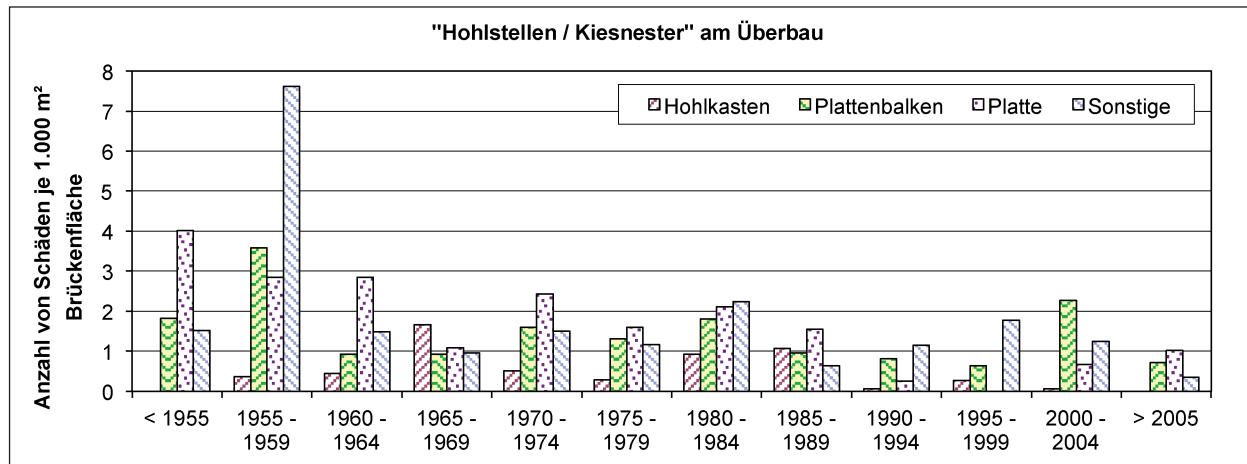
**Bild 29:** Auftreten von Risschäden am Überbau für die unterschiedlichen Bauwerksarten bezogen auf die neugebaute Brückenfläche im jeweiligen Jahresabschnitt (Grundlage: 4.768 Risschäden)



**Bild 30:** Auftreten von Abplatzungen und Ausbrüchen am Überbau (Grundlage: 6.030 Schäden, bezogen auf die neugebaute Brückenfläche der Bauwerksart im jeweiligen Baujahr)

(Bild 30). Jedoch sind nach 1980 bis zum heutigen Zeitpunkt immer noch zwischen 2-5 Schadensfälle je 1.000 m<sup>2</sup> neugebauter Brückenfläche zu ver-

zeichnen. Ein Grund für die immer noch relativ hohe Schadenshäufigkeit kann dabei in der Qualität der Bauausführung liegen.



**Bild 31:** Auftreten von Hohlstellen und Kiesnestern am Überbau (Grundlage: 1.643 Schäden, bezogen auf die neugebaute Brückenfläche der Bauwerksart im jeweiligen Baujahr)

Die Häufigkeiten von Hohlstellen und Kiesnestern (Bild 31) sowie von Durchfeuchtungen und Ausblühungen sind im Vergleich zum Schadensfall der freiliegenden Bewehrung sowie den Abplatzungen und Ausbrüchen deutlich geringer. Der Verlauf zeigt jedoch keine deutlich abnehmenden Tendenzen bei neueren Brücken.

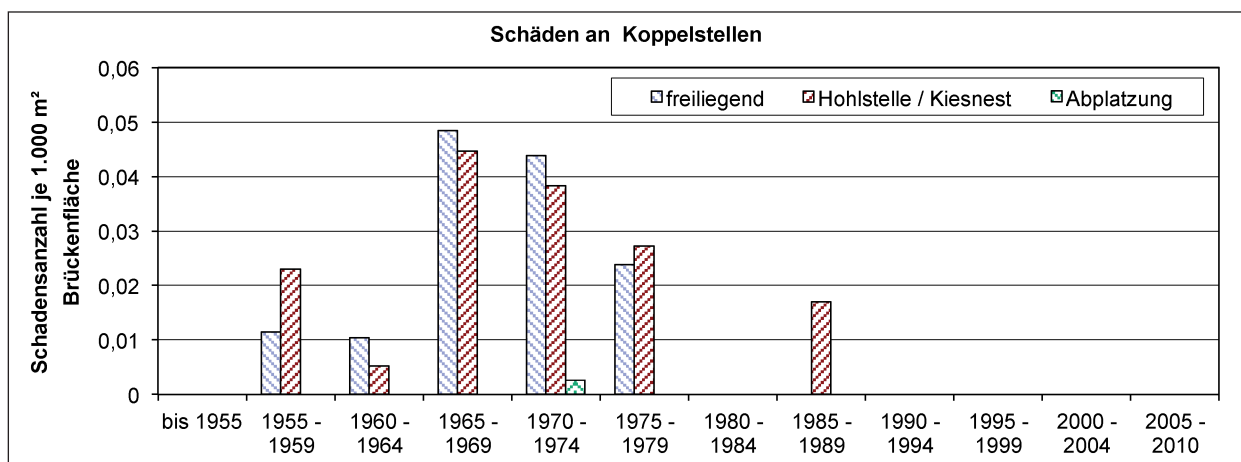
#### Häufig auftretende Schäden am Vorspannsystem

Schäden am Vorspannsystem treten im Vergleich zu den übrigen Schäden am Überbau deutlich seltener auf. Die Schadensanzahl von fehlerhaften Koppelstellen oder beschädigten Hüllrohren liegt im Allgemeinen unter 0,05 Schäden je 1.000 m<sup>2</sup> Brückenfläche. Ab 1980 sind, abgesehen von drei Schäden am Hüllrohr (jeweils freiliegende Hüllrohre) und einem Schaden an der Koppelstelle (Hohlstelle bzw. Kiesnest), keine Schäden mehr dokumentiert. Die Verringerung der Schadensfälle lässt sich zum einen mit dem Soforterlass von 1977, der 1979 in die DIN 4227 übernommen wurde, erklären. Darin wurde für den Ermüdungsnachweis von Spanngliedkopplungen ein linearer Temperaturgradient eingeführt, höhere Verluste infolge Kriechen und Schwinden des Betons waren zu berücksichtigen und die Mindestlängsbewehrung in der Koppelfuge wurde deutlich erhöht. Zudem wurde in der 1980 eingeführten ZTV-K festgeschrieben, dass mindestens 30 % der Spannglieder ungekoppelt durchzuführen sind.

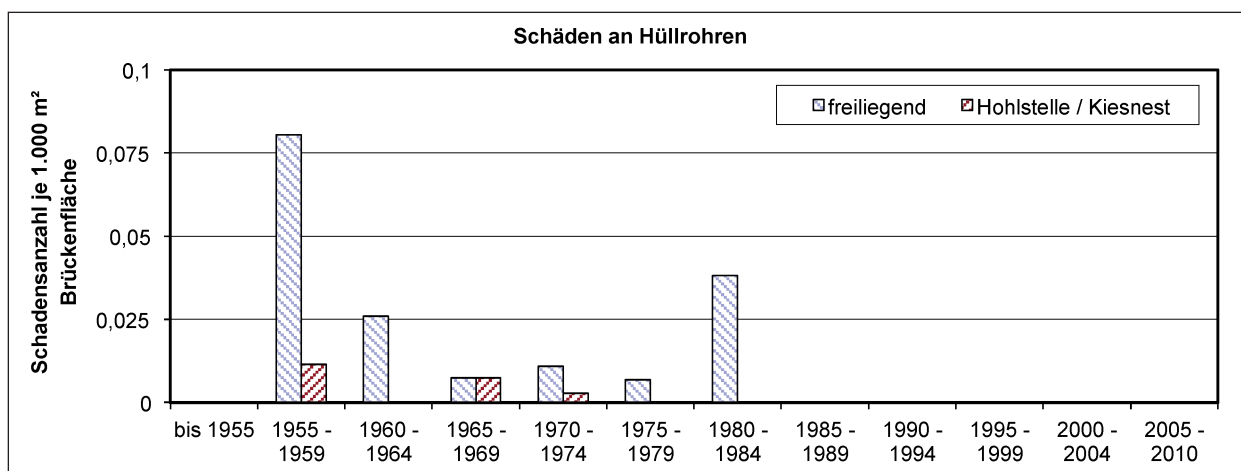
#### Häufig auftretende Schäden am Unterbau

Risse am Unterbau von Brücken treten besonders häufig an Plattenbrücken auf (Bild 34). Speziell an Brücken mit Baubeginn zwischen 1955 und 1990 ist die Risshäufigkeit an Plattenbrücken im Vergleich zu den anderen Bauwerkstypen deutlich höher. Bei Hohlkastenbrücken ist der Anteil an Rissen am Unterbau hingegen für jeden Jahresabschnitt deutlich geringer als bei anderen Bauwerkstypen. Auffällig ist zudem, dass der Anteil von rissbehafteten Plattenbalkenbrücken ab 1985 bis 2000 und von rissbehafteten Plattenbrücken ab 1990 bis 2005 merklich angestiegen ist. Eine weitere Auswertung bezüglich des Baustoffs verdeutlicht, dass der Anteil von Risschäden am Unterbau bei Spannbetonbrücken mit Baubeginn bis 1995 deutlich geringer ist als der Anteil von Risschäden am Unterbau von Stahlbetonbrücken. Im Allgemeinen hat die Schadenshäufigkeit von Rissen an Unterbauten von Stahlbetonbrücken mit Baubeginn ab 1985 jedoch ebenfalls deutlich abgenommen.

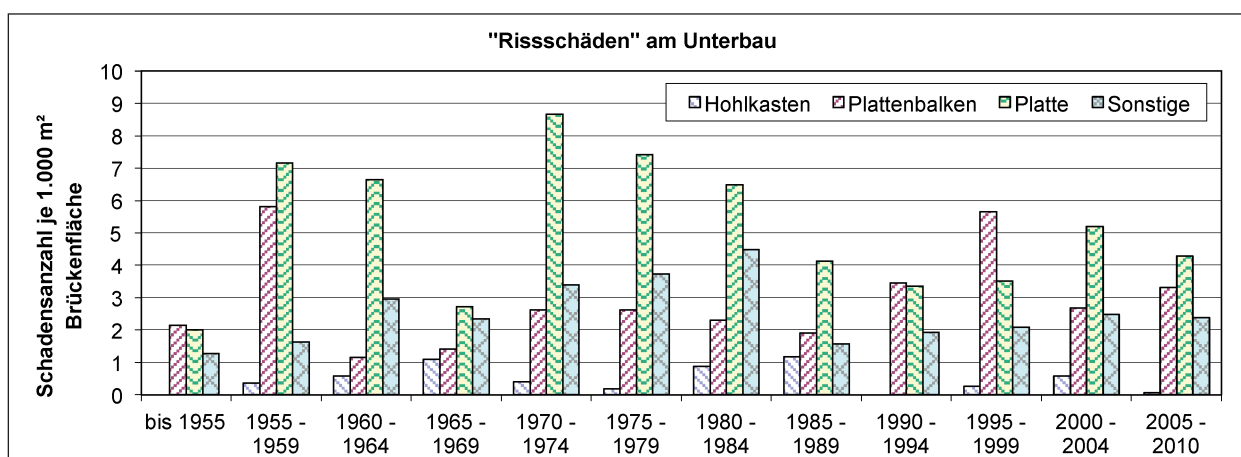
Die meisten Schäden mit freiliegender Bewehrung am Unterbau sind an Brücken mit Baujahr bis 1980 festzustellen (Bild 35). Dabei treten die Schäden hauptsächlich an Brückenwiderlagern auf. Der deutliche Rückgang der Schadensanzahl ab Mitte der 1980er Jahre ist, analog zum Schaden mit freiliegender Bewehrung am Überbau mit der Einführung der ZTV-K-80 (deutliche Verbesserungen der Dauerhaftigkeit, insbesondere der Betondeckung) zu erklären. Brücken, die in den letzten ca. 20 Jahren gebaut wurden, weisen kaum noch freiliegende Bewehrung am Unterbau auf.



**Bild 32:** Auftreten von Schäden an Koppelstellen (Grundlage: 78 Schäden, bezogen auf die neugebaute Brückenfläche im jeweiligen Baujahr)



**Bild 33:** Auftreten von Schäden an Hüllrohren (Grundlage: 27 Schäden, bezogen auf die neugebaute Brückenfläche im jeweiligen Baujahr)



**Bild 34:** Auftreten von Risschäden am Unterbau für die unterschiedlichen Bauwerksarten bezogen auf die neugebaute Brückenfläche im jeweiligen Jahresabschnitt (Grundlage: 3.136 Risschäden)

Anders als bei der freiliegenden Bewehrung ist bei Abplatzungen und Ausbrüchen sowie Hohlstellen und Kiesnestern keine Abnahme der Schadenszahl im Verlauf der Zeit zu erkennen. Die Scha-

danzahl von Abplatzungen und Ausbrüchen sowie Hohlstellen und Kiesnestern nimmt, insbesondere an den Widerlagern bei Brücken mit einem Baubeginn nach 1990 zum Teil merklich zu.



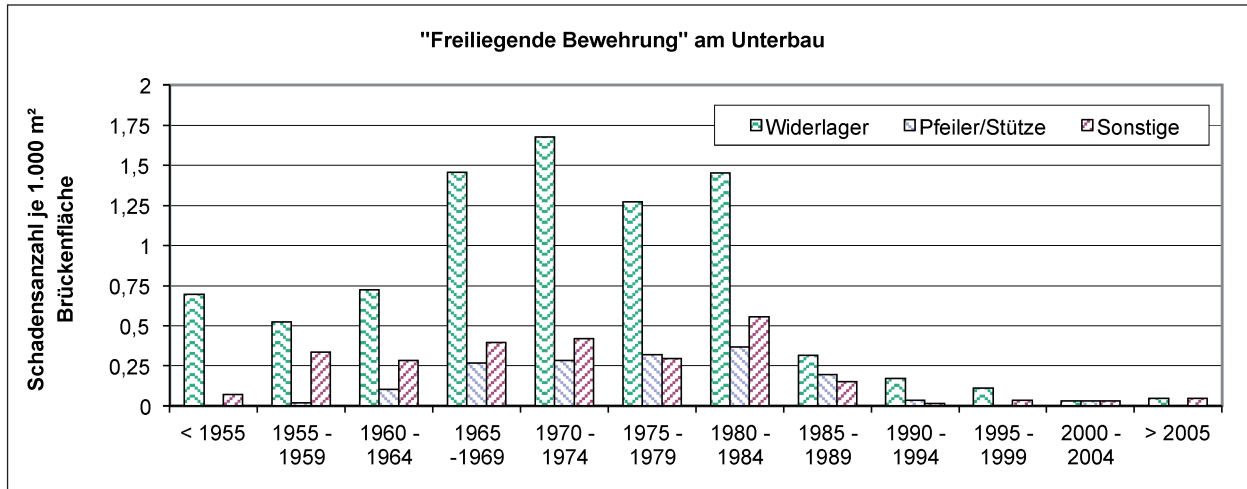


Bild 35: Auftreten von freiliegender Bewehrung am Unterbau (Grundlage: 2.720 Schäden, bezogen auf die neugebaute Brückenfläche der Bauteilgruppe im jeweiligen Baujahr)

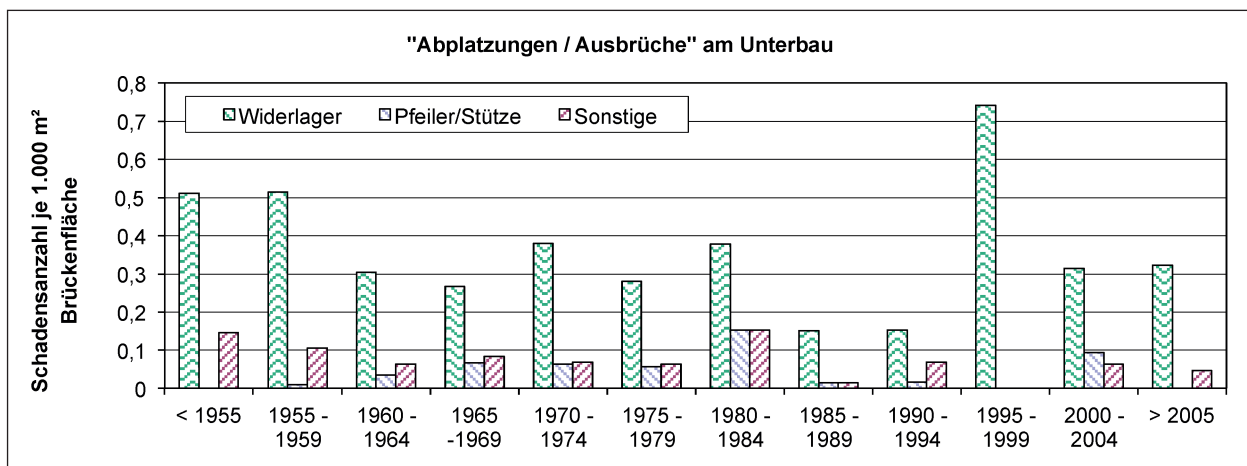


Bild 36: Auftreten von Abplatzungen/Ausbrüchen am Unterbau (Grundlage: 732 Schäden, bezogen auf die neugebaute Brückenfläche der Bauteilgruppe im jeweiligen Baujahr)

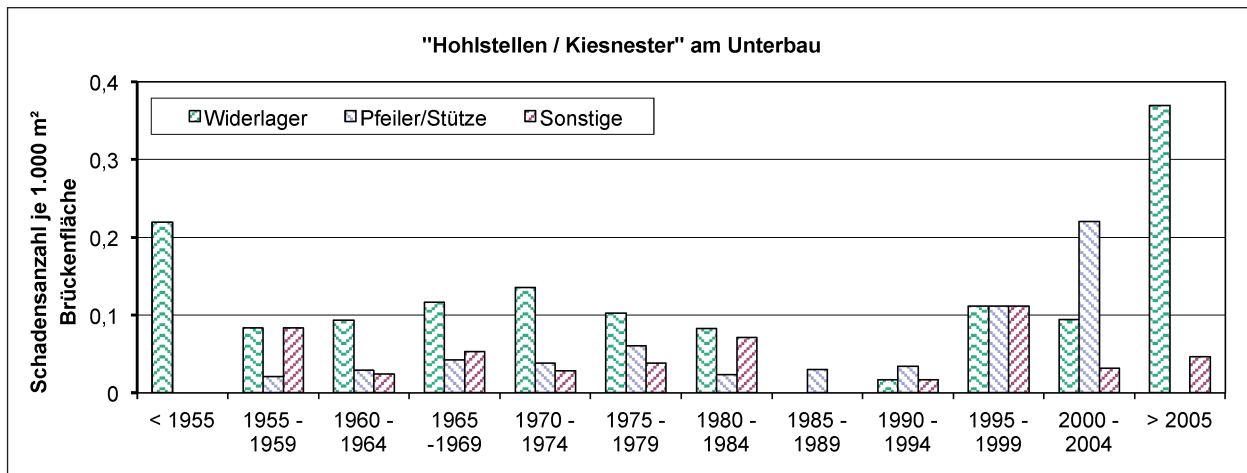


Bild 37: Auftreten von Hohlstellen/Kiesnestern am Unterbau (Grundlage: 306 Schäden, bezogen auf die neugebaute Brückenfläche der Bauteilgruppe im jeweiligen Baujahr)

### Häufig auftretende Schäden an der Lagerung

Die Auswertungen (Bild 38 und Bild 39) zeigen, dass Korrosion die häufigste Schadensart von Brückenlagern darstellt. Weitere (häufig) aufgetretene Schäden an Lagern sind eine fehlerhafte Lage (verschobenes Lager, verbogene Führungsschienen, usw.) sowie Schäden am Elastomer. Die Schadensverläufe der Schäden „Korrosion“ (Bild 38) und Schäden am Elastomer (Bild 39) belegen, dass die meisten Lagerschäden an Brücken mit Baubeginn vor 1990 auftreten. Neben der Einführung der DIN 4141-14 im Jahr 1985, bei der das Nachweisformat für die Bemessung von bewehrten Elastomerlagern erweitert wurde, kann die stetige industrielle Weiterentwicklung der Brückenlager als Beleg für die Abnahme der Schadensfälle angeführt werden. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass Lager Verschleißteile sind, die im Laufe der Zeit bzw. bei der Feststellung entsprechender Schäden durch neue Lager ersetzt werden. Aufgrund der fehlenden Informationen zum Alter der Lager bzw. zu einem

vorgenommenen Lageraustausch in den zur Verfügung gestellten Datenbanken (vgl. Kapitel 2.2.2), kann dieser Umstand bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden.

### Häufig auftretende Schäden an der Ausrüstung

Die Auswertung von Schäden an der Brückenausrüstung belegt, dass anders als beim Überbau, Unterbau und Lager bei keinem Konstruktionsteil die Häufigkeit von Schäden bezogen auf die neugebaute Brückenfläche rückläufig ist (Bild 40 bis Bild 42). Für den Anteil von Schäden am Fahrbahnbelag und an der Abdichtung, bezogen auf die neugebaute Brückenfläche für den entsprechenden Jahresabschnitt, kann keine signifikante Verringerung festgestellt werden. Die Schadensanteile für Schäden an den Leitungen und der Entwässerung (Bild 41), an den Fahrbahnübergängen (Bild 42) sowie am Geländer und der Schutzeinrichtung sind für Brücken mit Baubeginn ab 2005 sogar bezogen auf die Brückenfläche des Jahresabschnitts angestie-

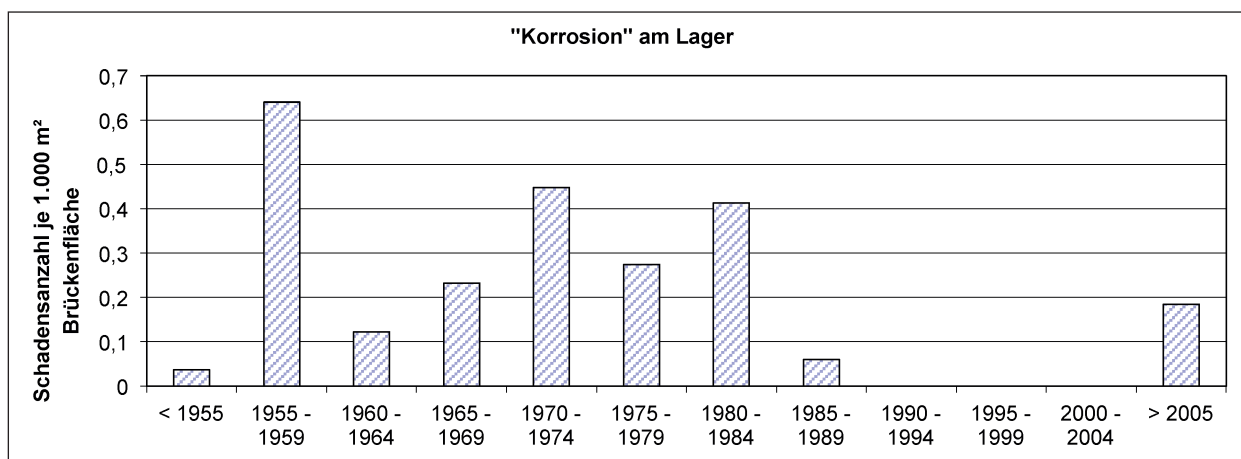


Bild 38: Auftreten von korrodierten Lagern (Grundlage: 457 Schäden)

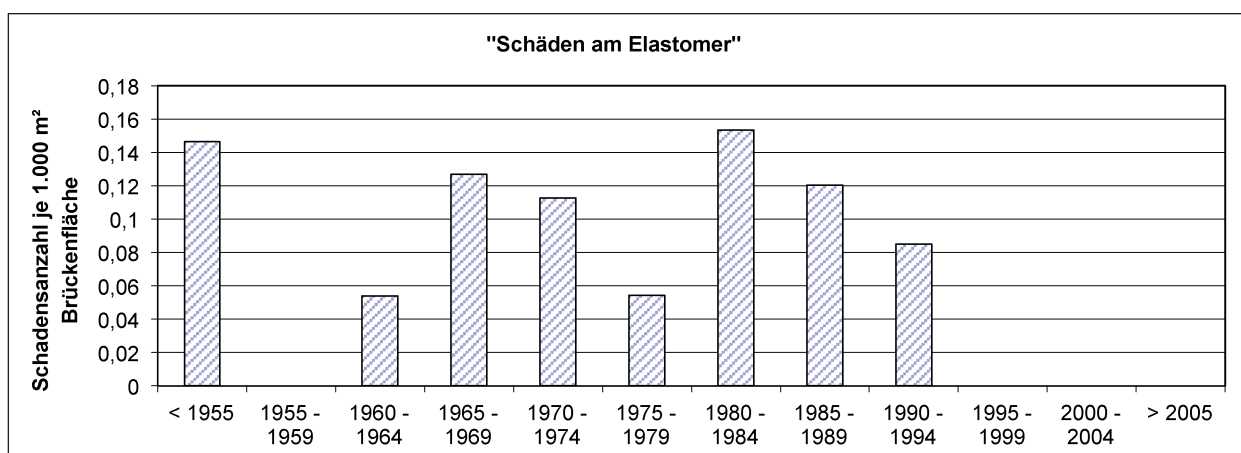


Bild 39: Auftreten von Schäden am Elastomer des Lagers (Grundlage: 138 Schäden)

gen. Da die eingesetzten Materialien im Laufe der Zeit stetig weiterentwickelt wurden, konstruktive Schwachstellen weitestgehend bekannt sind und die höhere Beanspruchung (infolge der gestiegenen Verkehrsbelastung) für die direkt befahrenen Bauwerksteile nicht als Grund für die Zunahme von Schäden an Brücken mit Baubeginn nach 2005 he-

rangezogen werden kann, lässt sich vermuten, dass Schäden an der Ausrüstung insbesondere in den ersten Jahren nach dem Bau der Brücke auftreten und beseitigt werden. Bei Massivbrücken ist zu beobachten, dass Schäden häufig zunächst in den ersten Jahren nach der Fertigstellung der Brücke auftreten (ca. 2 Jahre), sich dann eine ge-

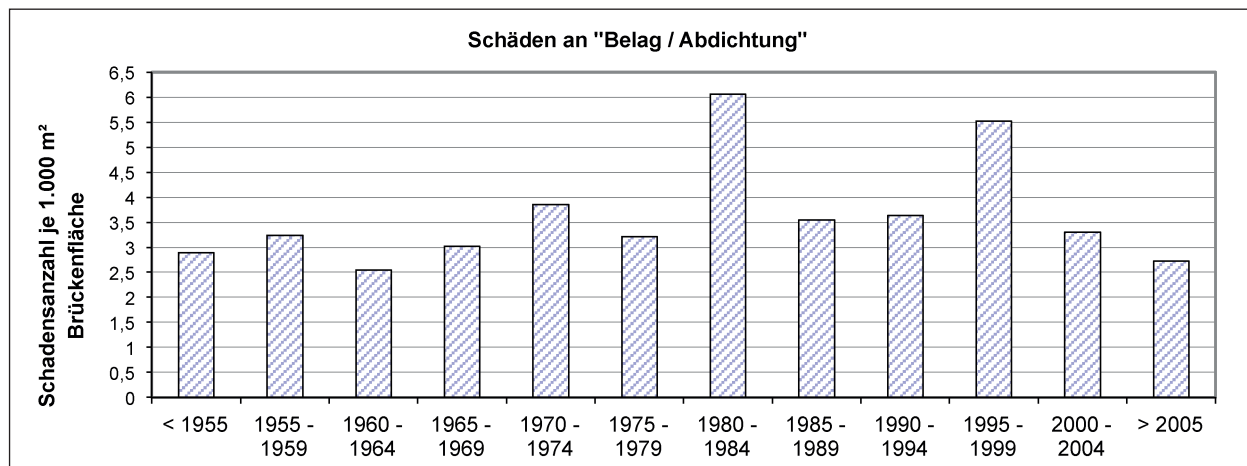


Bild 40: Auftreten von Schäden am Belag und an der Abdichtung (Grundlage: 5.553 Schäden)

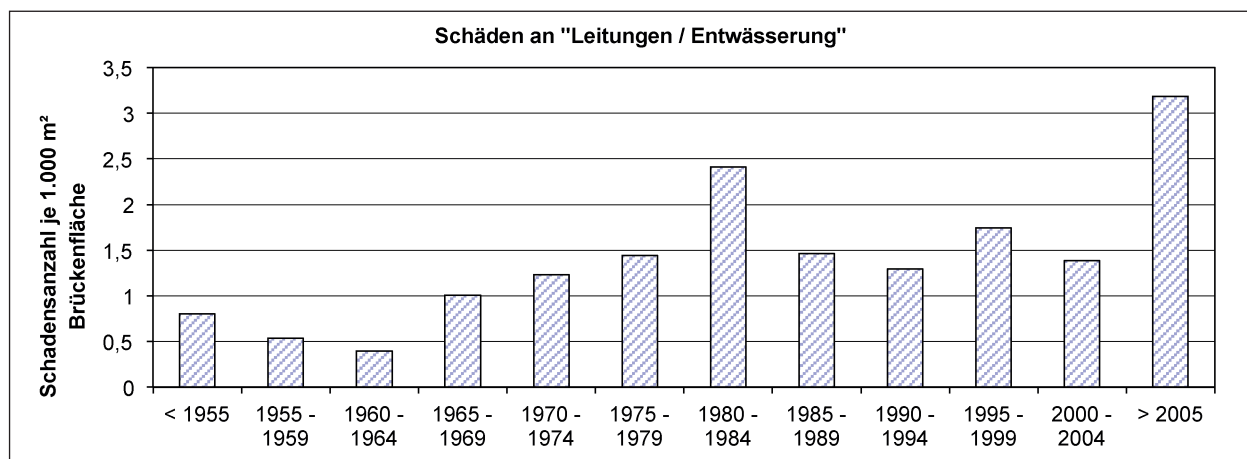


Bild 41: Auftreten von Schäden an Leitungen und der Entwässerung (Grundlage: 1.909 Schäden)

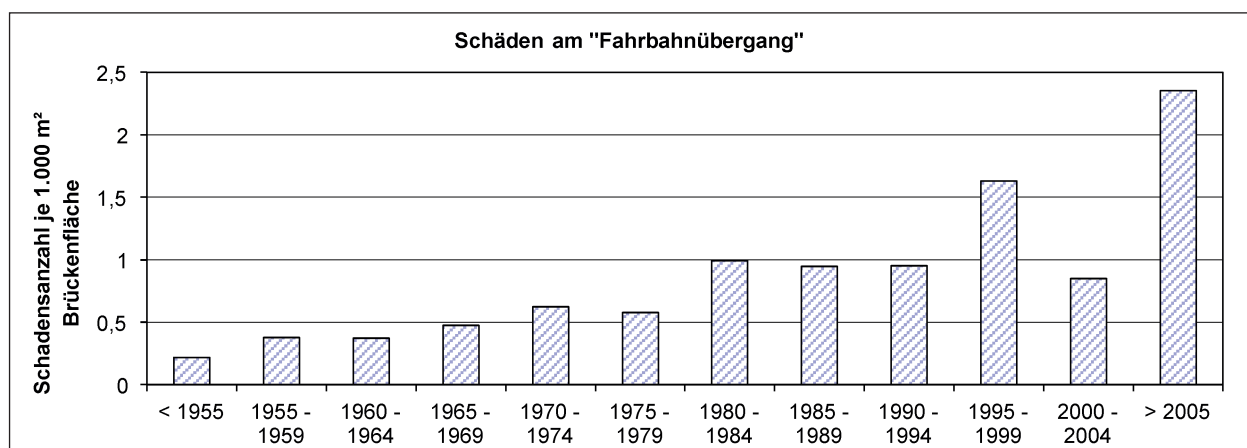


Bild 42: Auftreten von Schäden am Fahrbahnübergang (Grundlage: 1.001 Schäden)

wisse Zeitspanne (ca. 20 Jahre) anschließt in der weniger Schäden auftreten und es danach wieder zu einem Anstieg der Schadenshäufigkeit kommt.

### 2.2.5 Auswertung nach Brückenlänge

Die nachfolgenden Diagramme veranschaulichen den Einfluss der Bauwerkslänge auf die Auftretenshäufigkeit der Schäden. Die Schadensauswertungen beziehen sich dabei auf die Brückenfläche der jeweiligen Brückenlängen und stellen das Auftreten eines Schadens ohne Berücksichtigung des flächigen Schadensausmaßes dar. In den zur Verfügung gestellten Daten finden sich keine oder nur lückenhafte Informationen zum flächigen Ausmaß einzelner Schäden, sodass eine Auswertung bezüglich der Schadensfläche nicht möglich ist. Bild 43 zeigt, dass mit zunehmender Brückenlänge die Schadenshäufigkeit bezogen auf die Brückenfläche der jeweiligen

Längengruppierung an jedem Bauwerksteil abnimmt. Die meisten Schäden bezogen auf die Brückenfläche treten an Brücken mit einer Gesamtlänge von 5-30 m auf. Bei Brücken mit Gesamtlängen größer als 150 m nimmt die Schadenshäufigkeit hingegen deutlich ab. Es zeigt sich zudem, dass der Anteil von Schäden an der Ausrüstung und am Unterbau bezogen auf alle auftretenden Schäden mit zunehmender Brückenlänge abnimmt, wohingegen der Schadensanteil von Schäden am Überbau mit zunehmender Brückenlänge zunimmt (Bild 44). Der Anteil an schadhafte Lagern ist unabhängig von der Brückenlänge deutlich geringer als die Schadensanteile der übrigen Brückenelemente.

Die Schadenshäufigkeit von freiliegender Bewehrung, Hohlstellen und Kiesnestern ist für den Überbau sowie den Unterbau bei Brücken mit einer Gesamtlänge bis 150 m annähernd konstant (Bild 45

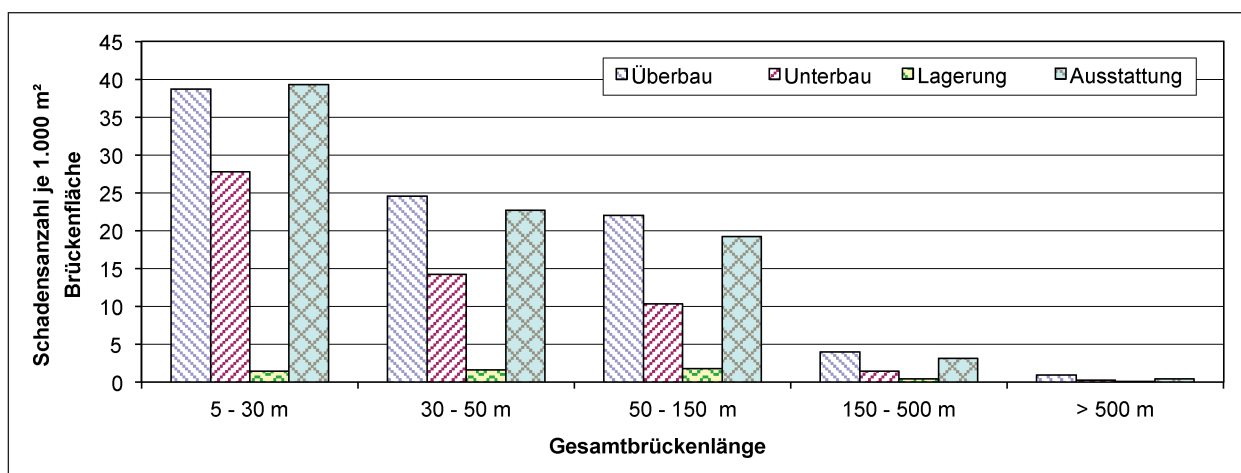


Bild 43: Schadensverteilung für die Bauwerksteile bezogen auf die Flächen für die zugehörigen Bauwerkslängen (Grundlage: 43.487 Schäden)

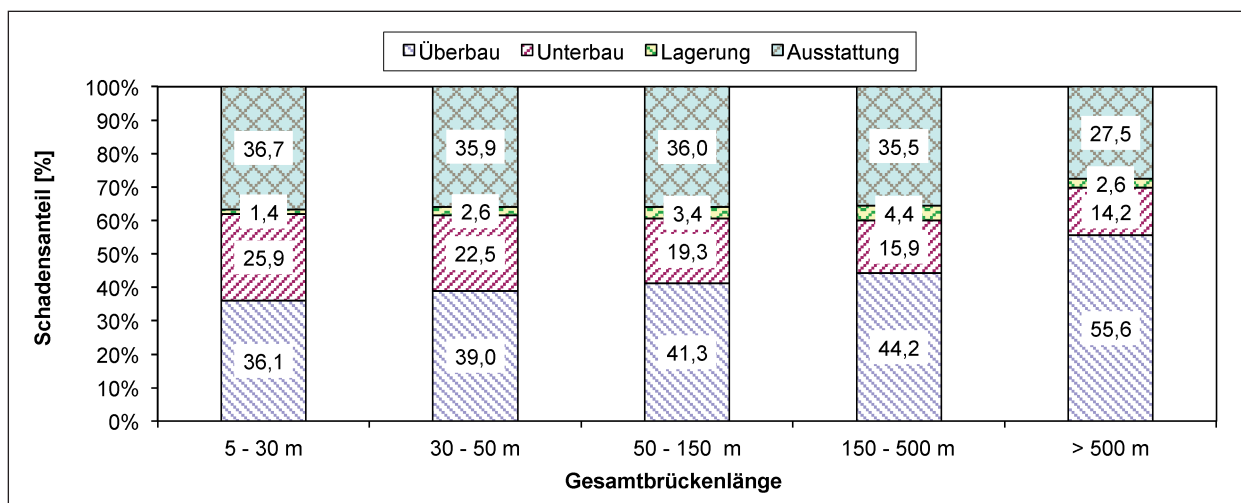


Bild 44: Schadensverteilung an Bauwerksteilen für die unterschiedlichen Bauwerkslängen (Grundlage: 43.487 Schäden)

und Bild 46). Im Gegensatz dazu treten Risse sowohl am Überbau als auch am Unterbau an kleinen Brücken mit einer Länge von 5-30 m deutlich häufiger auf als an längeren Brücken. Abplatzungen und

Betonausbrüche an Über- und Unterbauten treten ebenso wie Risse deutlich häufiger an Brücken mit geringen Längen auf.

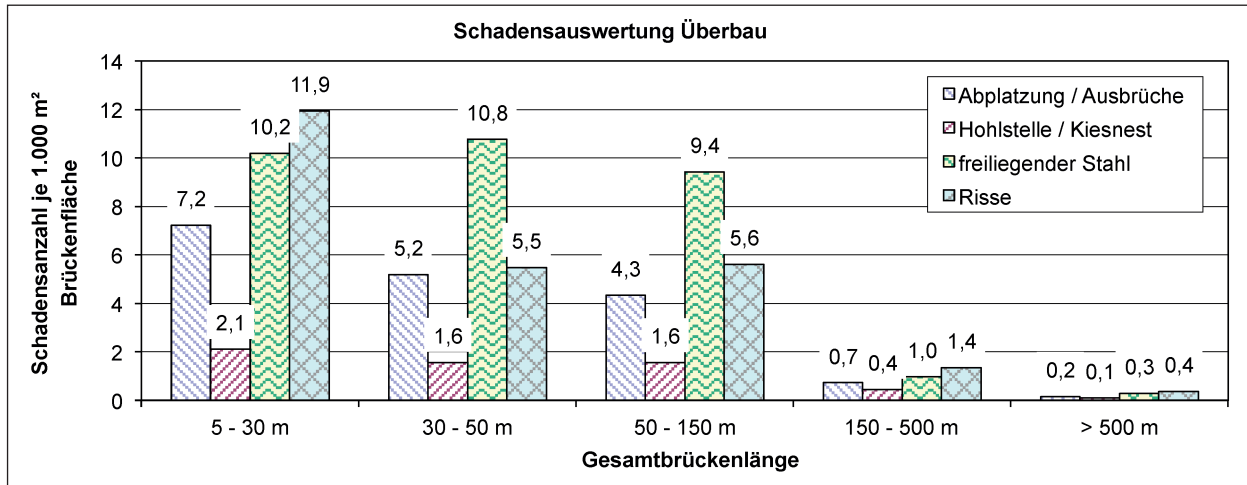


Bild 45: Schadensverteilung häufiger Schäden am Überbau für unterschiedliche Bauwerkslängen (Grundlage: 15.240 Schäden)

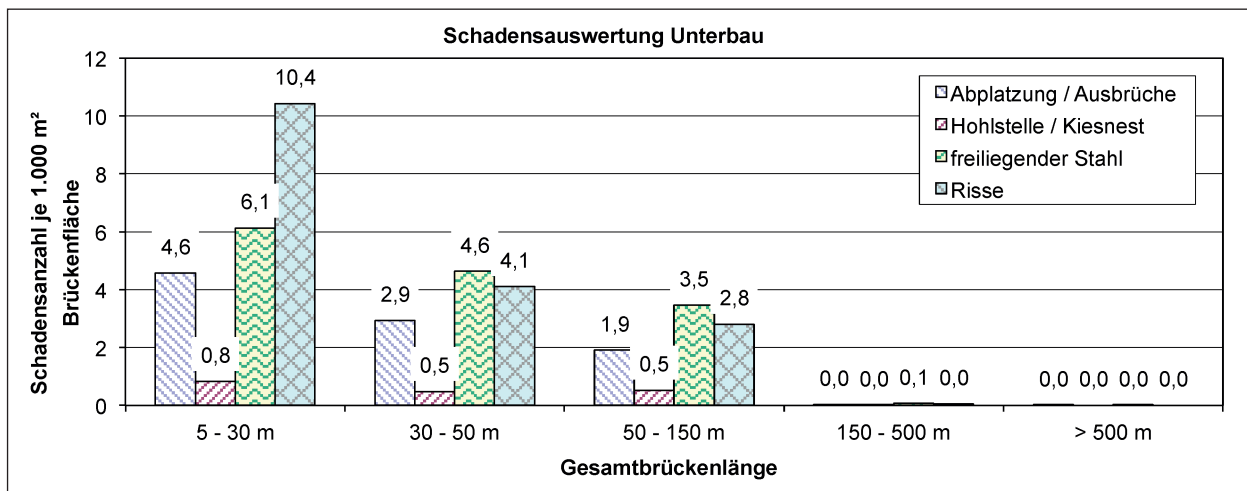


Bild 46: Schadensverteilung häufiger Schäden am Unterbau für unterschiedliche Bauwerkslängen (Grundlage: 7.332 Schäden)

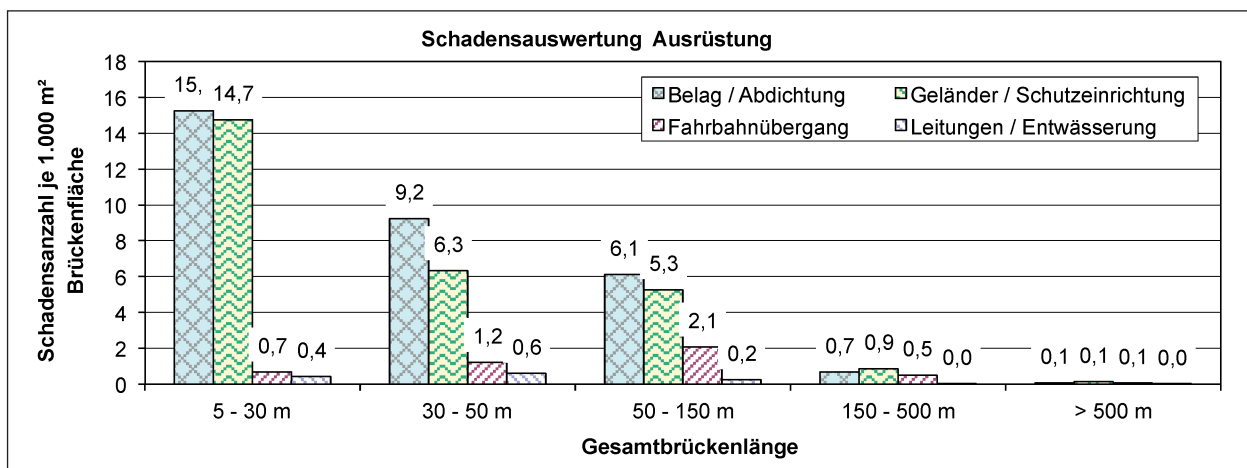


Bild 47: Schadensverteilung auffälliger Bauwerksteile an der Ausrüstung (Grundlage: 11.703 Schäden)

Die Auswertung der Bauwerksausrüstung (Bild 47) zeigt, dass Schäden am Belag und der Abdichtung sowie an Geländer und der Schutzeinrichtung mit zunehmender Brückenlänge bezogen auf die Brückenfläche der jeweiligen Längengruppierung abnehmen. Brücken mit Längen zwischen 5-30 m weisen relativ zur Brückenfläche die meisten Schäden an diesen Konstruktionsteilen auf. Bei den Fahrbahnübergängen hingegen ist die Häufigkeit von Schäden an Brücken mit einer Gesamtlänge zwischen 50-100 m am höchsten.

### 2.2.6 Auswertung nach Brückenklasse/ragfähigkeit

Die Tragfähigkeit bzw. die Brückenklasse, nach der eine Brücke bemessen wurde, ist ein wichtiges Merkmal für die Beurteilung von Brücken. Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Schadensverteilung in Bezug auf die unterschiedlichen Brückenklassen. Bild 48 veranschaulicht die Schadensver-

teilung einerseits bezogen auf die Gesamtfläche aller Brücken und andererseits bezogen auf die Flächen der Brücken für die jeweilige Brückenklasse. Bezogen auf die Brückenfläche aller Brücken ist die Schadenshäufigkeit bei Brücken mit Brückenklasse 60 deutlich höher als bei allen anderen Brückenklassen. Die meisten Schäden (absolute Schadensanzahl) treten somit bei Brücken der Brückenklasse 60 auf. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Brücken die gemäß Brückenklasse 60 bemessen wurden auch den größten Anteil an der Gesamtbrückenfläche haben. Bezogen auf die Brückenfläche für die jeweilige Brückenklasse ist die Schadenshäufigkeit jedoch bei Brücken nach BK12, BK16, BK16/16 und BK30, BK45 am höchsten. Somit zeigt sich, dass Brücken, die gemäß einer Brückenklasse mit geringeren Lastansätzen bemessen wurden und zudem im Allgemeinen auch älter sind, eine deutliche höhere Schadenshäufigkeit aufweisen.

Zur genaueren Auswertung der Schäden bezüglich der Brückenklasse werden die aufgetretenen Schä-

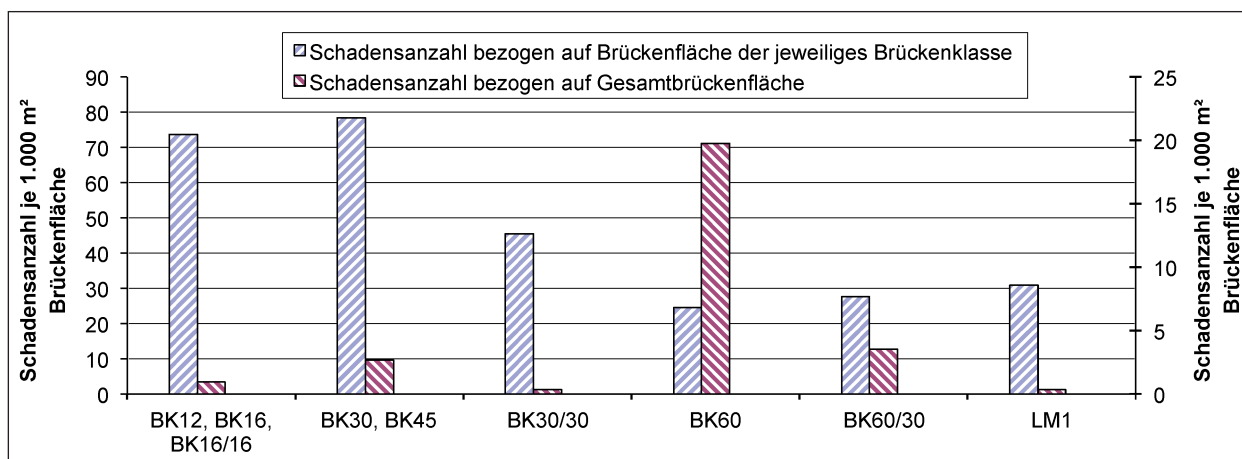


Bild 48: Schadensverteilung bezogen auf die Brückenklassen (Grundlage: 44.338 Schäden)

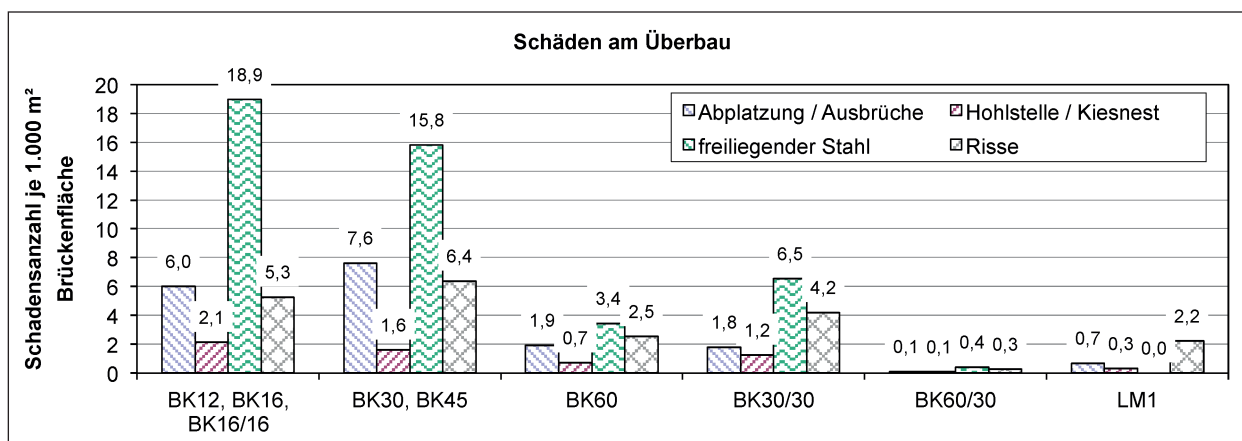
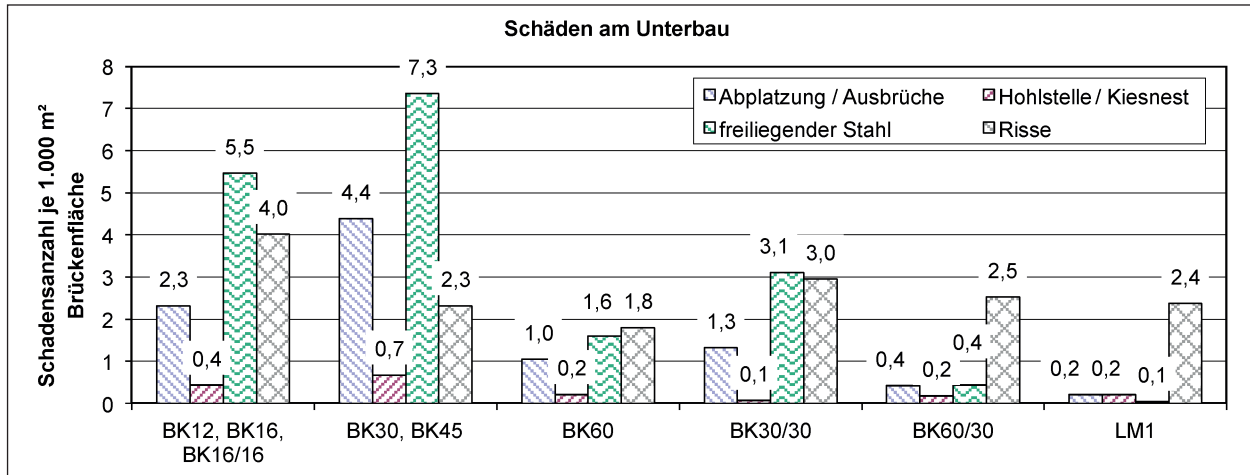
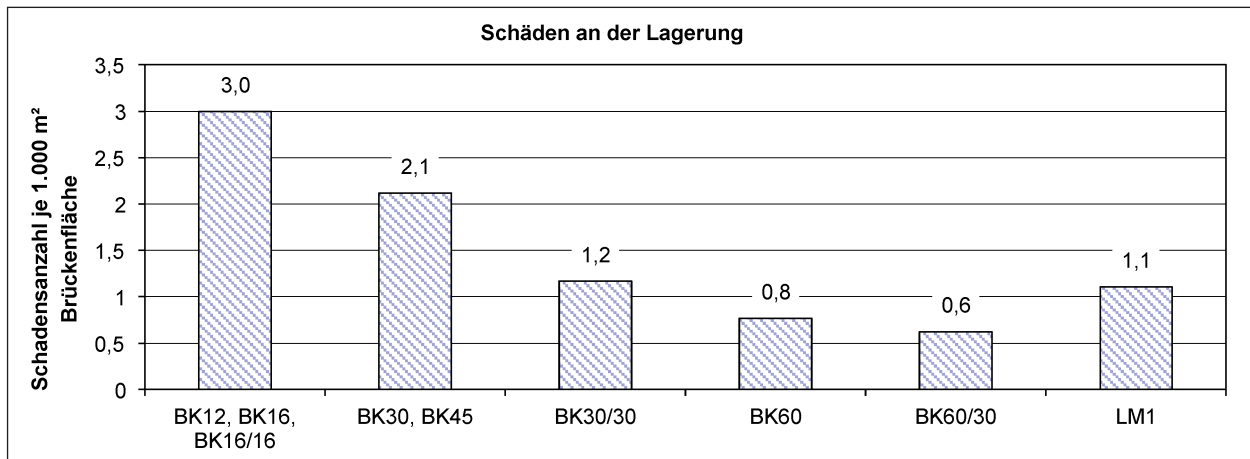


Bild 49: Schadensverteilung am Überbau bezogen auf die Brückenfläche für die jeweilige Brückenklasse (Grundlage: 13.925 Schäden)





**Bild 50:** Schadensverteilung am Unterbau bezogen auf die Brückenfläche für die jeweilige Brückenklasse (Grundlage: 7.976 Schäden)



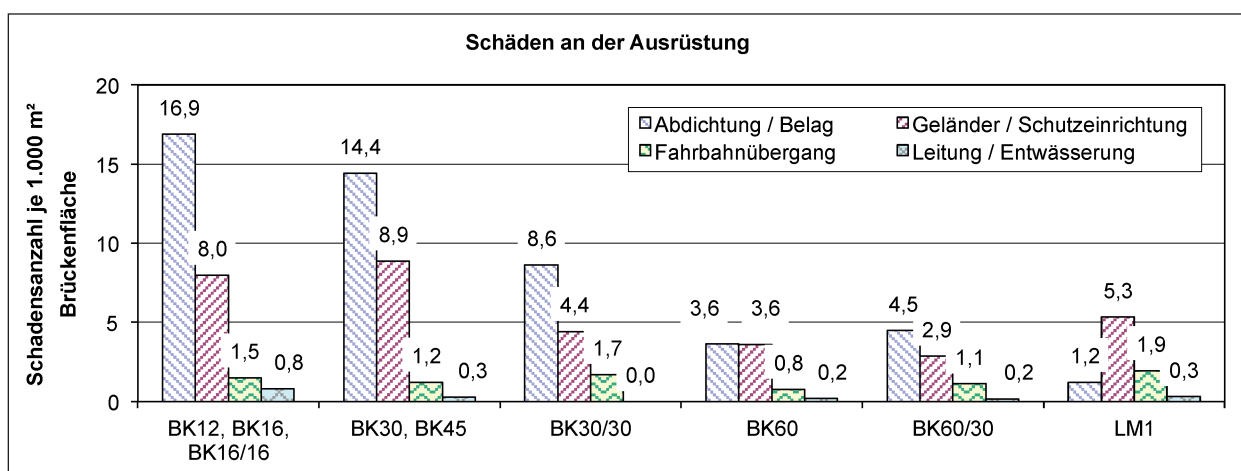
**Bild 51:** Schadensverteilung an der Lagerung bezogen auf die Brückenfläche für die jeweilige Brückenklasse (Grundlage: 1.334 Schäden)

den im Folgenden für die einzelnen Bauwerksteile getrennt dargestellt.

Brücken der Brückenklasse BK60/30 und LM1 weisen deutlich seltener Schäden am Überbau auf als die übrigen Brücken (Bild 49). Dabei spiegelt sich der direkte Bezug zum Baujahr der Brücken wieder. Besonders häufig treten Schäden hingegen am Überbau von Brücken mit untergeordneten Brückenklassen auf. Für die Brückenklassen BK12 bis BK45 stellt freiliegende Bewehrung dabei den weitaus größten Anteil an aufgetretenen Schäden dar. Ebenso zeigt sich, dass der Schadensfall freiliegende Bewehrung bei Brücken der Brückenklasse 30/30 deutlich häufiger auftritt als andere Schäden. Wie bereits erwähnt, ist die Schadenshäufigkeit bei Brücken nach dem Lastmodell 1 im Vergleich zu anderen Brücken relativ gering, jedoch zeigt das Diagramm eine auffällig große Anzahl an Risschäden.

Ebenso wie am Überbau zeigt sich auch bei der Schadensverteilung am Unterbau (Bild 50), dass die untergeordneten Brückenklassen eine vergleichsweise höhere Schadenshäufigkeit aufweisen. Analog zum Überbau ist bei diesen Brücken auch die freiliegende Bewehrung der maßgebende Schadensfall. Risse hingegen treten bei nahezu allen Brückenklassen mit der gleichen Häufigkeit auf, wobei dieser Schadenstyp für Brücken der Brückenklasse 60/30 und LM1 deutlich häufiger auftritt als andere Schäden.

Die Verteilung von aufgetretenen Lagerschäden (Bild 51) verdeutlicht eine Abnahme der Schadenshäufigkeit mit steigender Anforderung bezüglich der Brückenklasse von BK12 bis BK60/30. Bei Brücken, die nach dem Lastmodell 1 bemessen wurden, ist die Schadenshäufigkeit im Vergleich zu Brücken die nach BK60 und BK60/30 bemessen wurden, hingegen etwas höher.



**Bild 52:** Schadensverteilung an der Brückenausrüstung bezogen auf die Brückenfläche für die jeweilige Brückenklasse (Grundlage: 14.605 Schäden)

Bei der Brückenausrüstung (Bild 52) sind Schäden am Belag und der Abdichtung sowie Schäden am Geländer und der Schutzeinrichtung besonders auffällig. Insbesondere für untergeordnete Brücken nach Brückenklassen BK12 bis BK30/30 sind diese Schäden deutlich häufiger aufgetreten als andere Schäden. Schäden an Fahrbahnübergängen sowie an Leitungen und Entwässerungen sind hingegen deutlich seltener und weitestgehend unabhängig von der Brückenklasse aufgetreten.

### 2.2.7 Auswertung nach Schadensort bzw. Lage des Schadens

Aufgrund der unvollständigen oder zum Teil fehlenden Angaben zur genauen Lage der Schäden beschränkt sich die Auswertung für den Schadensort auf den Überbau, wobei auch bei diesem Bauwerksteil ein gewisser Anteil an Schäden nicht genau dokumentiert ist. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass einige aufgetretene Schäden, insbesondere im Stützbereich der Konstruktion, garnicht einsehbar sind und somit auch nicht dokumentiert werden können.

Für den Schadensfall freiliegende Bewehrung ergibt sich keine Auffälligkeit im Hinblick auf den Schadensort (Bild 53). Sowohl Feldbereiche und Stützbereich also auch End- und Widerlagerbereiche sind schadensbehaftet. Es wird jedoch deutlich, dass Plattenbalken im Feld- und Stützbereich deutlich häufiger betroffen sind. Auch im Bereich der Momentennullpunkte (im Weiteren als Wechselbereich bezeichnet) wurde bei Plattenbalken im Vergleich zu den anderen Bauwerksarten deutlich häufiger der Schadentyp freiliegende Bewehrung

dokumentiert. Hohlkastenbrücken hingegen stellen an keiner Stelle des Überbaus und des Unterbaus eine relevante Schadenshäufigkeit für freiliegende Bewehrung dar.

Anders als bei „freiliegender Bewehrung“ ergeben sich für „Risse im Beton“ auffällige Schadenshäufigkeiten für den Widerlagerbereich (Bild 54). Wechselbereich und Stützbereich sind hingegen kaum von Risschäden betroffen. Ein Einfluss der unterschiedlichen Bauwerksarten wird dabei nicht ersichtlich. Lediglich Hohlkastenbrücken weisen in allen Bereichen eine geringere Schadenshäufigkeit als andere Bauwerksarten auf. Es ist jedoch anzumerken, dass eine Bewertung bezüglich des Schadensortes von Risschäden, aufgrund des großen Anteils nicht dokumentierter Schadensorte, nicht abschließend erfolgen kann.

„Abplatzungen und Ausbrüche“ treten besonders häufig im Widerlager- und Endbereich sowie im Feldbereich von Brückenüberbauten auf (Bild 55). Besonders Plattenbrücken zeichnen sich im Widerlagerbereich durch eine höhere Schadenshäufigkeit aus. Hohlkastenbrücken hingegen sind in allen Bereichen deutlich seltener von Abplatzungen und Ausbrüchen betroffen als andere Bauwerksarten. Stütz- und Wechselbereich sind bei allen Bauwerksarten kaum von diesen Schäden betroffen.

Hohlstellen und Kiesnester treten besonders im Feldbereich von Überbauten auf (Bild 56). Betroffen sind dabei alle Bauwerksarten, wobei an Plattenbalkenbrücken die meisten Schäden auftreten. Auffällig ist zudem, dass Plattenbrücken im Endbereich deutlich häufiger Hohlstellen und Kiesnester aufweisen als andere Bauwerksarten. Ebenso ist die



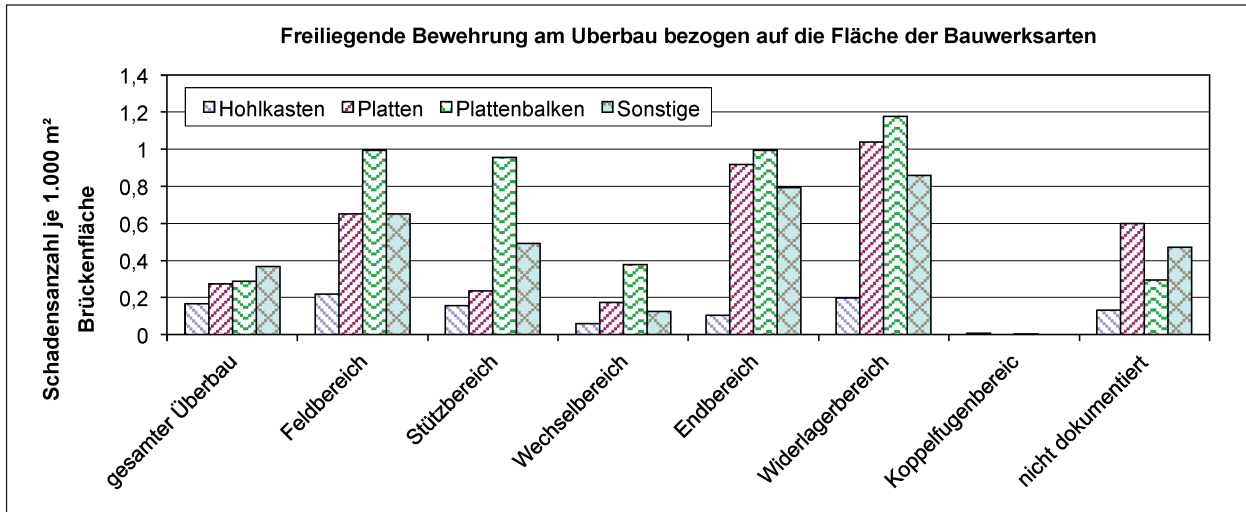


Bild 53: Einteilung des Schadentyps „freiliegender Bewehrung“ in die Bereiche der Brückenlängsrichtung bezogen auf die Brückenflächen der jeweiligen Bauwerkstypen (Grundlage: 4.709 Schäden)

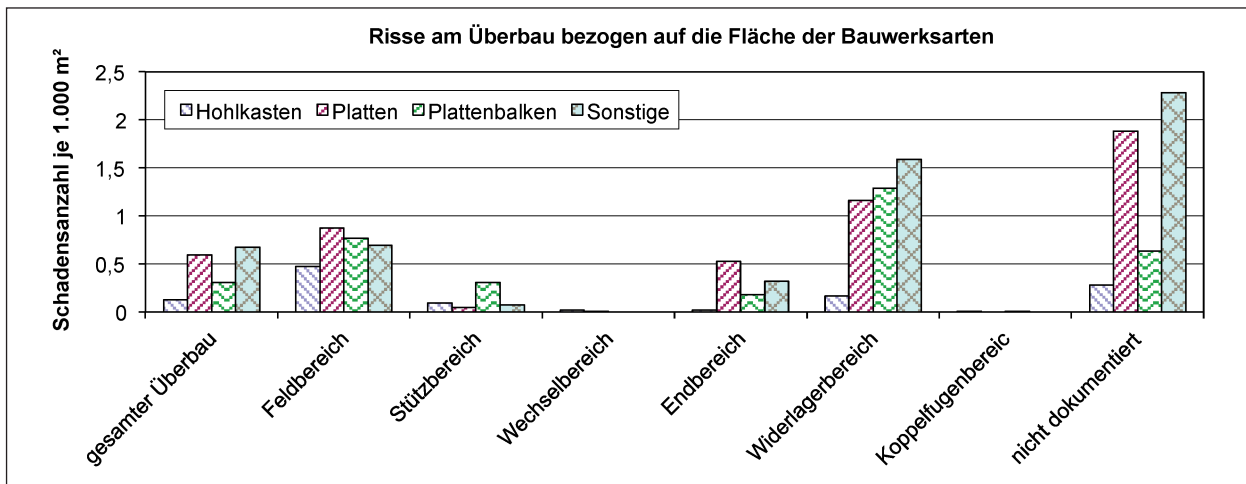


Bild 54: Einteilung von Risschäden in die Bereiche der Brückenlängsrichtung bezogen auf die Brückenflächen der jeweiligen Bauwerkstypen (Grundlage: 4.627 Risschäden)

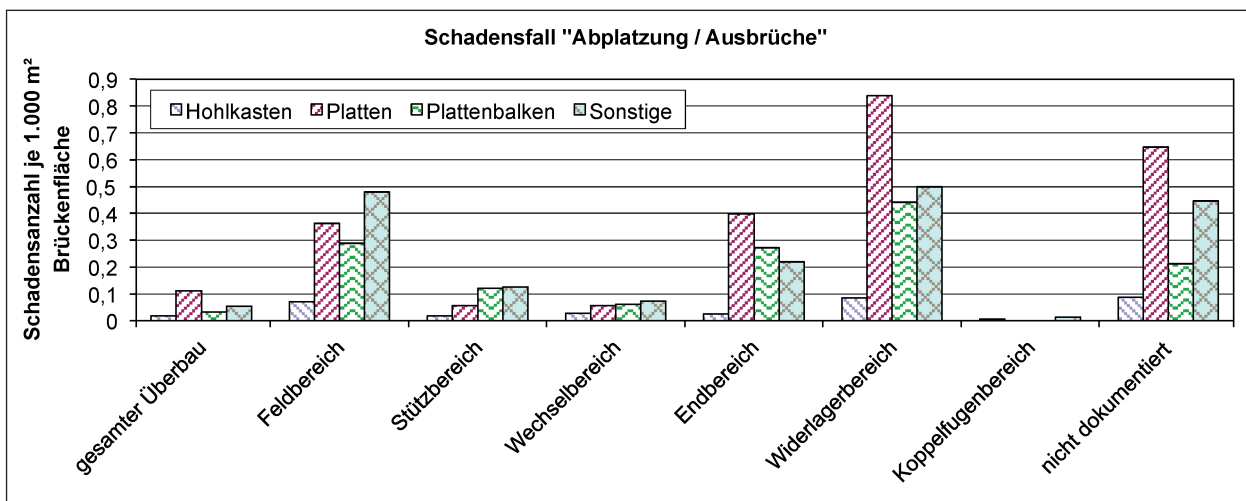
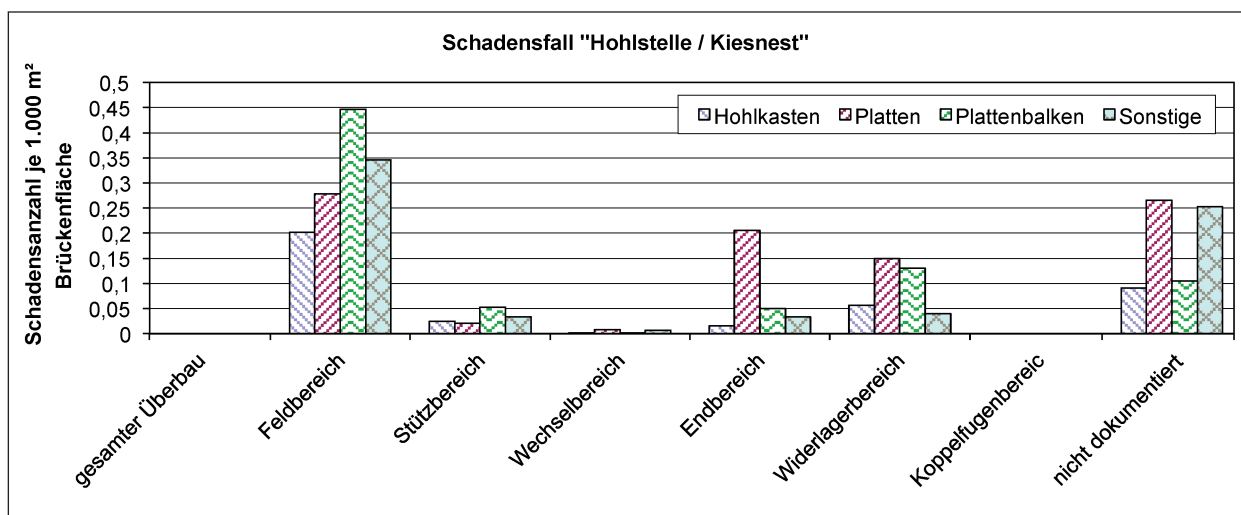
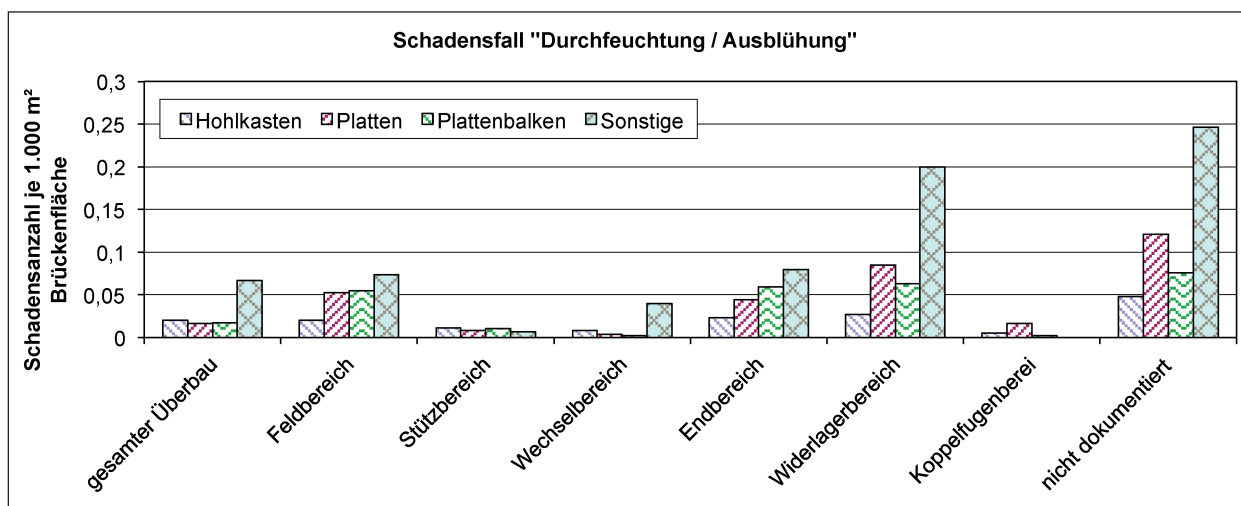


Bild 55: Einteilung von Abplatzungen und Ausbrüchen in die Bereiche der Brückenlängsrichtung bezogen auf die Brückenflächen der jeweiligen Bauwerkstypen (Grundlage: 1.831 Schäden)



**Bild 56:** Einteilung von Hohlstellen und Kiesnestern in die Bereiche der Brückenlängsrichtung bezogen auf die Brückenflächen der jeweiligen Bauwerkstypen (Grundlage: 996 Schäden)



**Bild 57:** Einteilung von Durchfeuchtungen und Ausblühungen in die Bereiche der Brückenlängsrichtung bezogen auf die Brückenflächen der jeweiligen Bauwerkstypen (Grundlage: 448 Schäden)

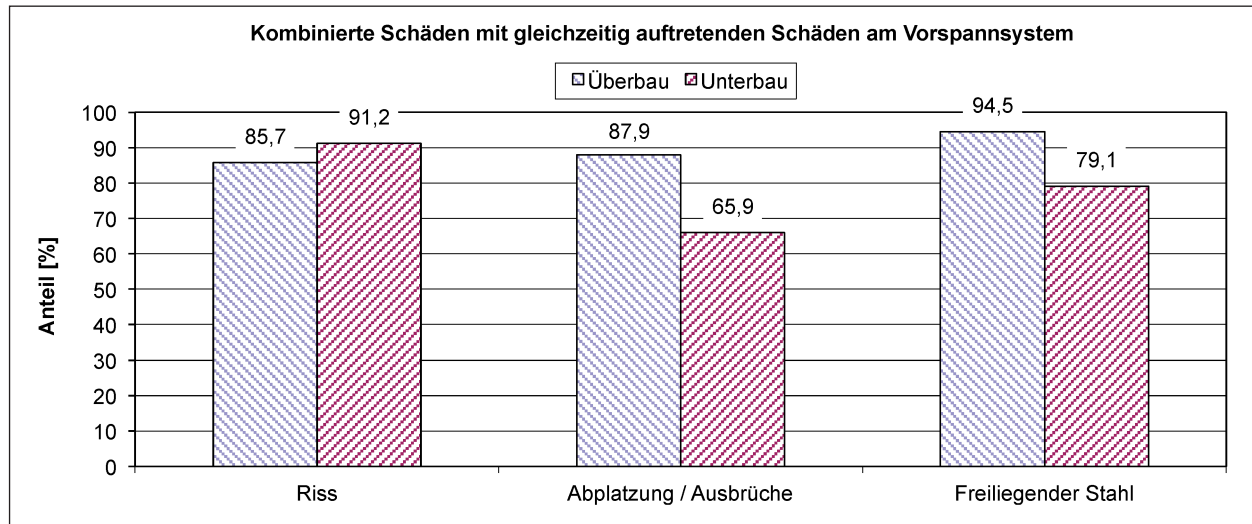
Schadenshäufigkeit im Widerlagerbereich bei Platten- und Plattenbalkenbrücken wesentlich höher als bei Hohlkastenbrücken und sonstigen Bauwerksarten.

Auffällige bzw. relevante Orte, an denen Durchfeuchtungen und Ausblühungen vermehrt auftreten, sind Widerlager- und Endbereich sowie Feldbereiche (Bild 57). Jedoch ist die Zahl von nicht genau lokalisierten Schäden für Durchfeuchtungen und Abplatzungen vergleichsweise groß. Auffällig ist, dass der Anteil von Schäden im Widerlagerbereich bei sonstigen Bauwerksarten, insbesondere bei Gewölbe- und Bogenbrücken sowie reinen Balkenbrücken deutlich höher ist als bei anderen Bauwerksarten.

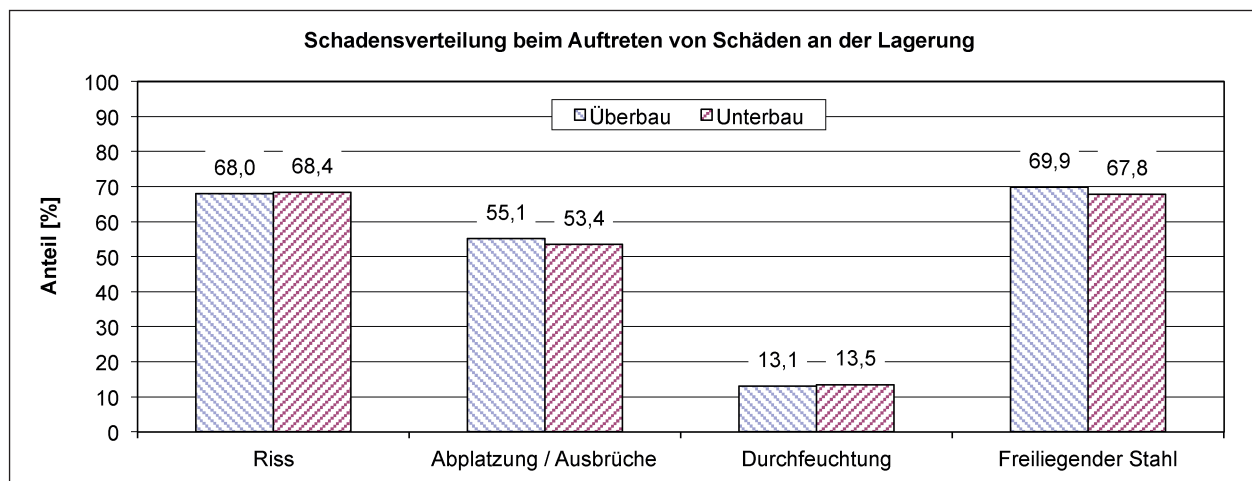
## 2.2.8 Auswertung gemeinsam auftretender Schäden

Bei der Auswertung gemeinsam auftretender Schäden wird unterschieden in Schäden, die zusammen am gleichen Bauwerksteil auftreten (siehe Anhang 11.1.3) und Schäden, die zusammen mit Schäden an anderen Bauwerksteilen auftreten (siehe Bild 58 bis Bild 61). Untersucht wurde die Schadensverteilung von Schäden am Überbau und Unterbau bei gleichzeitigem Auftreten von:

- Schäden am Vorspannsystem,
- Schäden am Belag und der Abdichtung,
- Schäden an der Lagerung,
- Schäden am Fahrbahnübergang.



**Bild 58:** Schadensverteilung von Schäden am Über- und Unterbau beim Auftreten von Schäden am Vorspannsystem (Grundlage: 145 Schäden am Vorspannsystem)



**Bild 59:** Schadensverteilung von Schäden am Über- und Unterbau beim Auftreten von Schäden an der Lagerung (Grundlage: 1.086 Schäden an der Lagerung)

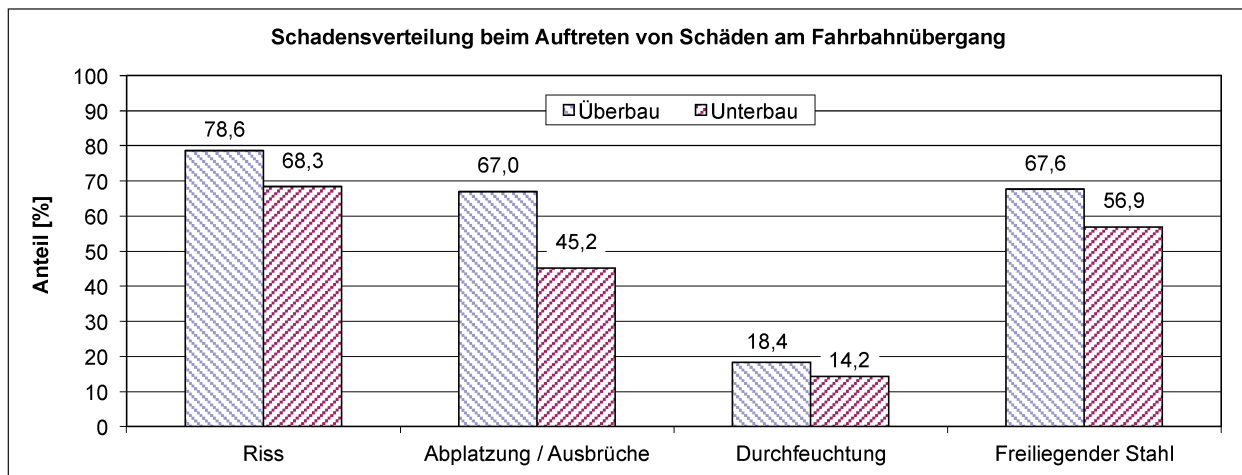
Für Brücken mit Schäden am Vorspannsystem treten gleichzeitig überwiegend freiliegende Bewehrung am Überbau (zu ca. 95 %), Risse am Über- und Unterbau (ca. 86 % bzw. 91 %) sowie Abplatzungen und Ausbrüche am Überbau (ca. 88 %) auf (Bild 58). Da sich die Schadensanteile der aufgetretenen Kombinationen nicht deutlich voneinander unterscheiden, ist eine Beurteilung bezüglich der Schadensbeeinflussung für Schäden am Vorspannsystem nicht eindeutig möglich. Aufgrund der insgesamt sehr geringen Anzahl an Schäden am Vorspannsystem im Vergleich zu anderen Schäden ist die Auswertung gemeinsam auftretender Schäden jedoch nur bedingt repräsentativ.

Bei Schäden an Brückenlagern ist die Kombination mit anderen Schäden deutlich seltener (Bild 59), sodass davon auszugehen ist, dass Schäden an

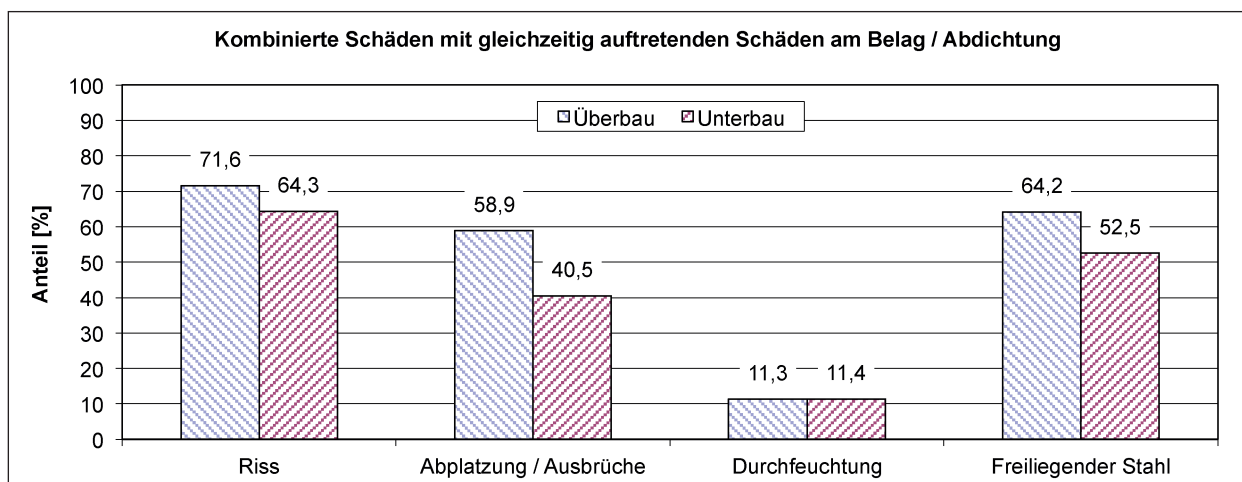
Brückenlagern andere Bauwerksteile weniger stark beeinflussen. Risse und freiliegende Bewehrung an Über- und Unterbauten treten in ca. 68 % bis 70 % der Fälle von Lagerschäden auf.

Bild 60 verdeutlicht, dass der Anteil von Schäden, die gleichzeitig mit Schäden am Fahrbahnübergang registriert wurden, keinen markanten Wert liefert. Risse am Überbau treten dabei als häufigste Kombination auf. Auffällig ist, dass Durchfeuchtungen, die u. a. durch undichte Fahrbahnübergänge entstehen können, lediglich eine Kombinationshäufigkeit von unter 20 % aufweisen.

Die Schadensverteilung bei gleichzeitigem Auftreten von Schäden am Belag und der Abdichtung ist analog zur Schadensverteilung für Fahrbahnübergänge (Bild 61). Die Kombinationshäufigkeiten der



**Bild 60:** Schadensverteilung von Schäden am Über- und Unterbau beim Auftreten von Schäden am Fahrbahnübergang (Grundlage: 1.001 Schäden am Fahrbahnübergang)



**Bild 61:** Schadensverteilung von Schäden am Über- und Unterbau beim Auftreten von Schäden am Belag und der Abdichtung (Grundlage: 5.553 Schäden am Belag/Abdichtung)

einzelnen Schäden sind hierbei jedoch noch geringer. Dabei fällt auf, dass Durchfeuchtungen kaum zusammen mit Schäden am Belag/Abdichtung auftreten (unter 12 %), obwohl schadhafte Abdichtungen i. d. R. auch zu einem Wassereintrag in die Konstruktion führen.

Die Kombinationen von gleichzeitig auftretenden Schäden am gleichen Bauteil sind für den Überbau sowie für den Unterbau im Anhang 11.1.3 dargestellt.

### 2.2.9 Auswertung nach Schadensrelevanz (Schadenswertung nach RI-EBW-PRÜF)

Um eine genauere Bewertung im Hinblick auf das Schadensausmaß und die Schadensursache(n) zu ermöglichen, wird den aufgetretenen Schäden in der Datenbank SIB-Bauwerke jeweils eine Bewer-

tungszahl nach RI-EBW-PRÜF zugewiesen. Dabei wird für jeden Einzelschaden zwischen den Merkmalen Standsicherheit (S), Dauerhaftigkeit (D) und Verkehrssicherheit (V) unterschieden. Die Schadensbewertung richtet sich nach dem Schadensausmaß und unterteilt sich in:

- (0) keinen Einfluss auf die Standsicherheit/Dauerhaftigkeit/Verkehrssicherheit,
- (1) deutlich im Rahmen zulässiger Toleranzen (Schadensbeseitigung im Rahmen der Bauwerksunterhaltung),
- (2) Toleranzgrenzen sind erreicht oder teilweise überschritten (Schadensbeseitigung mittelfristig erforderlich),
- (3) Toleranzen sind überschritten (Schadensbeseitigung kurzfristig; Nutzungseinschränkungen),

- (4) Standsicherheit/Dauerhaftigkeit/Verkehrssicherheit ist nicht mehr gegeben (Sofortmaßnahmen; Nutzungseinschränkung; Instandsetzung oder Erneuerung).

Als relevante Schäden werden diejenigen bezeichnet, die mit einer Bewertungszahl  $\geq 2$  eingestuft werden. Bild 62 gibt einen Überblick über die Verteilung der Schadensbewertung für die Merkmale Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit aller Einzelschäden an den untersuchten Brücken. Zur Bewertung der Schädigungsrelevanz werden bei der Auswertung sowohl die Auftretenshäufigkeit der Schäden (Häufigkeitsverteilung innerhalb des jeweiligen Merkmals) als auch das Schadensausmaß (Bewertungszahlen nach RI-EBW-PRÜF) berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die relevanten Schäden ( $\geq 2$ ) zum überwiegenden Teil die Dauerhaftigkeit betreffen. Ca. 42,5 % dieser, die Dauerhaftigkeit betreffenden Schäden sind somit als relevant einzuordnen. Der Anteil von relevanten Schäden für die Verkehrssicherheit hingegen ist mit ca. 8 % der Schäden deutlich geringer. Noch geringer ist der Anteil von relevanten Schäden für die Standsicherheit. Dieser liegt bei lediglich ca. 0,3 %. Auch bei dem Anteil von Schäden, die keine Auswirkung auf das jeweilige Merkmal haben, ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Dauerhaftigkeit und der Verkehrssicherheit sowie Standsicherheit ersichtlich. Lediglich 14,5 % aller Schäden haben keinen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit, wohin gegen ca. 81 % der aufgetretenen Schäden keinen Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben und ca. 94 % aller Schäden keinen Einfluss auf die Standsicherheit haben.

Im Folgenden werden die einzelnen Bauwerksteile sowie die unterschiedlichen Schadensfälle im Hinblick auf ihre Schadensbewertung ausgewertet. Die entsprechenden Diagramme sind dem Anhang 11.1.2 zu entnehmen. Bei allen Bauwerkselemen-

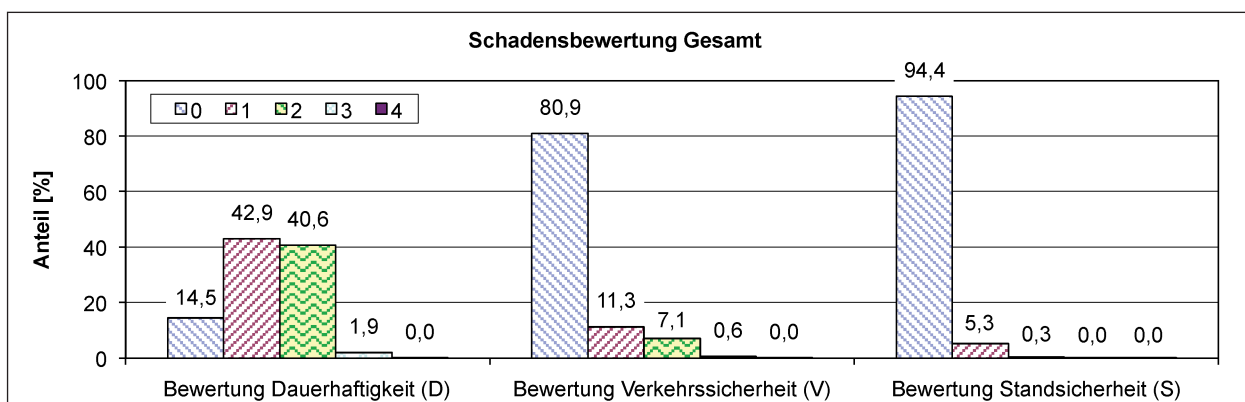
ten überwiegt der Anteil von relevanten Schäden für das Merkmal Dauerhaftigkeit deutlich. Gravierende Mängel/Schäden (mit einer Schadensbewertung von 4) sind für die einzelnen Merkmale an nahezu keinen Bauwerkselementen eingetreten.

Für den Brückenüberbau beträgt der Anteil an relevanten Schäden für die Dauerhaftigkeit ca. 48 %. Der Schadensanteil für das Merkmal Verkehrssicherheit beträgt dem gegenüber nur ca. 1,2 % und der Anteil an relevanten Schäden bezüglich der Standsicherheit liegt bei lediglich ca. 0,4 %. Von den aufgetretenen Schäden am Brückenüberbau haben jeweils über 90 % keinen Einfluss auf die Standsicherheit und Verkehrssicherheit.

Auswertungen der Schäden am Unterbau ergeben, dass der Anteil von Schäden, die keinen Einfluss auf die Standsicherheit und die Verkehrssicherheit haben bei über 95 % liegt. Im Gegensatz dazu beträgt der Anteil an Schäden ohne Einfluss auf die Dauerhaftigkeit (Bewertungszahl „0“) nur etwa 12,3 %. Zudem liegt der Anteil relevanter Schäden (Bewertungszahl „2“ und größer) hinsichtlich der Dauerhaftigkeit bei über 39 %.

Lagerschäden wirken sich vornehmlich auf die Dauerhaftigkeit von Brücken aus. Etwa 40 % der aufgetretenen Lagerschäden sind als relevant für die Dauerhaftigkeit einzustufen. Bezogen auf das Merkmal Standsicherheit sind nur etwa 2 % der Schäden an Lagern schädigungsrelevant. Die Verkehrssicherheit wird zu 99,5 % nicht von Schäden am Brückenlager beeinflusst.

Schäden an der Brückenausrüstung sind bezüglich der Dauerhaftigkeit zu ca. 39 % als relevant einzustufen. Der Anteil von relevanten Schäden für die Verkehrssicherheit ist bei der Brückenausrüstung mit ca. 19,4 % deutlich größer im Vergleich zum anderen Bauwerksteilen. Von den aufgetretenen



**Bild 62:** Schadensbewertung für alle Schäden an den untersuchten Brücken (Grundlage: 44.248 Schäden)



Schäden an der Ausrüstung haben hingegen nahezu 95 % keinen Einfluss auf die Standsicherheit.

Im Folgenden sind alle aufgetretenen Schäden (44.338) im Hinblick auf die Schadensbewertung in tabellarischer Form für die einzelnen Merkmale Standsicherheit (siehe Tabelle 2) Dauerhaftigkeit (siehe Tabelle 3) und Verkehrssicherheit (siehe Tabelle 4) zusammengestellt. Die farbige Unterteilung nach dem Ampelsystem verdeutlicht dabei die Relevanz bzw. den Schweregrad des Einzelschadens. Darüber hinaus gibt die Verteilung von relevanten Schäden (Bewertungszahl  $\geq 2$ ) Aufschluss darüber, welche Bauwerkselemente besonders betroffen sind.

Etwa die Hälfte von standsicherheitsrelevanten Schäden ( $\geq 2$ ) entfallen auf den Brückenüberbau. Die übrigen Schäden teilen sich in etwa gleichmäßig auf die Bauwerkselemente Unterbau, Lagerung und Ausrüstung auf (s. Bild 63).

Auch für das Merkmal Dauerhaftigkeit sind die meisten relevanten Schäden ( $\geq 2$ ) am Überbau dokumentiert (ca. 45 %). Für die Brückenausrüstung (ca. 33 %) und den Unterbau (20 %) ist ein deutlicher Anteil von relevanten Schäden zu verzeichnen. Schäden an der Lagerung sind hingegen nur in 2 % der Fälle als relevant für die Dauerhaftigkeit einzustufen (s. Bild 64).

#### Relevante Schäden für die Standsicherheit:

Schadensbewertung (S)	Anzahl der Schäden am Überbau	Anzahl der Schäden am Unterbau	Anzahl der Schäden an der Lagerung	Anzahl der Schäden an der Ausrüstung
0	16.029 (94,2 %)	9.174 (95,1 %)	908 (84,6 %)	14.851 (94,8 %)
1	920 (5,4 %)	443 (4,6 %)	144 (13,4 %)	797 (5,1 %)
2	65 (0,4 %)	28 (0,3 %)	19 (1,8 %)	24 (0,2 %)
3	7 (0 %)	0 (0 %)	2 (0,2 %)	0 (0 %)
4	1 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)

Tab. 2: Schadensbewertung aller Schäden für die Standsicherheit

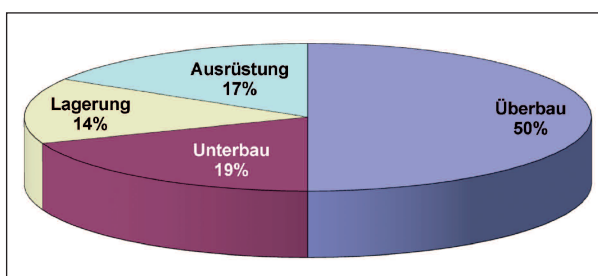


Bild 63: Verteilung der relevanten Schäden (Bewertung  $\geq 2$ ) für die Standsicherheit (Grundlage: 146 Schäden)

#### Relevante Schäden für die Dauerhaftigkeit:

Schadensbewertung (D)	Anzahl der Schäden am Überbau	Anzahl der Schäden am Unterbau	Anzahl der Schäden an der Lagerung	Anzahl der Schäden an der Ausrüstung
0	414 (2,4 %)	1.185 (12,3 %)	108 (10,1 %)	4.555 (29,1 %)
1	8.463 (49,7 %)	4.677 (48,5 %)	536 (50 %)	4.939 (31,5 %)
2	7.828 (46 %)	3.577 (37,1 %)	388 (36,2 %)	5.889 (37,6 %)
3	316 (1,9 %)	206 (2,1 %)	41 (3,8 %)	288 (1,8 %)
4	1 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	1 (0 %)

Tab. 3: Schadensbewertung aller Schäden für die Dauerhaftigkeit

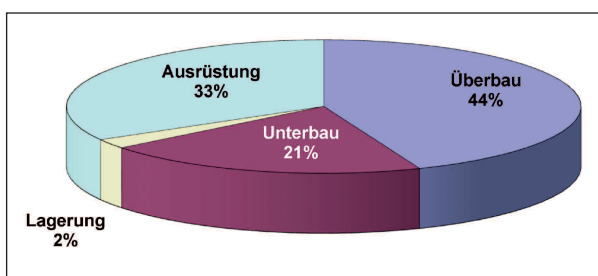
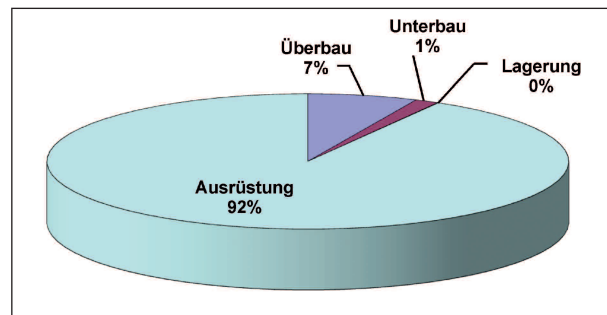


Bild 64: Verteilung der relevanten Schäden (Bewertung  $\geq 2$ ) für die Dauerhaftigkeit (Grundlage: 18.535 Schäden)

**Relevante Schäden für die Verkehrssicherheit:**

Schadens- bewertung (V)	Anzahl der Schäden am Überbau	Anzahl der Schäden am Unterbau	Anzahl der Schäden an der Lagerung	Anzahl der Schäden an der Ausrüstung
0	15.479 (90,9 %)	9.456 (98 %)	1.068 (99,5 %)	9.268 (59,1 %)
1	1.317 (7,7 %)	140 (1,5 %)	3 (0,3 %)	3.366 (21,5 %)
2	210 (1,2 %)	39 (0,4 %)	2 (0,2 %)	2.802 (17,9 %)
3	16 (0,1 %)	10 (0,1 %)	0 (0 %)	235 (1,5 %)
4	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	1 (0 %)

**Tab. 4:** Schadensbewertung aller Schäden für die Verkehrssicherheit



**Bild 65:** Verteilung der relevanten Schäden (Bewertung  $\geq 2$ ) für die Verkehrssicherheit (Grundlage: 3.315 Schäden)

Relevante Schäden im Hinblick auf die Verkehrs-sicherheit sind zum überwiegenden Anteil (92 %) an der Brückenausrüstung dokumentiert. Die Lagerung und der Unterbau haben nahezu keine Relevanz für das Merkmal Verkehrssicherheit (s. Bild 65).

### 3 Schadensursachen

#### 3.1 Entwicklung der Bemessungs- und Konstruktionsgrundsätze

Eine ganzheitliche Bewertung von Schäden und deren Ursachen erfordert detaillierte Kenntnisse über die chronologische Entwicklung von Vorschriften und Normen für den Bau von Brücken aus (Stahl-)Beton und Spannbeton. Im Folgenden wird dazu eine Zusammenfassung mit den wichtigsten Änderungen der Vorschriften auf Grundlage abgeschlossener und derzeitiger Untersuchungsergebnisse gegeben. Detaillierte Abhandlungen zu den einzelnen Vorschriften und Normen sind der entsprechender Literatur (u. a. [Fing08, BuBr11, ScPS10]) zu entnehmen.

Mit Einführung der DIN 1075 „Berechnungsgrundlagen für massive Brücken“ wurde im Jahr 1930 die erste Berechnungsgrundlage für Brücken in Deutschland geschaffen. Mit dem Ausbau des deutschen Fernstraßennetzes nach dem zweiten Weltkrieg wurde insbesondere die Spannbetonbauweise intensiv vorangetrieben und setzte sich schnell gegenüber anderen Bauweisen durch. Bereits 1953 stand mit der DIN 4227 „Spannbeton – Richtlinie für

Bemessung und Ausführung“ ein technisches Regelwerk zur Bemessung der Spannbetonbauweise zur Verfügung. Infolge der noch neuen Bauweise ergaben sich jedoch anfängliche Schwachstellen und negative Erfahrungen in der Praxis. Die entsprechenden Regelwerke für die Bemessung und Ausführung mussten im Laufe der Zeit immer wieder an die neuen Erkenntnisse angepasst werden, um zum einen Schwachstellen zu vermeiden und zum anderen die Fortschritte auf der Materialseite zu berücksichtigen. Darüber hinaus mussten auch die Vorschriften und Regelungen für Einwirkungen auf Brücken, insbesondere die Einwirkungen infolge Verkehrs, entsprechend der stetig steigenden Anforderungen und neuen Gegebenheiten angepasst werden.

##### 3.1.1 Einwirkungen aus Verkehr

Neben den Lastansätzen für das Konstruktionseingewicht, die Bestandteil der DIN 1055 sind (mit Ausnahme der DIN 1072 von 1952), wurden mit der Einführung der DIN 1072 vertikale Verkehrslasten explizit für Brückenbauwerke geregelt.

Im Laufe der Zeit wurden diese überarbeitet und an die neuen Anforderungen angepasst. Im Folgenden ist eine Zusammenfassung der chronologischen Entwicklung der Lastmodelle für Brückenbauwerke gegeben:

**1924: DIN 1072:24** (Bild 66)

7 t, 16 t, 23 t Dampfwalze;

6 t, 9t, Lastkraftwagen.



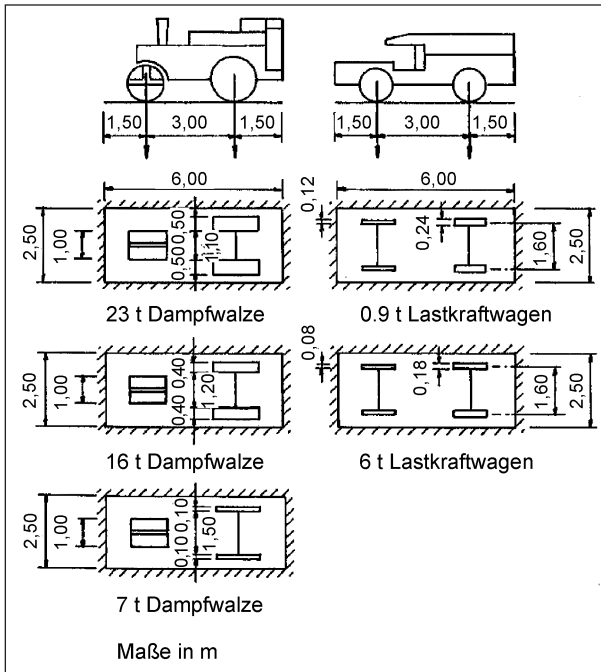


Bild 66: Lastmodell nach DIN 1072 von 1924

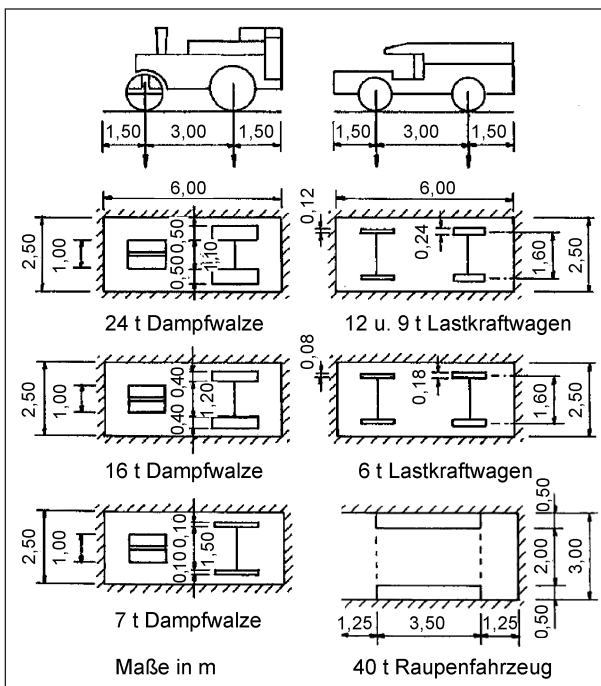


Bild 67: Lastmodell nach DIN 1072 von 1941

**1941: DIN 1072:41** (Bild 67)

7 t, 16 t, 24 t Dampfwalze;  
6 t, 9t, 12t Lastkraftwagen;  
40 t Raupenfahrzeug.

**1952: DIN 1072:52** (Bild 68)

BK 3, BK 6, BK 12 für Gemeinde- und Wirtschaftswege;

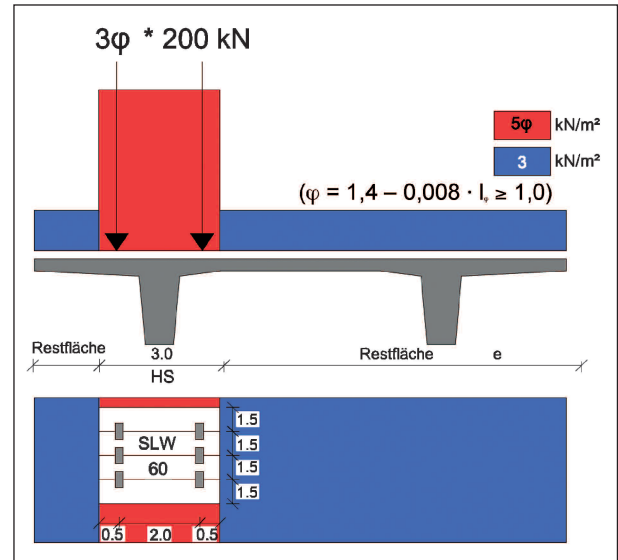


Bild 68: Lastmodell für SLW 60 nach DIN 1072 von 1952 bis 1985

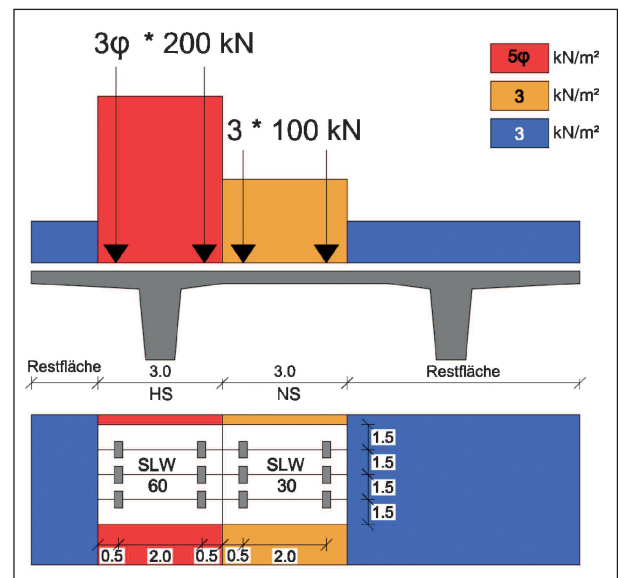


Bild 69: Lastmodell für SLW 60/30 nach DIN 1072 von 1985

BK 30 für Landstraßen II. Ordnung;  
BK 45 für Landstraßen I. Ordnung;  
BK 60 für Autobahnen und Reichsstraßen.

**1967: DIN 1072:67**

BK 12 für Wirtschaftswege mit leichtem Verkehr;  
BK 30 für Kreis- und Stadtstraßen, Hauptwirtschafts- und Gemeindegewege;  
BK 60 für Bundesfern-, Landes- und Stadtstraßen.

**1982: ARS 9/1982-03 bzw. 1985: DIN 1072:85** (Bild 69)

BK 30/30 für Kreis- und Stadtstraßen, Gemeinde- und Wirtschaftswege;

BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- und Stadtstraßen.

### 2003: DIN-Fachbericht 101:03 (Bild 70)

LM 1 Einzellasten und gleichmäßig verteilte Lasten;

LM 2 Einzelachse;

LM 3 Ermüdungslastmodell;

LM 4 Menschengedränge.

### 2011: E DIN EN 1991-2 NA (Bild 71)

Erhöhung der Einzellasten, gleichmäßig verteilten Lasten und Achslasten im Vergleich zum DIN-Fachbericht 101.

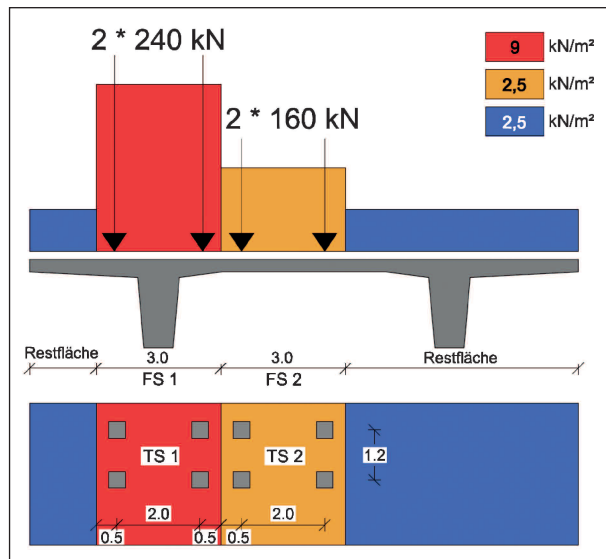


Bild 70: Lastmodell LM1 nach DIN-Fachbericht 101 von 2003

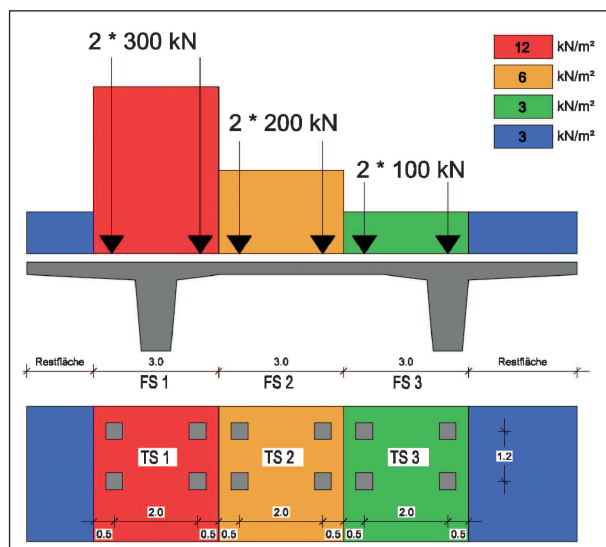


Bild 71: Lastmodell LMM nach DIN EN 1991-2 von 2011

### 3.1.2 Koppelfugen

Mit dem Einsatz von feldweise selbsttragenden Vorschubrüstungen, die erstmals 1959 bei der Kettiger Hangbrücke bei Andernach angewendet wurde, konnten einzelne Felder einer Brücke abschnittsweise vorgespannt und über Koppelstellen verbunden werden. Gemäß den seinerzeit gültigen Regelwerken war es zulässig, alle Spannglieder in den Abschnittsfugen zu verankern oder zu koppeln. Entsprechend der in den folgenden Jahren gewonnenen Erkenntnisse wurden die Regelwerke immer wieder angepasst und erweitert:

#### 1966: ZB DIN 4227

Eine Mindestbewehrung für wenig überdrückte Bereiche wurde eingeführt.

#### 1977: Soforterlass 02.77

Für den Ermüdungsnachweis von Spanngliedkoppelungen wurde ein linearer Temperaturgradient eingeführt; erhöhte Verluste, infolge Kriechen und Schwinden des Betons waren zu berücksichtigen; die Mindestlängsbewehrung in der Koppelfuge wurde deutlich erhöht.

#### 1979: DIN 4227

Die Festlegungen des Soforterlasses 02.77 wurden in die Norm übernommen.

#### 1980: ZTV-K 80

Mit Einführung der ZTV-K 80 (Zusätzliche Technische Vorschriften für Kunstbauten) wurde festgeschrieben, dass mindestens 30 % der Spannglieder, unabhängig vom Brückenquerschnitt, ungekoppelt durchgeführt werden müssen.

### 3.1.3 Spannungsrissskorrosion (SpRK)

Die Problematik der Spannungsrissskorrosion (SpRK) wurde erst in den 1990er Jahren aufgrund einiger Schadensfälle erkannt. Dank des 1978 eingeführten Prüfverfahrens wurden jedoch spannungsrissskorrosionsempfindliche Spannstähle in Westdeutschland ab 1978 nicht mehr verwendet. In der DDR kamen solche SpRK-gefährdeten Spannstähle hingegen teilweise bis 1990 zum Einsatz.

#### 1978: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)

Zur Identifizierung der Spannungsrissskorrosionsgefahr bei der Herstellung von Spannstählen wurde ein einheitliches Prüfverfahren vom DIBt eingeführt.

**1993: Bundesministerium für Verkehr (BMV)**

Das BMV veröffentlichte die „Empfehlungen zur Überprüfung und Beurteilung von Brückenbauwerken, die mit vergütetem Spannstahl St 145/160 Neptun N40 bis 1965 erstellt wurden“.

**1995: Änderung A1 zur DIN 4227-1**

Um ein Ankündungsverhalten durch Rissbildung bei möglichem Ausfall der Spannglieder sicherzustellen, wurde eine Mindestbewehrung vorgeschrieben.

**3.1.4 Schubtragfähigkeit**

Bis etwa Mitte der 60er Jahre musste der Nachweis der Schubtragfähigkeit erst bei Überschreitung eines definierten Grenzwertes der Hauptzugspannungen geführt werden. Diese Regelung führte in Einzelfällen zu einem deutlichen Defizit hinsichtlich der Querkrafttragfähigkeit. Die Gefahr wurde seinerzeit erkannt und mit neuen Regelungen behoben. Im Laufe der Zeit wurden die Regelwerke immer weiter an die neuen Erkenntnisse angepasst und erweitert:

**1953: DIN 4227**

Die Berechnung der Schubbewehrung erfolgte erst bei Überschreitung eines festgelegten Grenzwertes der Hauptzugspannungen unter rechnerischer Bruchlast (Zustand I); eine Mindestbewehrung für Balken wurde gefordert, jedoch nicht genau definiert.

**1966: Zusätzliche Bestimmungen zu DIN 4227**

Ein grundsätzlicher Nachweis der Schubbewehrung auf Grundlage der Hauptzugspannungen im Zustand I wurde eingeführt. Es wurden verbindliche Werte für die Mindestquerkraftbewehrung zur Verhinderung eines Schubbruchs ohne Vorankündigung definiert.

**1972: DAfStb-Richtlinie „Bemessung und Ausführung von Spannbetonbauteilen unter Berücksichtigung von DIN 1045:1972-01“**

Die Bemessung der Schubbewehrung für Spannbetontragwerke erfolgte auf der Grundlage der klassischen Fachwerkanalogie mit einer definierten Neigung der Zugstreben zwischen 90° (Bügel) und 45° (Schrägstäbe, Schrägbügel).

**1979: DIN 4227**

Im Zuge der erweiterten Fachwerkanalogie wurde eine veränderliche Neigung der Druckstrebe eingeführt.

**2003: ARS 11/2003**

Für den Druckstrebenneigungswinkel wurde ein Mindestwert von 29,7° festgelegt.

**3.1.5 Temperatur**

Aus den täglich und jahreszeitlich veränderlichen Witterungsbedingungen ergeben sich für den Nutzungszeitraum einer Brücke wesentliche Temperaturbeanspruchungen. Jedoch wurden bei älteren Brücken die Auswirkungen eines Temperaturgradienten, also die stärkere Erwärmung der Bauteiloberseite im Vergleich zur Unterseite nicht berücksichtigt. Im Folgenden sind die maßgebenden Anpassungen der Normen im Hinblick auf die Temperaturbeanspruchung dargestellt:

**1953: DIN 4227**

Es wurden nur Spannungen infolge Temperaturänderungen und nicht infolge eines Temperaturgradienten berücksichtigt.

**1979: DIN 4227-1**

Zur Berücksichtigung von Spannungen infolge einer Erwärmung der Oberseite gegenüber der Unterseite wurde ein linearer Temperaturgradient eingeführt.

**1985: DIN 1072**

Der lineare Temperaturgradient, der 1979 eingeführt wurde, musste neu angepasst bzw. korrigiert werden.

**2001: DIN FB 101**

Es wurden neue Einstufungen des Temperaturgradienten in verschiedene Gruppen von Brückenüberbauten mit Berücksichtigung der jeweiligen Belagstärke vorgenommen.

**3.1.6 Mindestbewehrung/  
Rissbreitenbegrenzung**

Bereits 1953 wurde erstmal eine Mindestbewehrung, jedoch nur für ohne Verbund vorgespannte Bauteile vorgesehen. Die weitere Entwicklung zur

Berücksichtigung von Mindestbewehrung und zur Begrenzung der Rissbreiten wird nachfolgend zusammengefasst:

**1966: ZB DIN 4227**

Erstmals wurde eine Mindestbewehrung für alle Spannbetonbauteile gefordert.

**1969: ZB DIN 4227**

Der Grundwert für die erforderliche Mindestbewehrung wurde angehoben. Eine Empfehlung zur Verwendung von Betonrippenstahl anstelle von Betonglattstahl wurde ausgesprochen.

**1972: DIN 1045**

Eine Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreiten unter Gebrauchslasten wurde eingeführt.

**1988: DIN 4227**

Der 1972 eingeführte Grundwert für die Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreiten wurde deutlich angehoben (jedoch relativ pauschal in Abhängigkeit der Betonfestigkeit und Bauteilabmessungen).

**1990: ARS Nr. 10/1990**

Ein genauerer Nachweis zur Begrenzung der Rissbreiten auf Grundlage der Zugkraftdeckung nach Zustand I wurde eingeführt.

**1995: Änderung A1 zur DIN 4227-1**

Der Nachweis zur Begrenzung der Rissbreiten aus der ARS 10/1990 wurde leicht modifiziert und in die Norm aufgenommen.

**2001: DIN FB 102  
(Nachweis gemäß DIN 1045-1:2001)**

Mindestanforderungsklassen in Abhängigkeit der Expositionsklassen wurden eingeführt. Die Mindestbewehrung wurde in Abhängigkeit der Betonzugspannung und der Betonzugfestigkeit oder durch Begrenzung des Stabdurchmessers festgelegt. Zur Begrenzung der Rissbreite wurden die Nachweise mit oder ohne direkte Berechnung eingeführt.

**2009: DIN FB 102  
(Nachweis gemäß DIN 1045-1:2008)**

Die Nachweise zur Ermittlung der Mindestbewehrung sind für Steg- und Gurtbereiche sowohl bei Hohlkastenbrücken als auch bei Plattenbalkenbrücken getrennt zu führen. Der Mindestwert für den Stabdurchmesser der Bewehrung wurde auf 10 mm angehoben; der Höchstwert für den Stababstand wurde auf 200 mm begrenzt.

**3.1.7 Dauerhaftigkeit/Chloride**

**1979: DIN 4227/DIN 18553**

Aufgrund unzureichend verpresster Hüllrohre, z. B. durch mangelhafte Qualität der Bauausführung oder Unterbrechungen der Verpressarbeiten, geht eine erhebliche Korrosionsgefahr für den Spannstahl aus.

Mit Einführung der überarbeiteten Spannbetonnorm DIN 4227 im Jahr 1979 wurden im Teil 5 „Spannbeton; Einpressen von Zementmörtel in Spannkäme“, sowie mit dem Verweis auf den Entwurf der DIN 18553 „Hüllrohre für Spannglieder“ genaue Anweisungen und Bedingungen für das Verpressen von Hüllrohren auf der Baustelle festgelegt.

**1980: ZTV-K 80**

Infolge von Rissbildung oder Undichtigkeiten können Chloride bis zur Bewehrung gelangen und die passivierende Deckschicht der Betonstahlbewehrung zerstören. Infolge des Ionenflusses kommt es dann zur Bewehrungskorrosion.

Mit Einführung der ZTV-K 80 wurden wesentliche Verbesserungen zur Vermeidung von Dauerhaftigkeitsschäden, insbesondere durch höhere Anforderungen an die Betondeckung, festgeschrieben.

**3.2 Ursachen von Schäden**

Schäden an Brücken aus Stahl- und Spannbeton können eine Vielzahl unterschiedlicher Ursachen zugrunde liegen. In den meisten Fällen gibt es für einen Schaden mehrere Ursachen, sodass eine nachträgliche Ursachenfeststellung oft sehr schwierig ist und stets einer individuellen Untersuchung bedarf. Die Schadensbewertung und die Analyse der Schadensursachen erfordern eine detaillierte und systematische Herangehensweise,

sowie die Kenntnis aller möglichen Ursachen. Die aufgetretenen bzw. relevanten Schäden können dazu im Hinblick auf ihre Schadensursachen in folgende Gruppen eingeordnet werden:

- Schäden infolge Planungs- und Entwurfsfehlern,
- Schäden infolge Ausführungsfehlern,
- Schäden infolge äußerer Einwirkungen.

Neben den drei dargestellten Gruppen ergeben sich auch infolge der teilweise unvollständigen Vorschriften sowie der fehlenden Erkenntnisse in den Anfängen des Spannbetonbaus Schäden, die den einzelnen Gruppen zugeordnet werden können. Für die weiteren Auswertungen werden die jeweils maßgebenden Schadensursachen benannt und ausgewertet. Das Ziel der Schadensanalyse ist es, relevante Einwirkungen und anfällige Konstruktionen bzw. Bauteile zu identifizieren (siehe Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3) und die Schäden im Hinblick auf ihre Vermeidbarkeit zu beurteilen:

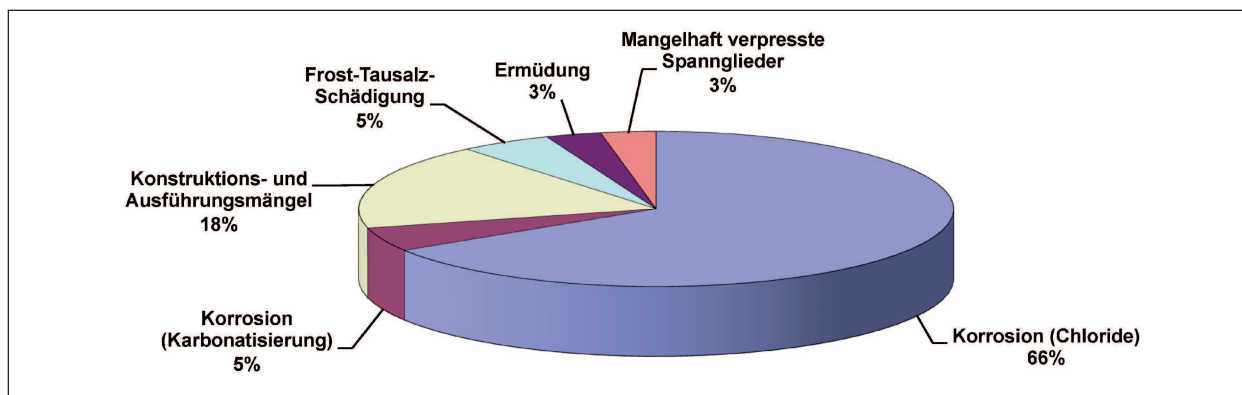
- unvermeidbare Schäden
  - a. da nach damaligem Stand der Technik der Schadenseintritt nicht vorherzusehen war,
  - b. durch unvorhersehbare Beanspruchungsänderungen (übermäßige Verkehrszunahme, unvorhersehbare Steigerung der Fahrzeuggewichte, Überlasten, ...),
  - c. aufgrund von Verschleiß, Abnutzung, natürlicher Alterung, usw.
- teilweise vermeidbare Schäden
  - a. durch Fehler in der Planung und dem Entwurf (Statik, Konstruktionsdetails, Auswahl von Baustoffen, usw.),

- b. durch Fehler in der Bauausführung,
- c. infolge ungenügender Überwachung und Prüfung,
- d. infolge mangelhafter Erhaltung (Unterhaltung, Instandsetzung, Erneuerung).

Die Schadensauswertung, insbesondere die Aufbereitung der Schadensbewertungen zeigt, dass die auftretenden Schäden größtenteils die Dauerhaftigkeit von Massivbrücken beeinträchtigen. Werden diese dauerhaftigkeitsrelevanten Schäden jedoch nicht zeitnah und angemessen behoben, können sie langfristig die Tragfähigkeit der Brücke verringern oder gefährden. Das Diagramm (Bild 72) nach [ScMa07] zeigt die Verteilung der Schadensursachen an Betonoberflächen von Massivbrücken. Über 70 % der Schäden sind demnach auf die Korrosion der Bewehrung zurückzuführen. Ca. 18 % der aufgetretenen Schäden entstehen durch Fehler in der Konstruktion und der Bauausführung. Es ist jedoch anzumerken, dass im vorliegenden Diagramm keine Hierarchie von Schadensursachen und deren Auswirkungen berücksichtigt wurde. So können die aufgeführten Schadensursachen, wie mangelhaft verpresste Hüllrohre, Frost-Tausalz-Schädigung, Konstruktions- und Ausführungsmängel wiederum zur Korrosionsschäden führen.

### 3.2.1 Schäden infolge Planungs- und Entwurfsfehlern

Planungs- und Entwurfsfehler lassen sich im Wesentlichen in zwei Kategorien einteilen. Schäden können zum einen aufgrund von Fehlern in der Tragwerksplanung (Statik) und zum anderen aufgrund von Fehlern in der konstruktiven Ausbildung auftreten. Zu den Fehlern werden im Folgenden auch diejenigen gezählt, die sich aus Defiziten in



**Bild 72:** Verteilung der Schadensursachen an Betonoberflächen von Brückenbauwerken im deutschen Autobahnnetz nach [ScMa07]



den damaligen Vorschriften und Normen ergeben oder auf die fehlenden Erkenntnisse und Erfahrungen zurückzuführen sind. Die häufigsten Fehler, die sich bei der Erstellung der Statik ergeben und in der Vergangenheit bereits zu Schäden geführt haben sind:

- falsche Beurteilung des tatsächlichen Tragverhaltens,
- fehlerhafte oder unvollständige Ermittlung der Beanspruchungen, z. B.:
  - falsche Ansätze der Laststellungen,
  - falscher Ansatz der Querverteilung von Lasten,
  - fehlerhaft ermittelte mitwirkende Plattenbreite,
  - unberücksichtigte Temperatur und keine Temperaturgradienten,
  - unberücksichtigte Setzungen,
- falsche Erfassung des Spannungszustandes,
- unberücksichtigte Querkräfte aus Vorspannung,
- Nichtberücksichtigung der Profilverformungen bei Hohlkästen,
- Nichtberücksichtigung der Querauskragung über Brückenpfeilern,
- unzureichende Querbewehrung (Biegung),
- unzureichende Ausbildung der Koppelfugen (geringe Bewehrung),
- Defizite beim Querkraftnachweis,
- unzureichende Quervorspannung.

Neben den statischen Defiziten ergaben sich in der Vergangenheit auch Schäden infolge von Entwurfsfehlern und konstruktiven Mängeln:

- ungeeignete Wahl der Spanngliedführung, z. B.:
  - Spannglieder, die von der Höchstlage über der Stütze über einen langen Bereich nach unten ins Feld geführt werden und dadurch große Biegemomente hervorrufen, die zu relevanten Biegezugspannungen an der Unterseite der Hauptträger führen können,
- zu filigran ausgebildete Querschnitte (zu geringe Bauteilabmessungen) besonders bei Bodenplatten von Hohlkastenquerschnitten,

- zu geringe Betondeckung, besonders bei dünnen Bauwerksteilen (z. B. Bodenplatten),
- zu enge Bewehrungsanordnungen, die einen ordnungsgemäßen Betoniervorgang behindern,
- zu gering dimensionierte Anschlussbewehrung,
- falsche Lage von verwendeten Hohl- bzw. Verdrängungskörpern,
- Verwendung von alkaliempfindlicher Gesteinskörnung, die zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) insbesondere bei Brückenunterbauten geführt hat,
- Fehler bei der Ausbildung von Anschlussdetails, z. B.:
  - Undichtigkeiten bei der Fahrbahnabdichtung,
  - Undichtigkeiten im Bereich von Fahrbahnübergängen,
  - ungeeignete Anordnung von Entwässerungen und schlechte Entwässerungsführung.

Explizite Schäden, die auf Fehler und Defizite bei der Planung und dem Entwurf von Brücken zurückzuführen sind, werden in den folgenden Kapiteln bezüglich schädigungsrelevanter Einwirkungen und relevanter Konstruktionen bzw. Bauweisen dargestellt (Kapitel 4).

### 3.2.2 Schäden infolge Ausführungsfehlern

Im Bericht zur „Erfassung und Auswertung der Ausführungsqualität von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken an Bundesfernstraßen“ [Gulv00], der in Zusammenarbeit der BAST und des IfM entstand, wurden typische Fehler bzw. Mängel bei der Ausführung von Brücken aufbereitet, die im Folgenden zusammengefasst sind:

- Herstellen der Schalung
  - zu geringe Betondeckung,
  - undichte Schalung,
  - verschmutzte Schalung,
  - unzureichende Vornässung.
- Verarbeitung des Betons
  - unzureichendes Vornässen des alten Betons an Arbeitsfugen,
  - mangelhafte Verdichtung des Betons,



- nachträgliche Wasserzugabe zum Beton,
  - zu große Fallhöhe des Betons, kann zur Entmischung führen.
  - Verlegen der Bewehrung aus Betonstahl und Spannstahl
    - falsche Bewehrungsanordnung (Betonstahl sowie Spannstahl),
    - Schmutz- und Wasseranhaftungen,
    - Einbau verbogener Bewehrung,
    - keine ausreichenden Rüttel- und Füllgassen,
    - nicht lagegerechte Bewehrung,
    - unzulässige Bearbeitung von Anschlussbewehrung,
    - Einbau von beschädigten Hüllrohren (eingedrückt, unzureichend abgedichtet),
    - fehlende Kennzeichnung von Entlüftungsschläuchen,
    - kein ausreichender Platz zum Pressenanatz für das Aufbringen der Vorspannkraft,
    - Einbau von zum Teil korrodierten Spannstählen.
  - Ausschalen, Nachbehandeln des Betons
    - unzureichende Nachbehandlung des Betons,
    - kein Entfernen von Schalungsresten.
  - Vorspann- und Einpressarbeiten
    - nicht vorgespannte Spannglieder,
    - unzureichend bzw. nicht verpresste Hüllrohre,
    - keine Überprüfung des Fließvermögens am Austrittsende.
  - Fehlerhafte oder ungenügende Bauteilabdichtungen.
- Nach [Gulv00] lassen sich die festgestellten Mängel in der Ausführung im Wesentlichen auf folgende Ursachen zurückführen:
- mangelhafte Qualität der Ausführungspläne, z. B.:
    - keine Angaben zu Rüttel- und Füllgassen,
    - keine Darstellung von Spanngliedverankerungen,
    - nicht eindeutige Darstellung von Bereichen mit komplexer Bewehrungs- oder Spanngliedführung,
  - mangelnde Arbeitsvorbereitung,
  - mangelndes Qualitätsbewusstsein bei den Beteiligten,
  - mangelndes Qualitätsbewusstsein bei der Bauüberwachung.
- Neben den aufgelisteten Mängeln und deren Ursachen gibt es typische zeitgemäße Fehler bei der Bauausführung. Diese sind zumeist auf die damals unzureichenden Vorschriften und Regelungen, sowie die fehlenden Erkenntnisse und Erfahrungen zurückzuführen. Dieser Umstand wird besonders bei vorgespannten Brücken mit Baubeginn anfang der 60er Jahre deutlich. Nach damaliger Auffassung sollten sich keine gravierenden Folgen durch unvollständig verpresste Hüllrohre ergeben, sodass den Verpressarbeiten auf der Baustelle wenig Beachtung geschenkt wurde [GeKo83]. Insgesamt sind vermehrt an Brücken mit einem Baubeginn zwischen 1960 und 1980 Schäden aufgetreten, die auf Ausführungsfehler zurückzuführen sind.
- Neueste Untersuchungen zur Ausführungsqualität von Stahlbeton und Spannbetonbrücken am IfM aus dem Jahr 2011 [siehe ScWi11] zeigen, dass ein Rückgang von Ausführungsmängeln im Vergleich zu den Untersuchungen im Jahr 2000 [Gulv00] festgestellt wurde. Insbesondere der Anteil von „schweren“ Mängeln ist im Vergleich zur früheren Untersuchung rückläufig.
- ### 3.2.3 Schäden infolge Einwirkungen
- Brückenbauwerke sind einer Vielzahl von unterschiedlichen Einwirkungen ausgesetzt. Nach [Keus07] werden die wesentlichen Einwirkungen für Brücken nach ihrer Entstehung unterschieden in:
- Einwirkungen aus dem Bauwerk
    - Eigenlast,
    - Vorspannung,
    - kriechen, Schwinden.
  - Einwirkungen aus der Bauwerksnutzung
    - ständige Einwirkungen (Lasten aus festen Einbauten wie Fahrbahnbelag, Abdichtung, Geländer, Entwässerung, Energieversorgung, usw.),
    - veränderliche Einwirkungen (Lasten aus Verkehr, Einsatz von Taumittel/Tausalz, usw.),

- außergewöhnliche Einwirkungen (Anpralllasten, außergewöhnliche Fahrzeuglasten usw.).
- Einwirkungen aus der Bauwerks Umgebung
  - Temperatur (Erwärmung, Frost-Tau-Wechsel usw.),
  - Setzungen,
  - Wind- und Schneelasten,
  - Umwelteinflüsse (CO<sub>2</sub>, Wasser, UV-Strahlung, usw.),
  - Extremereignisse (Erdbeben, Hochwasser, Hangrutschungen, Explosionen, usw.).

Die Auflistung dient im Folgenden jedoch lediglich als Grundlage weiterer Untersuchungen, da zum einen einige Einwirkungen nicht eindeutig zuzuordnen sind (z. B. können Kriechen und Relaxation auch den ständigen Einwirkungen aus der Bauwerksnutzung zugewiesen werden) und zum anderen viele Schäden infolge der Kombination mehrerer Einwirkungen auftreten.

## 4 Schädigungspotenziale

Die Beurteilung des Bauwerkszustandes und die Bewertung der Zuverlässigkeit von Bauwerksteilen und des Gesamtbauwerks erfordern grundlegende Kenntnisse des aktuellen Bauwerkszustandes sowie der zukünftigen Entwicklungen. Die Grundlagen zur Beurteilung des Bauwerkszustan-

des bilden einerseits die Bewertung des Schädigungspotenzials von Einwirkungen aus Verkehr, Betrieb und Umwelt und andererseits die Kenntnisse von maßgeblichen Eigenschaften der Bauwerke und ihrer Bauteile und das daraus resultierende Schädigungspotenzial der Widerstandsseite. Mit der Bewertung von Schädigungspotenzialen soll das Risiko beschrieben werden, das von einer bestimmten Einwirkung oder einem bestimmten Bauteil bzw. der Kombination von beiden ausgeht. Das Risiko (Schädigungspotenzial) lässt sich allgemein als Produkt der Auftretenswahrscheinlichkeit mit dem Schadensausmaß (Konsequenz eines Schadens) darstellen (vgl. [ZiSD11]). Die Bewertung des Risikos kann dabei mithilfe einer Bewertungsmatrix erfolgen (Bild 73). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein definierter Schaden eintritt, wird dabei der Konsequenz des Schadens gegenübergestellt. Für geringe Eintrittswahrscheinlichkeiten in Kombination mit geringen Schadenskonsequenzen ergibt sich so ein akzeptables Risiko, für hohe Eintrittswahrscheinlichkeiten in Kombination mit großen Schadensausmaßen ergibt sich ein nicht akzeptables Risiko.

Die Beurteilung von relevanten Einwirkungen sowie die Bewertung des Schädigungspotenzials von unterschiedlichen Bauwerkstypen und Konstruktionen sollen im Rahmen des Projektes „Intelligente Bauwerke“ als Wissensbasis bei der Erarbeitung eines zuverlässigkeitsbasierten Erhaltungsmanagements dienen (siehe Kapitel 4.4). Der Begriff des Schädigungspotenzials kann in

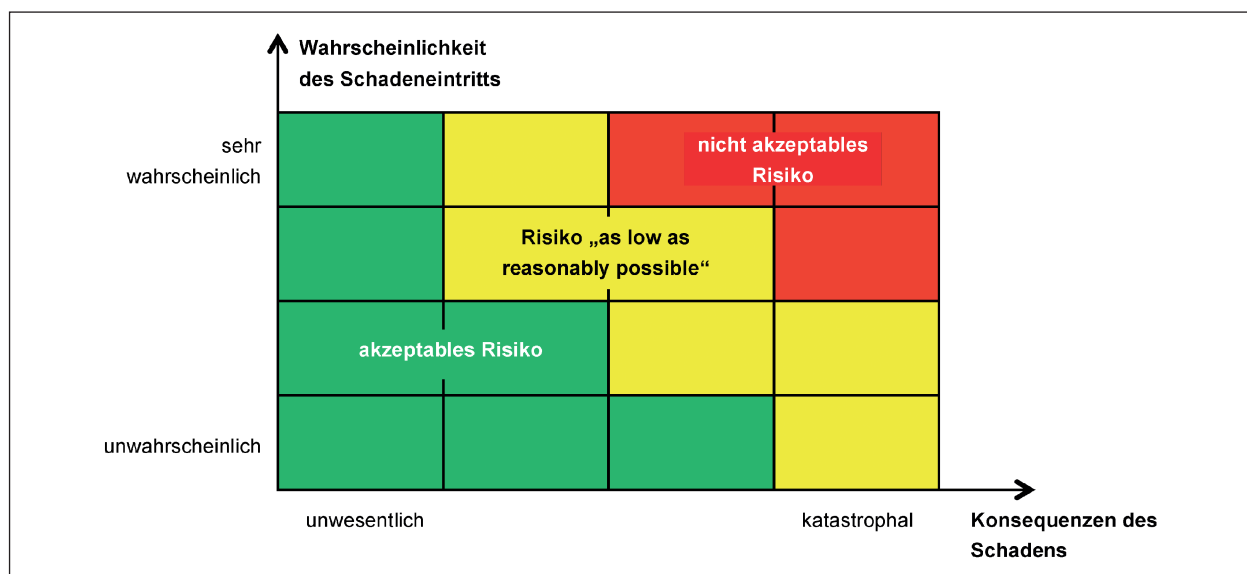


Bild 73: Risikomatrix

diesem Zusammenhang in drei Stufen definiert werden:

### Stufe 1

Die erste Stufe der Definition des Schädigungspotenzials beschreibt die Auftretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Schadens. Dabei stellt sich die Frage, ob eine Schädigung unter definierten Randbedingungen überhaupt eintreten kann, bzw. wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Schaden unter definierten Randbedingungen eintritt.

### Stufe 2

Die zweite Stufe des Schädigungspotenzials beschreibt das Schadensausmaß bzw. das Schadensniveau eines aufgetretenen Schadens. Zur Bewertung des Schadensausmaßes gibt es in der Literatur bereits verschiedene Ansätze (u. a.: [BMV82] und [BMV94], [KöMZ86], [ScMa07]).

### Stufe 3

Die letzte Stufe der Definition beschreibt die Auswirkungen der aufgetretenen Schäden. Dabei werden sowohl die Einflüsse der Schädigung auf andere Bauteile und auf das globale Verhalten des Bauwerks (Objektebene), als auch die möglichen Wechselwirkungen mit anderen Schäden beschrieben.

Da die Bewertung von Schädigungspotenzialen im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens maßgeblich auf Grundlage der Auswertung von tatsächlich aufgetretenen Schäden erfolgen soll, wird die zuvor beschriebene Vorgehensweise an diese vordefinierten Randbedingungen angepasst. Die Bewertung der Schädigungsrelevanz erfolgt zudem getrennt für die Einwirkungsseite und die Widerstandsseite. Die sich daraus ergebenden Vorgehensweisen bei der Bewertung von Einwirkungen und Widerständen werden im folgenden Kapitel explizit dargestellt.

## 4.1 Bewertungsgrundlage von Schädigungspotenzialen

### Widerstandsseite

Die Bewertung der Schädigungspotenziale von Bauteilen und Konstruktionen (Widerstandsseite) erfolgt maßgeblich auf Grundlage der Ergebnisse der

Auswertung tatsächlich aufgetretener Schäden (vgl. Kapitel 2.2). Dabei wird die im vorherigen Kapitel beschriebene Definition des Risikos als Produkt der Auftretenswahrscheinlichkeit mit dem Schadensausmaß (Konsequenz eines Schadens) entsprechend angepasst. Zum einen kann die Auftretenswahrscheinlichkeit durch die tatsächliche Auftretenshäufigkeit der Schäden konkret beschrieben werden, zum anderen wird das Schadensausmaß durch die Auswertung der S/D/V Bewertungszahlen nach RI-EBW-PRÜF für die Merkmale Standsicherheit (S), Dauerhaftigkeit (D) und Verkehrssicherheit (V), die jedem Schaden zugeordnet sind, ausgedrückt. Aus der Datenbank werden zur Beurteilung des Schädigungspotenzials diejenigen Schäden berücksichtigt, denen eine Bewertungszahl  $\geq 2$  zugeordnet ist. Da die Ergebnisse der Auswertung abschließend in Form eines Handbuchs aufbereitet werden, müssen die relevanten Schäden in Abhängigkeit der definierten Anforderungen für jede Bauwerksart ausgewertet werden (vgl. Kapitel 4.2).

Über die Bewertung auf Grundlage der tatsächlich aufgetretenen Schäden hinaus, werden Erkenntnisse aus bereits vorliegenden Untersuchungen und zahlreichen Literaturstellen zur Bewertung des Schädigungspotenzials herangezogen und ggf. mit den Erkenntnissen der Auswertung verifiziert. Dazu sollen, neben den generellen Defiziten älterer Brücken, besonders auffällige Konstruktionen und Bauteile herausgestellt werden.

### Einwirkungsseite

Im Unterschied zur Bewertung des Schädigungspotenzials der Widerstandsseite ist die Auswertung für relevante Einwirkungen nicht maßgeblich auf der Grundlage der tatsächlich aufgetretenen Schäden möglich. Die zur Verfügung gestellte Schadensdatenbank enthält keine oder nur unpräzise Angaben zu den Ursachen der Schäden. Auch eine nachträgliche Ermittlung der Schadensursache ist ohne objektspezifische Kenntnisse bezüglich der Bauwerkshistorie der jeweiligen Brücken, aufgrund der Besonderheiten und vielfältigen Randbedingungen, nicht möglich. Die Auswahl und Beurteilung relevanter Einwirkungen wird daher maßgeblich auf der Grundlage bestehender Erkenntnisse aus der Literatur sowie eigener Untersuchungen und Überlegungen vorgenommen. Die Auswertungen tatsächlich aufgetretener Schäden dienen in diesem Zusammenhang lediglich zur Verifizierung der Er-

kenntnisse, indem die in der Literatur und aus eigenen Untersuchungen bekannten Schäden mit den tatsächlich aufgetretenen relevanten Schäden (Bewertungszahl  $\geq 2$ ) verglichen werden. Dabei bleibt zu berücksichtigen, dass eine eindeutige Zuordnung von Einwirkungen zu bestimmten Schadensbildern nicht immer möglich ist und somit auch eine Bewertung des Schädigungspotenzials in einigen Fällen schwierig ist.

#### 4.1.1 Zusammenfassung relevanter Schäden

Zur Beurteilung der Schädigungsrelevanz sollen neben den Erkenntnissen aus der Literatur und verschiedenen Untersuchungsergebnissen insbesondere die Erkenntnisse aus der Aufbereitung tatsächlich aufgetretener Schäden (Kapitel 2.2) herangezogen werden. Dazu werden im Folgenden die maßgeblichen bzw. häufigsten Schäden, die sich bei der Schadensauswertung ergeben haben für die unterschiedlichen Bauwerksteile einer Brücke zusammengefasst.

#### Überbau

##### Allgemein

- Schäden am Überbau treten vermehrt an Brücken auf, die gemäß Brückenklassen bis BK 30/30 bemessen wurden,
- ca. 66 % der aufgetretenen Risse sind Längsrisse,
- vermehrte Schadenshäufigkeit bei Plattenbalken-, Balken-, Gewölbe- und Bogenbrücken mit Baubeginn zwischen 1955 und 1960.

##### Schadenshäufigkeiten

- freiliegende Bewehrung (Schadensanteil von ca. 30 %)
  - besonders an Brücken, die gemäß Brückenklasse BK 12 bis BK 45 bemessen wurden,
  - besonders bei Brücken mit Baubeginn vor 1980,
  - vermehrte Schadenshäufigkeit im Feld- und Stützbereich sowie im Bereich der Momentennullpunkte von Plattenbalkenbrücken,
  - häufigster Schaden an Brücken, die gemäß Brückenklasse BK 30/30 bemessen wurden.

- Risse (Schadensanteil von ca. 27 %)
  - insgesamt weniger Risschäden bei Hohlkastenbrücken,
  - größte Risshäufigkeit im Bereich der Widerlager (unabhängig von der Bauwerksart),
  - häufigster Überbauschaden an Brücken, die gemäß Lastmodell 1 bemessen wurden,
  - Abplatzungen und Ausbrüche (Schadensanteil von ca. 22 %),
  - besonders bei Brücken mit Baubeginn vor 1980,
  - vermehrte Schadenshäufigkeit bei Plattenbalkenbrücken.
- Hohlstellen und Kiesnester
  - größte Schadenshäufigkeit im Feldbereich der Brücken,
  - vermehrte Schadenshäufigkeit bei Plattenbalkenbrücken.
- Durchfeuchtungen und Ausblühungen
  - vermehrte Schadenshäufigkeit bei Gewölbe-, Bogen- und Balkenbrücken.

#### Vorspannsystem

##### Allgemein

- nahezu keine Schäden bei Brücken mit Baubeginn nach 1980.

##### Schadenskombinationen

- mit freiliegender Bewehrung (Kombination in ca. 95 % der Schadensfälle),
- mit Abplatzungen und Ausbrüchen (Kombination in ca. 88 % der Schadensfälle),
- mit Rissen im Überbau (Kombination in ca. 85 % der Schadensfälle).

#### Unterbau

##### Allgemein

- Schäden am Unterbau treten vermehrt an Brücken auf, die gemäß Brückenklassen bis BK 30/30 bemessen wurden,

- Schäden besonders bei Brücken mit Baubeginn vor 1980,
- Risse.

#### Schadenshäufigkeiten

- Risse am Widerlager (Schadensanteil von ca. 36 %)
  - vermehrt Risse bei Plattenbalkenbrücken mit Baubeginn zwischen 1955 und 1990,
  - insgesamt weniger Risschäden an Widerlagern von Hohlkastenbrücken,
  - häufigster Schaden an Brücken nach Brückenklasse BK 60/30 und Lastmodell 1,
  - deutliche höhere Schadenshäufigkeit an Stahlbeton- als an Spannbetonbrücken,
- freiliegende Bewehrung am Widerlager (Schadensanteil von ca. 25 %)
  - besonders bei Brücken mit Baubeginn vor 1980.
- Abplatzungen und Ausbrüche an Pfeilern/Stützen (Schadensanteil von ca. 30 %),
- freiliegende Bewehrung an Pfeilern/Stützen (Schadensanteil von ca. 25 %)
  - besonders bei Brücken mit Baubeginn vor 1980.

#### Lager

##### Allgemein

- Abnahme der Schadenshäufigkeit mit steigender Anforderung bezüglich der Brückenklasse,
- größte Anzahl von Schäden an Brücken mit Baubeginn vor 1990.

##### Schadenshäufigkeiten

- Korrosion (Schadensanteil von ca. 42 %),
- Schäden am Elastomer (Schadensanteil von ca. 13 %),
- fehlerhafte Lage (Schadensanteil von ca. 13 %).

#### Ausrüstung

##### Allgemein

- Schäden an der Ausrüstung treten vermehrt an Brücken nach Brückenklassen bis BK 30/30 auf,

- bei den Schadenshäufigkeiten ist keine signifikante Schadensabnahme bzgl. des Baujahrs der Brücken festzustellen.

#### Schadenshäufigkeiten

- Belag und Abdichtung (Schadensanteil von ca. 36 %)
  - Insbesondere:
    - Risse im Belag (Anteil von ca. 30 %),
    - beschädigte/fehlerhafte Abdichtung (Anteil von ca. 20 %).
- Geländer und Schutzeinrichtungen (Schadensanteil von ca. 31 %),
- Leitungen und Entwässerung (Schadensanteil von ca. 12 %)
  - keine Abnahme der Schadenshäufigkeit bzgl. der Anforderung an die Brückenklasse festzustellen.

## 4.2 Schädigungspotenziale der Widerstandsseite (Konstruktion)

Die Auswertung und Darstellung von Schädigungspotenzialen der Widerstandsseite (sowie der Einwirkungsseite) erfolgt abschließend in Form eines Handbuchs. Die grundlegenden Kriterien zur Einteilung des Handbuchs wurden dazu in Abstimmung mit der BAST wie folgt festgelegt:

- Bauwerksart (Hohlkasten-, Plattenbalken-, Plattenbrücken, sonstige Brücken),
- Baujahr (< 1967, 1968-1979, 1980-2003, ≥ 2003),
- Baustoff (Stahlbeton, Spannbeton),
- Stat. System (Einfeld-, Mehrfeldsystem).

Neben den, auf Grundlage der aufgetretenen Schäden, identifizierten Schädigungspotenzialen werden auch die Erkenntnisse aus der Literatur bei der Erarbeitung des Handbuchs berücksichtigt. Die Darstellung der Erkenntnisse auf Grundlage der tatsächlich aufgetretenen Schäden ist an dieser Stelle, aufgrund der Vielzahl von Auswertungen, Diagrammen und Vergleichen, nicht zweckmäßig und erfolgt im Rahmen des Handbuchs. Im Folgenden wird die Bewertung des Schädigungspotenzials der Konstruktion in erster Linie auf Grundlage der Erkenntnisse aus Literatur und eigenen theoretischen



Untersuchungen dargestellt, die jedoch teilweise mit den Erkenntnissen der tatsächlich aufgetretenen Schäden verifiziert werden konnten.

#### 4.2.1 Überbau

Auf der Grundlage der Auswertung tatsächlich aufgetretener Schäden ist das Schädigungspotenzial für den Überbau im Hinblick auf die Merkmale Standsicherheit und Verkehrssicherheit als eher gering einzuschätzen. Für das Merkmal der Dauerhaftigkeit hingegen lässt sich ein deutlich höheres Schädigungspotenzial feststellen.

Die Schadensauswertung belegt, dass Schäden mit freiliegender Bewehrung sowie Risse und Abplatzungen die häufigsten Schäden am Überbau darstellen. Für Schäden mit freiliegender Bewehrung zeigt sich, im Gegensatz zu den anderen Schäden, eine signifikante Abnahme der Schadenshäufigkeit an Brücken mit Baubeginn nach 1980.

Hervorzuheben ist zudem, dass Kiesnester und Hohlstellen vermehrt an Plattenbalkenbrücken auftreten. Die meisten Risssschäden am Überbau treten bis 1990 an Plattenbrücken und sonstigen Brücken (Gewölbe-, Bogen- und Balkenbrücken) auf. Auffällig ist, dass bei Platten- und Plattenbalkenbrücken mit einem Baubeginn zwischen 1990 und 2005 die Schadenshäufigkeit von Risssschäden erheblich angestiegen ist.

Besonders häufig sind Schäden (alle Schadensarten) am Überbau von Plattenbalken-, Gewölbe-, Bogen- und Balkenbrücken mit einem Baubeginn zwischen 1955 und 1960.

In dünnen Bodenplatten von vorgespannten Hohlkastenquerschnitten kann es zur vermehrten Rissbildung infolge unterschiedlich dicker Bauteile kommen [KöMZ86]. Durch die unterschiedlichen Kriech- und Schwindverformungen zwischen (dünnen) Bodenplatten und (dicken) Stegen kommt es zur Umlagerung von Vorspannkräften zu den dickeren Bauwerksteilen.

Bei Hohlkastenquerschnitten mit internen Spanngliedern in den Stegen, kommt es vermehrt zu Hohl- und Fehlstellen des Betongefüges [ZiWe07]. Aufgrund der oftmals sehr dicht angeordneten Spannglieder und der hohen Bewehrungskonzentration kann der Beton nicht ordnungsgemäß eingebaut und verdichtet werden. Nach der ARS 17/1999 dürfen in Stegen von Hohlkastenquer-

schnitten keine internen Spannglieder mehr angeordnet werden.

#### Brückenlänge

Bei Brücken mit einer Gesamtlänge zwischen 5 m und 30 m ist die Schadenshäufigkeit im Vergleich zu anderen Brückenlängen besonders hoch. Dabei beträgt der Anteil von Brücken mit dieser Länge etwa 50 % am Gesamtbestand von Brücken im Bundesfernstraßennetz und wurde zum großen Teil vor 1980 gebaut.

#### Koppelfugen

Brücken mit Koppelfugen weisen in Abhängigkeit des Baujahrs deutliche Unterschiede auf. Bauwerke mit einem Baubeginn vor 1969 neigen gemäß [BASt85] deutlich stärker zur Rissbildung im Koppelfugenbereich als Bauwerke mit Baubeginn nach 1970. Aufgrund der zum Teil großen Rissbreiten verbunden mit der signifikant gestiegenen Verkehrsbelastung erhöht sich die Gefahr für ein Ermüdungsversagen dieser Bauwerke deutlich. Risse in Koppelfugenbereichen treten dabei vermehrt an Hohlkastenquerschnitten auf. Die Gründe dafür sind nach [IvBu01]:

- eine erhöhte Rissempfindlichkeit im Koppelfugenbereich von Hohlkastenbrücken („Zweipunktquerschnitt“),
- Zusatzbeanspruchungen aus Profilverformungen bei Hohlkastenquerschnitten, die in der Vergangenheit weitgehend nicht berücksichtigt wurden,
- weit mehr als die Hälfte der bestehenden Hohlkastenbrücken wurden vor 1970 gebaut, wohingegen ein Großteil der Platten- und Plattenbalkenbrücken erst mit Baubeginn nach 1970 gebaut wurden.

Aufgrund der Änderungen in den technischen Regelwerken (vgl. Kapitel 3.1.2) sind Bauwerke mit einem Baubeginn nach 1977 im Koppelfugenbereich weitestgehend ungerissen.

#### Spannstahl/Hüllrohre

Bei Spannbetonbrücken mit Baubeginn bis 1978 in Westdeutschland und teilweise bis 1990 in der DDR kann die Verwendung von korrosionsempfindlichen Spannstählen unter ungünstigen Bedingungen zu einem Sprödbruch infolge Spannungsris-



korrosion (SpRK) führen [Naum09]. Dabei sind vorrangig folgende Spannstähle nach [ZiLi09] zu nennen:

- vergüteter Spannstahl Neptun S 145/160 der Firma Felten & Guillaume Carlswerke AG, Produktion von 1959 bis 1964, mit ovalem und rundem Querschnitt,
- vergüteter Spannstahl Sigma S 145/160 der Firma Hütten- und Bergwerke Rheinhausen AG, Produktion bis 1965 („erste Generation“), mit ovalem und rundem Querschnitt,
- vergüteter Spannstahl Sigma S 145/160 der Firma Hütten- und Bergwerke Rheinhausen AG, Produktion ab 1965 („zweite Generation“), mit ovalem Querschnitt,
- vergüteter Spannstahl S 140/160 der Stahlwerke Hennigsdorf, Produktion bis 1993, mit ovalem Querschnitt.

Aufgrund unsachgemäßer Ausführung kann es bei Spannbetonbrücken mit Baubeginn in den 50er, 60er und 70er Jahren vermehrt zu mangelhaft verpressten Hüllrohren kommen. „Die ersten Anleitungen oder Richtlinien für das Einpressen aus dem Jahre 1957 haben fast nichts zwingend vorgeschrieben, sie waren eben nur schlichte Anweisungen“ [GeKo83]. Erst mit Einführung der überarbeiteten Spannbetonnorm DIN 4227 im Jahr 1979 wurden im Teil 5 „Spannbeton; Einpressen von Zementmörtel in Spannkanäle“, sowie mit dem Verweis auf den Entwurf der DIN 18553 „Hüllrohre für Spannglieder“ genaue Anweisungen und Bedingungen für das Verpressen von Hüllrohren auf der Baustelle festgelegt. Bei der vorliegenden Auswertung zeigte sich jedoch, dass direkte Schäden am Vorspannsystem deutlich seltener auftreten als andere Schäden am Überbau. Dabei sei angemerkt, dass unzureichend verpresste Hüllrohre oder korrodierte Spannglieder im Hüllrohr deutlich schwieriger zu detektieren sind als andere Schadensbilder.

#### 4.2.2 Unterbau

Analog zum Überbau lässt sich anhand der Schadensauswertungen das Schädigungspotenzial für den Unterbau im Hinblick auf die Standsicherheit und die Verkehrssicherheit als gering einstufen. Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit ist das Schädigungspotenzial hingegen deutlich höher einzuschätzen. Der Anteil an relevanten Schäden bezüg-

lich der Dauerhaftigkeit liegt dabei in vielen Fällen bei annähernd 40 %.

Die Schadensauswertung am Unterbau von Massivbrücken im Hinblick auf den Ort bzw. die Lage des Schadens zeigt, dass sowohl an den Widerlagern als auch an den Stützen bzw. Pfeilern vermehrt Schäden mit freiliegender Bewehrung auftreten. Dabei sind besonders Brücken mit einem Baujahr vor 1980 betroffen. Risse hingegen treten häufiger am Widerlager auf, wohingegen Abplatzungen und Hohlräume bzw. Kiesnester eher die Stützen und Pfeiler betreffen.

Es zeigt sich zudem, dass besonders Plattenbrücken mit Baubeginn zwischen 1955 und 1990 häufig Risschäden am Unterbau aufweisen. Risse an Unterbauten von Kastenquerschnitten sind hingegen deutlich seltener im Vergleich zu anderen Querschnittstypen. Insgesamt treten Risse am Unterbau wesentlich häufiger an Stahlbeton- als an Spannbetonbrücken auf.

Aus einer Länderbefragung der Straßenbauverwaltungen im Rahmen der Erstellung des Sachstandsberichts zu Verstärkungsverfahren [ScPS10] geht hervor, dass sich Brückenunterbauten zum Teil in einem schlechteren Zustand befinden als die Überbauten. Die Brückenunterbauten können teilweise erhebliche Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) aufweisen.

#### 4.2.3 Lager

Frühere Untersuchungen an Spannbetonbrücken haben gezeigt, dass die meisten Lagerschäden an Brücken mit Lagern aus oberflächengehärteten Edelstahlrollen eingetreten sind. Zum Teil sind die Lagerrollen ohne Vorankündigung gebrochen. Dabei besteht die Gefahr, dass der Überbau aus den Rolleneinsätzen herausrutscht und direkt auf die Pfeiler absackt.

Darüber hinaus sind Rollenlager, die vor 1968 eingebaut wurden, durch ein Herauslaufen über den Rand der Abrollfläche zum Teil gefährdet. Auch dabei besteht die Gefahr des Absackens des Überbaus auf den Pfeiler.

Bei der vorliegenden Auswertung von Schäden an der Lagerung ist eingetretene Korrosion der häufigste Schadensfall. Beschädigungen der Elastomere und eine fehlerhafte Lage des Lagers treten zudem ebenfalls häufig auf. Insgesamt sind die meisten Schäden an der Lagerung

an Brücken mit einem Baujahr vor 1990 festzustellen.

Brückenlager müssen die gesamten Kräfte aus dem Überbau in den Unterbau abtragen und die Verformungen des Tragwerks aufnehmen. Dementsprechend sind Beanspruchungen aus steigendem Verkehrsaufkommen und höhere zulässige Gesamtgewichte relevante Größen für die Lebensdauer von Brückenlagern. Darüber hinaus werden Lagerkonstruktionen zum Teil intensiv durch Tausalze beansprucht. Ältere Brückenlager aus Stahl weisen zudem teilweise erhebliche Korrosionserscheinungen auf.

#### 4.2.4 Ausrüstung

Die Auswertung der Schadensdaten belegt, dass die aufgetretenen Schäden nahezu keinen Einfluss auf die Standsicherheit der Brücke haben und somit das Schädigungspotenzial für dieses Merkmal gering ist. Für die Dauerhaftigkeit hingegen zeigt sich ein erhöhtes Schädigungspotenzial bei der Brückenausrüstung. Zudem ist im Gegensatz zu den übrigen Bauwerksteilen (Überbau, Unterbau, usw.) das Schädigungspotenzial für die Ausrüstung im Hinblick auf die Verkehrssicherheit nicht als gering einzustufen.

#### Fahrbahnübergangskonstruktionen

Die Auswertung hat gezeigt, dass Schäden an der Fahrbahnübergangskonstruktion deutlich seltener auftreten als andere Schadenstypen an der Brückenausrüstung. Da es sich bei Fahrbahnübergängen, wie auch bei Lagern, um Verschleißteile handelt, die weitestgehend im Laufe der Zeit ausgetauscht werden, ist die vergleichsweise geringe Anzahl von Schäden zu erklären. Gegenüber den Lagern sind Übergangskonstruktionen jedoch weit aus höheren Abnutzungen ausgesetzt und weisen vor allem Schäden in Form von Materialermüdung und Undichtigkeiten auf. Untersuchungen von [KöMZ86] zeigen zudem, dass Lamellenkonstruktionen häufiger Schäden aufweisen als Rollverschlusskonstruktionen.

#### Abdichtung/Fahrbahnbelag

Laut [ZiWe07] können bei alten Abdichtungssystemen, insbesondere bei Mastix auf Glasvlies, die bis etwa 1980 ausgeführt wurden, aufgrund ihres Aufbaues Unterläufigkeiten auftreten, die zur Durch-

feuchtung des Betons und zur Schädigung der Bewehrung führen können. Bei einer lokalen Schädigung der Abdichtung kann Wasser eindringen und sich zwischen der Abdichtung und der Betonoberfläche über einen großen Bereich ausbreiten. Neuere Abdichtungssysteme hingegen bestehen aus mehreren Lagen und werden mit der Fahrbahnplatte flächig verklebt. Somit wird zum einen der Schutz vor Schädigung der Abdichtung erhöht und zum anderen kann sich im Fall einer lokalen Schädigung eindringendes Wasser nicht mehr über einen großflächigen Bereich ausbreiten.

#### Entwässerung

Untersuchungen von [ZiWe07] haben gezeigt, dass festgestellte Durchfeuchtungen zu über 80 % auf Schäden am Entwässerungssystem zurückzuführen sind. Dabei stellen Tropfzellen einen besonders anfälligen Bereich des Entwässerungssystems dar. Durch zu kurze Überstände oder Korrosion der Entwässerung kommt es zu Durchfeuchtungen und Ausblühungen des Betons insbesondere an den Kragarmen und Unterseiten der Fahrbahnplatten.

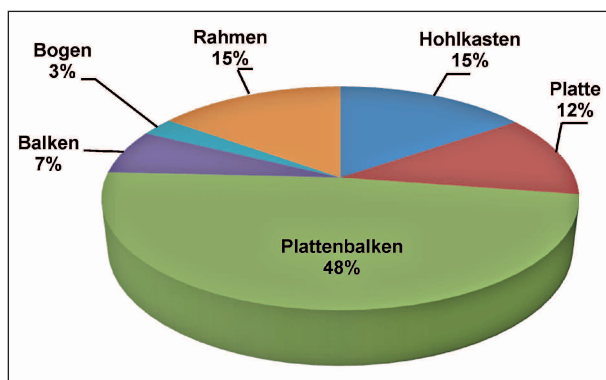
#### 4.2.5 Explizite Auswertung von Brücken mit Baubeginn ab 2003

Zur Vermeidung bekannter Schäden und deren Ursachen an bestehenden, älteren Massivbrücken wurden und werden die entsprechenden Normen und Regelwerke immer weiter überarbeitet und angepasst. Somit ist eine direkte Interpretation bzw. Übertragung von bereits bekannten Schäden auf mögliche Schäden bei zukünftigen Bauwerken nur eingeschränkt möglich. Um Anzeichen und Hinweise für mögliche Problemfelder und Schäden von neuen Brücken zu erlangen, sollen in einer zusätzlichen Auswertung Brücken mit einem Baubeginn ab 2003, also Brücken die nach dem aktuellen Stand der Regelwerke errichtet wurden, bezüglich der aufgetretenen Schäden untersucht werden. Da die Datendank, die zu Beginn des Forschungsprojektes von der BAST zur Verfügung gestellt wurde, jedoch nur eine geringe Anzahl von Brücken mit einem Baubeginn nach 2003 aufweist, wurde nachträglich eine zusätzliche Datenbank mit Schäden an jüngeren Brücken von der BAST bereitgestellt. Bei der Auswahl der Bauwerke für die Auswertung von Schäden und kritischen Bauwerksteilen aus der Datenbank wurden folgende Kriterien zugrunde gelegt:

- Baujahr: 2003 bis 2012,
- Brückenklasse: LM1 nach DIN FB 101,
- Brückenlänge: ab 5 m,
- Nutzung: Brücke unter Verkehr, Brücke nicht unter Verkehr, Brücke in der Ausführung.

Daraus ergibt sich eine Datengrundlage für die folgenden Auswertungen von 53.874 Schäden an 2.162 Brücken (2.725 Teilbauwerke) mit einer Gesamtbrückenfläche von 1.535.883 m<sup>2</sup>.

Die Verteilung der unterschiedlichen Bauteilgruppen bezüglich der Gesamtbrückenfläche ist in der folgenden Grafik dargestellt. Demnach entfällt bei der Auswertung der zur Verfügung gestellten Datenbank etwa die Hälfte der Brückenfläche auf Plattenbalkenbrücken. Die zweithäufigste Bauwerkgruppe bezogen auf die Brückenfläche sind Hohl-

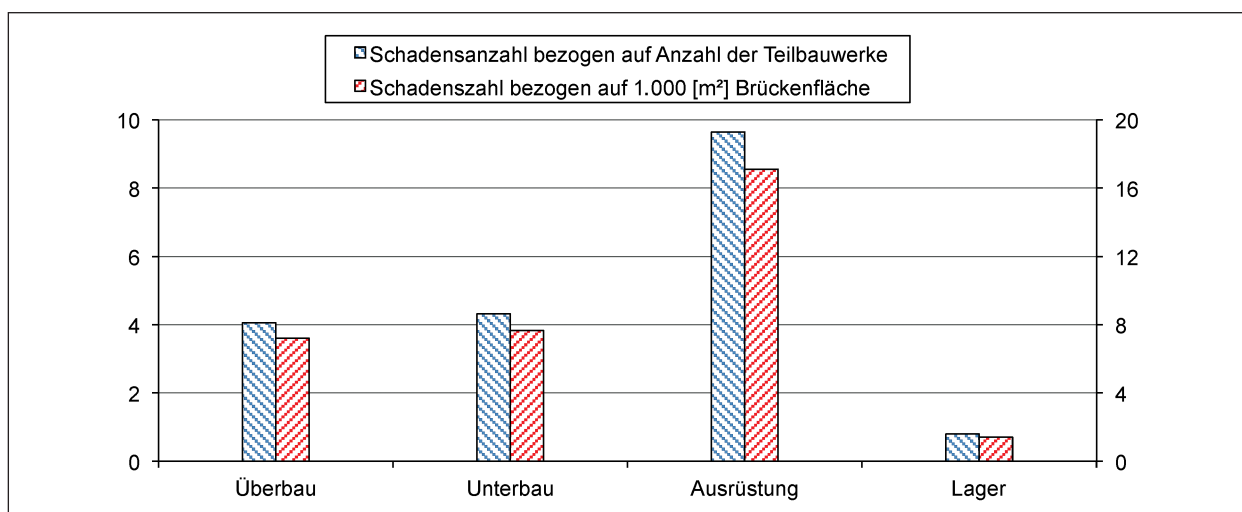


**Bild 74:** Verteilung der Bauwerksgruppe nach Gesamtbrückenfläche für Brücken mit Baubeginn nach 2003 (Grundlage: 2.162 Brücken mit einer Brückenfläche von 1.535.883 m<sup>2</sup>)

kasten- und Rahmenbrücken mit einem Anteil von jeweils 15 %.

Zur Erfassung der Schadensverteilung für die verschiedenen Bauteilgruppen und zur Einstufung besonders schadensbehafteter Bauwerksteile, wurden die einzelnen Schäden für den Überbau, den Unterbau, die Ausrüstung und die Lager jeweils bezogen auf die Anzahl der Teilbauwerke und bezogen auf die Brückenfläche aufbereitet (Bild 75). Die Verteilung zeigt, dass die meisten Schäden an der Ausrüstung der Brücken auftreten. Im Gegensatz dazu ist die Anzahl von Schäden an den Lagern im Vergleich zu den anderen Bauteilgruppen am geringsten. Schäden am Unterbau und am Überbau kommen bei den Brücken mit Baubeginn ab 2003 in circa gleicher Häufigkeit vor. Bei beiden Bauteilgruppen treten ca. 7-8 Schäden pro 1.000 m<sup>2</sup> Brückenfläche auf. Im Vergleich zu den Brücken mit einem Baubeginn zwischen 1935 und 2010 zeigt sich bei der Auswertung „neuerer“ Brücken eine deutliche Abnahme von Schäden am Überbau. Bei der Schadenshäufigkeit am Unterbau ist hingegen kein signifikanter Unterschied zwischen den „älteren Brücken“ und „neueren Brücken“ festzustellen. Bei der Ausrüstung und der Lagerung ist die Schadenshäufigkeit für Brücken mit Baubeginn nach 2003 sogar zum Teil deutlich höher als bei Brücken mit einem Baubeginn ab 1935.

Neben der allgemeinen Auswertung der Schadensverteilung bezüglich der betroffenen Bauteilgruppe wird auf Grundlage der Schadensbewertungszahlen das Schädigungspotenzial bei Brücken mit einem Baubeginn ab 2003 bewertet. Die Auswer-



**Bild 75:** Schadensverteilung der unterschiedlichen Bauteilgruppen für die Brücken mit Baubeginn nach 2003 (Grundlage: 53.874 Schäden an 2.725 Teilbauwerken)

Die Verteilung der Schadensbewertungszahlen soll zum einen die Schadensverteilung im Hinblick auf den Schweregrad und insbesondere den Anteil von relevanten Schäden (Bewertung  $\geq 2$ ) verdeutlichen und zum anderen den Vergleich der Schadensverteilungen zwischen der Datengrundlage der Brücken mit einem Baubeginn ab 2003 und den Brücken mit Baubeginn von 1935 bis 2010 darstellen. Die Bewertung wird im Folgenden getrennt für die Merkmale Standsicherheit und Dauerhaftigkeit vorgenommen.

### Relevante Schäden für die Standsicherheit

Die Verteilung der Schadensbewertungszahlen bei Brücken mit einem Baubeginn ab 2003 zeigt, dass der Anteil von relevanten Schäden bezüglich der Standsicherheit für alle Bauteilgruppen deutlich unter einem Prozent liegt. Der Anteil von Schäden, die keinen Einfluss auf die Standsicherheit haben, liegt demgegenüber deutlich über 90 %. Im Vergleich zu der Auswertung bei Brücken mit einem Baubeginn ab 1935 ist eine Verlagerung der Schäden hin zu einer günstigeren Bewertungszahl bei jeder Bauteilgruppe für das Merkmal der Standsicherheit erkennbar (Tabelle 5).

### Relevante Schäden für die Dauerhaftigkeit

Die Verteilung der Bewertungszahlen bezüglich der Dauerhaftigkeit zeigt, dass der Anteil von Schäden, die sich negativ auf die Dauerhaftigkeit auswirken deutlich höher ist als der Anteil bei der Bewertung der Standsicherheit. Der Anteil von Schäden, die keinen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit haben liegt hingegen in Abhängigkeit der Bauteilgruppe lediglich zwischen 16 % und 34 %. Im Vergleich dazu liegt dieser Anteil für das Merkmal Standsicherheit zwischen 92 % und 98 %. Insbesondere Schäden mit einer Bewertungszahl von 2, also Schäden die langfristig die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen und die mittelfristig beseitigt werden müssen, treten in 14 % bis 22 % der Schadensfälle auf. Im Vergleich zu den Bewertungszahlen bei Brücken mit einem Baubeginn ab 1935 ist ähnlich wie beim Merkmal der Standsicherheit auch für die Dauerhaftigkeit eine Verlagerung der Schäden hin zu einer günstigeren Bewertungszahl bei jeder Bauteilgruppe erkennbar. Besonders deutlich ist diese Verlagerung für Schäden am Überbau (Tabelle 6).

Analog zum Kapitel 4.2 werden im Folgenden exemplarisch Schadensverteilungsdiagramme aufge-

Schadensbewertung (S)	Anzahl der Schäden am Überbau		Anzahl der Schäden am Unterbau		Anzahl der Schäden an der Lagerung		Anzahl der Schäden an der Ausrüstung	
	ab 2003	1935-2010	ab 2003	1935-2010	ab 2003	1935-2010	ab 2003	1935-2010
0	97,9 %	94,2 %	98,3 %	95,1 %	92,1 %	84,6 %	96,4 %	94,8 %
1	1,8 %	5,4 %	1,6 %	4,6 %	7,4 %	13,4 %	3,6 %	5,1 %
2	0,3 %	0,4 %	0,1 %	0,3 %	0,4 %	1,8 %	0 %	0,2 %
3	0 %	0 %	0 %	0 %	0,1 %	0,2 %	0 %	0 %
4	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %

Tab. 5: Verteilung der Schäden bezüglich der Schadensbewertung für die Standsicherheit von Brücken mit Baubeginn nach 2003 und Brücken mit Baubeginn von 1935-2010

Schadensbewertung (D)	Anzahl der Schäden am Überbau		Anzahl der Schäden am Unterbau		Anzahl der Schäden an der Lagerung		Anzahl der Schäden an der Ausrüstung	
	ab 2003	1935-2010	ab 2003	1935-2010	ab 2003	1935-2010	ab 2003	1935-2010
0	15,9 %	2,4 %	27,2 %	12,3 %	33,7 %	10,1 %	31,3 %	29,1 %
1	59,4 %	49,7 %	57,6 %	48,5 %	48,5 %	50 %	54,8 %	31,5 %
2	22,1 %	46 %	14,8 %	37,1 %	17,6 %	36,2 %	13,7 %	37,6 %
3	2,6 %	1,9 %	0,4 %	2,1 %	0,2 %	3,8 %	0,2 %	1,8 %
4	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %

Tab. 6: Verteilung der Schäden bezüglich der Schadensbewertung für die Dauerhaftigkeit von Brücken mit Baubeginn nach 2003 und Brücken mit Baubeginn von 1935-2010

führt, die auf der Grundlage der Schadensbewertungszahlen gemäß RI-EBW-PRÜF erstellt wurden. Da eine generelle Beurteilung der Schadensverteilungen bereits im vorhergehenden Abschnitt erfolgt ist, sollen nun mögliche Unterschiede und Besonderheiten im Hinblick auf die Bauwerksart und den verwendeten Baustoff (Stahlbeton, Spannbeton) herausgestellt werden.

### Schäden am Überbau

Für die dargestellten Diagramme (Bild 76: Plattenbalkenbrücken aus Spannbeton und Bild 77: Rahmenbrücken aus Stahlbeton) ist die Verteilung der Schadensanteile für das jeweilige Merkmal nahezu gleich. Auch die Auswertungen der übrigen Bauwerksarten in Abhängigkeit des Baustoffs (hier nicht aufgeführt) ergeben keine abweichenden Schadensverteilungen, sodass die beiden dargestellten Diagramme die typische Schadensverteilung für Schäden am Überbau von Brücken mit einem Baubeginn ab 2003 darstellen.

### Schäden am Unterbau

Analog zur Auswertung der Schadensverteilungsdiagramme am Überbau, zeigt sich auch für den Unterbau, dass die Verteilung der Schadensbewertungen für alle Bauwerksarten (Hohlkasten-, Plattenbalken-, Platten- und Rahmenbrücken) sowie für Stahlbeton- und Spannbetonbrücken nahezu gleich ist. Bild 78 zeigt die typische Verteilung der Schadensbewertungen für den Überbau von Brücken mit einem Baubeginn ab 2003 für die Merkmale Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit exemplarisch für Spannbeton-Plattenbalkenbrücken.

### Schäden der Ausrüstung

Bei den Auswertungen der Schadensbewertungszahlen für die Brückenausrüstung ergeben sich in Abhängigkeit der Bauwerksart, insbesondere für das Merkmal der Dauerhaftigkeit, größere Abweichungen als bei der Auswertung für den Über- und Unterbau. Die Abweichungen für die Merkmale

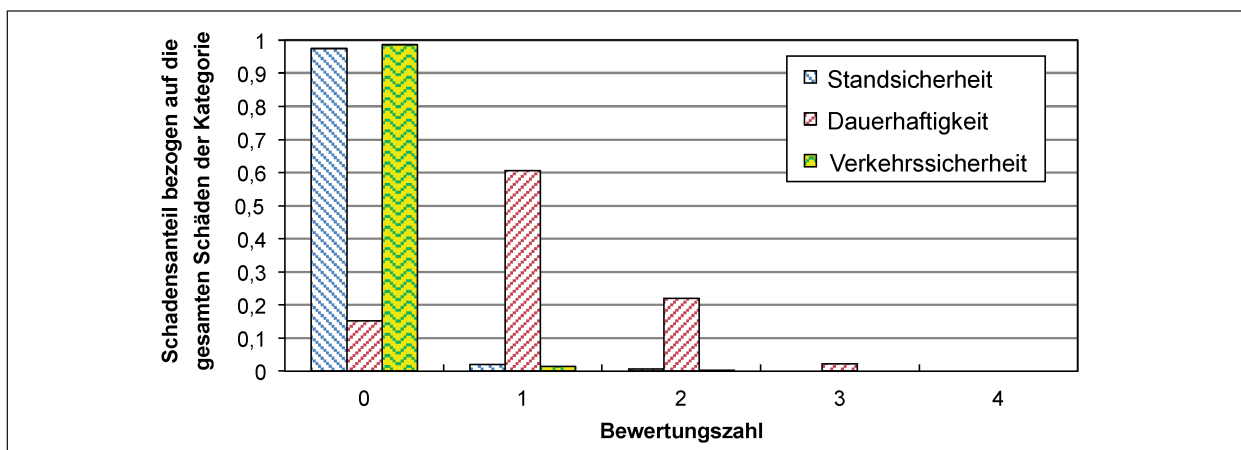


Bild 76: Schadensverteilung Überbau, Plattenbalkenbrücken, Spannbeton (Grundlage: 3.408 Schäden an 481 Teilbauwerken)

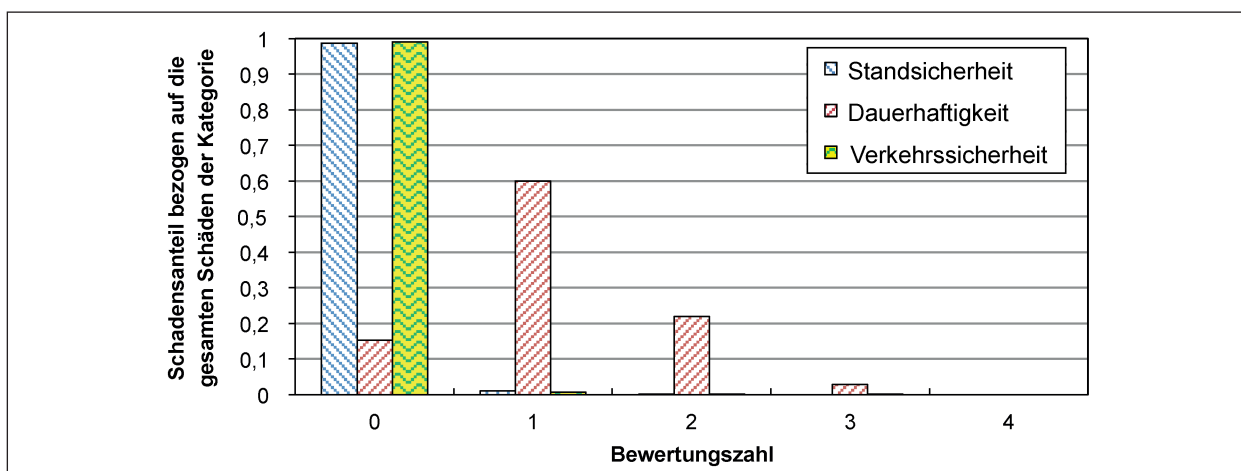


Bild 77: Schadensverteilung Überbau, Rahmenbrücken, Stahlbeton (Grundlage: 2.857 Schäden an 592 Teilbauwerken)



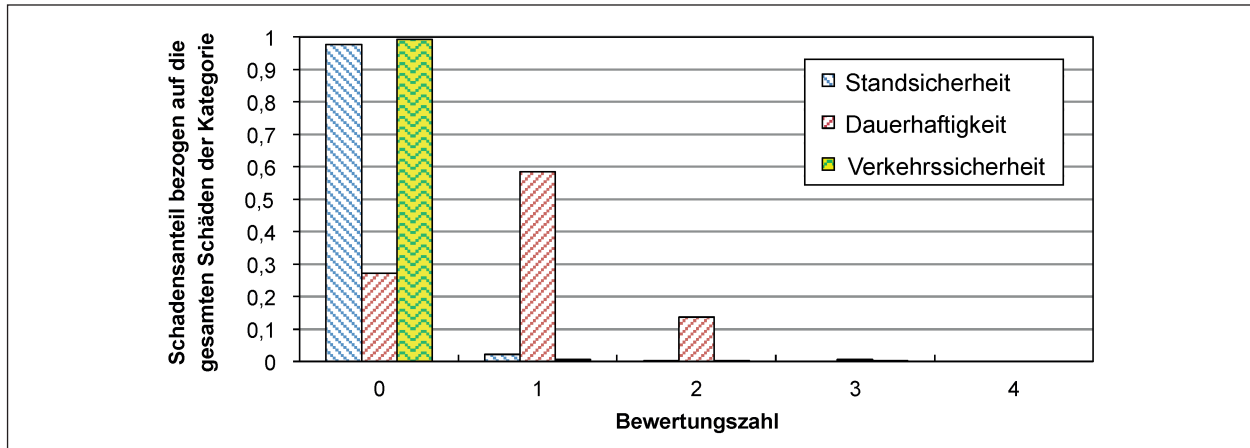


Bild 78: Schadensverteilung Unterbau, Plattenbalkenbrücken, Spannbeton (Grundlage: 4.068 Schäden an 503 Teilbauwerken)

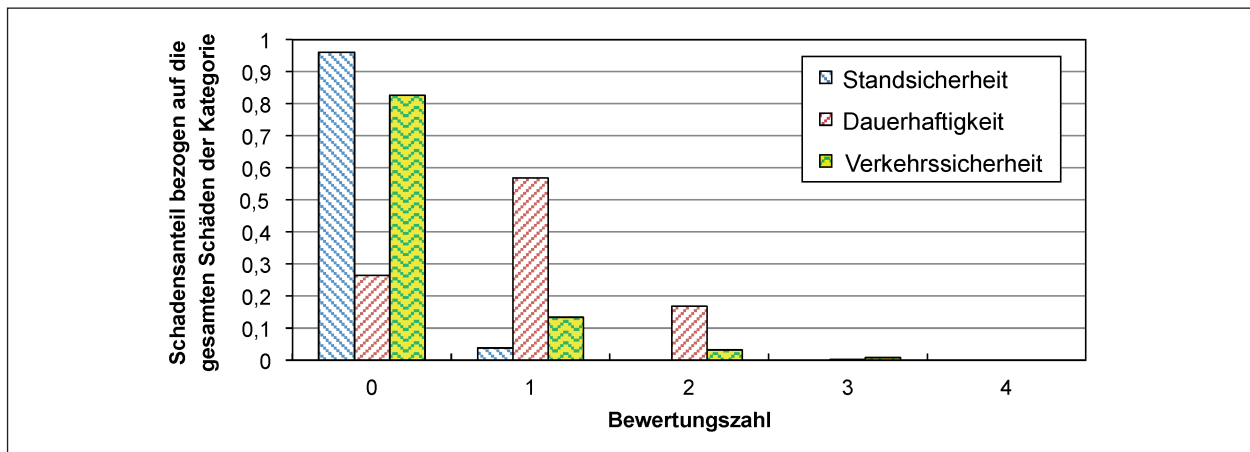


Bild 79: Schadensverteilung Ausrüstung, Plattenbrücken, Spannbeton (Grundlage: 1.476 Schäden an 141 Teilbauwerken)

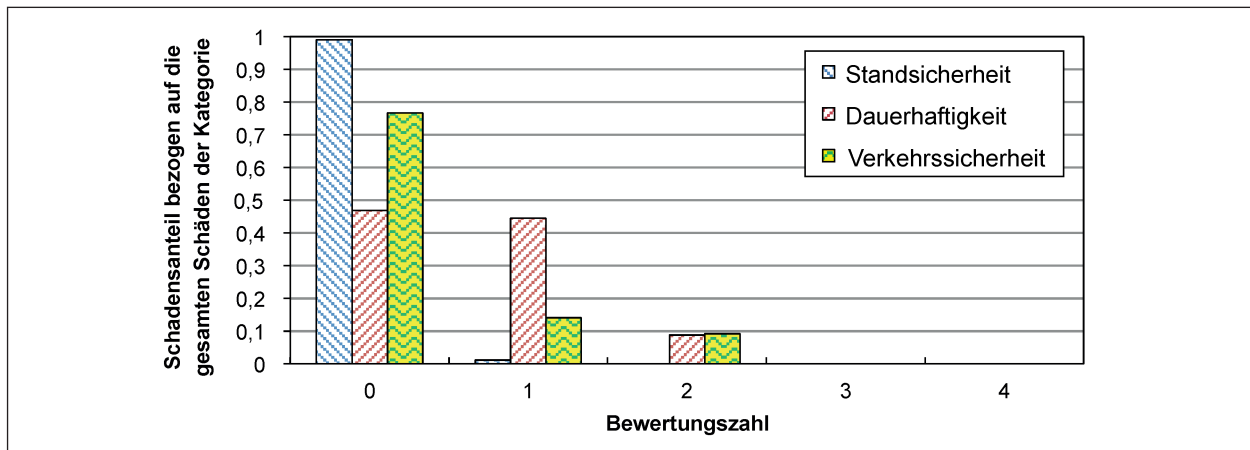


Bild 80: Schadensverteilung Ausrüstung, Balkenbrücken, Stahlbeton (Grundlage: 184 Schäden an 20 Teilbauwerken)

Standsicherheit und Verkehrssicherheit sind hingegen relativ gering. Bild 79 und Bild 80 zeigen zwei typische Verteilungen von Schadensbewertungen für die Brückenausrüstung.

Die explizite Auswertung von Brücken mit einem Baubeginn ab 2003 belegt lediglich für den Über-

bau eine Abnahme der Schadenshäufigkeit im Vergleich zur Auswertung von Schäden an Brücken mit einem Baubeginn ab 1935. Jedoch lässt sich generell für alle Bauteilgruppen feststellen, dass bei Brücken, die nach dem aktuellen Stand der Technik erstellt wurden, weniger Schäden aufgetreten sind, die sich negativ auf die Standsicherheit der



Brücken auswirken und insgesamt der Anteil von relevanten Schäden ( $\geq 2$ ) bezüglich der Standsicherheit sehr gering ist. Der Anteil relevanter Schäden für die Dauerhaftigkeit ist, sowohl bei der Auswertung von Brücken mit Baubeginn zwischen 1935 und 2010, als auch bei der expliziten Auswertung von Brücken mit Baubeginn ab 2003 deutlich höher als bei der Auswertung für das Merkmal Standsicherheit. Allerdings ist bei der Auswertung von Brücken mit einem Baubeginn ab 2003 eine Abnahme von relevanten Schäden insbesondere beim Überbau der Brücken erkennbar.

Die detaillierte Auswertung der Schadensbewertungen hat sowohl für den Überbau als auch für den Unterbau keine auffällig abweichenden Ergebnisse geliefert, sodass eine Abhängigkeit hinsichtlich der Bauwerksart und des Baustoffs bei Brücken mit Baubeginn ab 2003 nicht zu erkennen ist. Darüber hinaus hat auch die Unterteilung der Schadensbewertungszahlen nach Einfeldbrücken und Mehrfeldbrücken keine unterschiedlichen Ergebnisse für die verschiedenen Bauwerksteile und Merkmale geliefert.

### 4.3 Schädigungspotenziale der Einwirkungsseite (Beanspruchungen)

Brücken unterliegen einer Vielzahl von unterschiedlichen Beanspruchungen. Insbesondere die stark gestiegenen Verkehrslasten und die damit verbundenen mechanischen Beanspruchungen stellen relevante Einwirkungen von Brückenbauwerken dar. Darüber hinaus sind Brücken besonders den Beanspruchungen aus den klimatischen Verhältnissen, wie z. B. Temperatur und Feuchte, sowie eingesetzten Tausalzen ausgesetzt. Folgende, als relevant identifizierte Einwirkungen werden im Weiteren im Hinblick auf das Schädigungspotenzial ausgewertet und beurteilt:

- Verkehrsbeanspruchungen,
  - Schwerverkehr/Sondertransporte,
  - zukünftige Verkehrsentwicklungen,
- Temperatur,
- Umgebungsbedingungen,
  - CO<sub>2</sub>,
  - Chloride,
- Frost-/Frost-Tausalz-Angriff,

- Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR),
- Spannungsrisskorrosion (SpRK),
- Feuchte,
- (außergewöhnliche Einwirkungen bzw. Extremereignisse).

Eine Besonderheit im Hinblick auf relevante Einwirkungen stellen außergewöhnliche Lasten und Extremereignisse dar. Dazu zählen beispielsweise Brand, Explosionen, Anprall, Erdbeben, Hochwasser, Hangrutschungen und Starkwindereignisse. Diese Einwirkungen treten zwar während der Nutzungsdauer eines Bauwerks nur sehr selten auf (Wiederkehrperiode außergewöhnlicher Einwirkungen von 1 x in 10.000 Jahren nach DIN EN 1991-1-7/NA), führen aber im Fall des Eintretens i. d. R. zu erheblichen Schäden. Mögliche Schäden infolge dieser Einwirkungen können sowohl die Standsicherheit einzelner Bauwerksteile (lokale Auswirkungen) als auch die Standsicherheit des Gesamtbauwerks (globale Auswirkungen) gefährden. Das Schädigungspotenzial hängt jedoch stark vom jeweiligen Schadensausmaß und der Wahrscheinlichkeit des Eintretens ab. Da kaum Erkenntnisse und Untersuchungen zur Eintrittswahrscheinlichkeit und zum Ausmaß außergewöhnlicher Einwirkungen bzw. Extremereignissen vorliegen, die zu einer aussagekräftigen Bewertung führen, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit diese Einwirkungen nicht ausführlich behandelt. Darüber hinaus besteht auch keine Möglichkeit Erkenntnisse im Hinblick auf die Schadenshäufigkeit und das Schädigungspotenzial auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Schadensdatenbanken zu ermitteln. Insgesamt ist jedoch anzumerken, dass außergewöhnlichen Einwirkungen bzw. Extremereignissen i. d. R. immer ein großes Schädigungspotenzial im Fall des Eintretens zugewiesen werden kann. Da Extremereignisse zum Teil bereits in der Bemessung Berücksichtigung finden (z. B. Hochwasser, Anprall, Erdbeben), können kritische Ereignisse in das Überwachungssystem implementiert werden. Somit können insbesondere im Rahmen des Betriebsmanagements Vorkehrungen (z. B. Sperrung der Brücke) beim Auftreten extremer Ereignisse getroffen werden. Diese individuellen Lösungen bzw. Überwachungssysteme, beispielsweise zur Identifizierung kritischer Windereignisse (z. B. durch Schwingungsmessungen), sind bereits an ausgewählten Stahl- bzw. Verbundbrücken (seilverspannten Brücken) im Einsatz.

Die Erkenntnisse der folgenden, ausführlichen Darstellung und Bewertung von Schädigungspotenzialen der Einwirkungsseite fließen, analog zur Widerstandsseite, abschließend ebenfalls in das Handbuch ein.

#### 4.3.1 Verkehrsbeanspruchungen

Das Schädigungspotenzial von Verkehrslasten wird maßgeblich durch den Schwerverkehr bestimmt. Die folgenden Untersuchungen bezüglich des Schädigungspotenzials von Verkehrslasten beschränken sich daher auf die Auswertungen des Schwerverkehr und der Sondertransporte. Lasten aus PKW stellen nur untergeordnete Beanspruchungen im Vergleich zum Schwerverkehr dar und werden im Hinblick auf das Schädigungspotenzial nicht weiter ausgewertet.

#### Schwerverkehr/Sondertransporte

Bild 81 zeigt die Entwicklung der Transportleistung des Schwerverkehrs (Lkw) von 1950 bis 2011. Nach der mäßigen Steigerung der Transportleistungen bis zum Jahr 1990 ist von 1990 bis 2010 eine deutlich größere Steigerungsrate zu verzeichnen.

In einem 2007 veröffentlichten Forschungsbericht des niedersächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr [FrHB07] wurden u. a. die Auswirkungen von tatsächlich aufgetretenen Verkehrs-

belastungen auf die Bemessungswerte von Brücken, die nach unterschiedlichen Brückenklassen bemessen wurden, untersucht. Die Auswirkungen, der gemessenen Einwirkungen aus dem Verkehr auf Bundesautobahnbrücken lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Einfeldsysteme bei BK 30 bis 60/30

Für Einfeldsysteme ergeben sich bei keiner Brückenklasse Überschreitungen der Bemessungswerte. Lediglich bei Brücken nach BK 30 mit größeren Spannweiten (nahezu nicht im Bestand vorhanden) sind theoretisch Defizite zu verzeichnen.

- Mehrfeldsysteme bei Brückenklasse 30, 30/30 und 45

Für Mehrfeldsysteme treten bis auf wenige Ausnahmen generell Defizite im Stützbereich auf.

- Mehrfeldsysteme bei Brückenklasse 60 und 60/30

Für Mehrfeldsysteme sind an Brücken mit einer Stützweite ab ca. 40 m bzw. 50 m Überschreitungen der Bemessungswerte zu verzeichnen.

Neben den Einwirkungen aus dem Schwerverkehr können auch Einwirkungen aus den zunehmenden Sondertransporten zu Schäden an Betonbrücken führen. In [Marz12] ist die deutliche Zunahme von

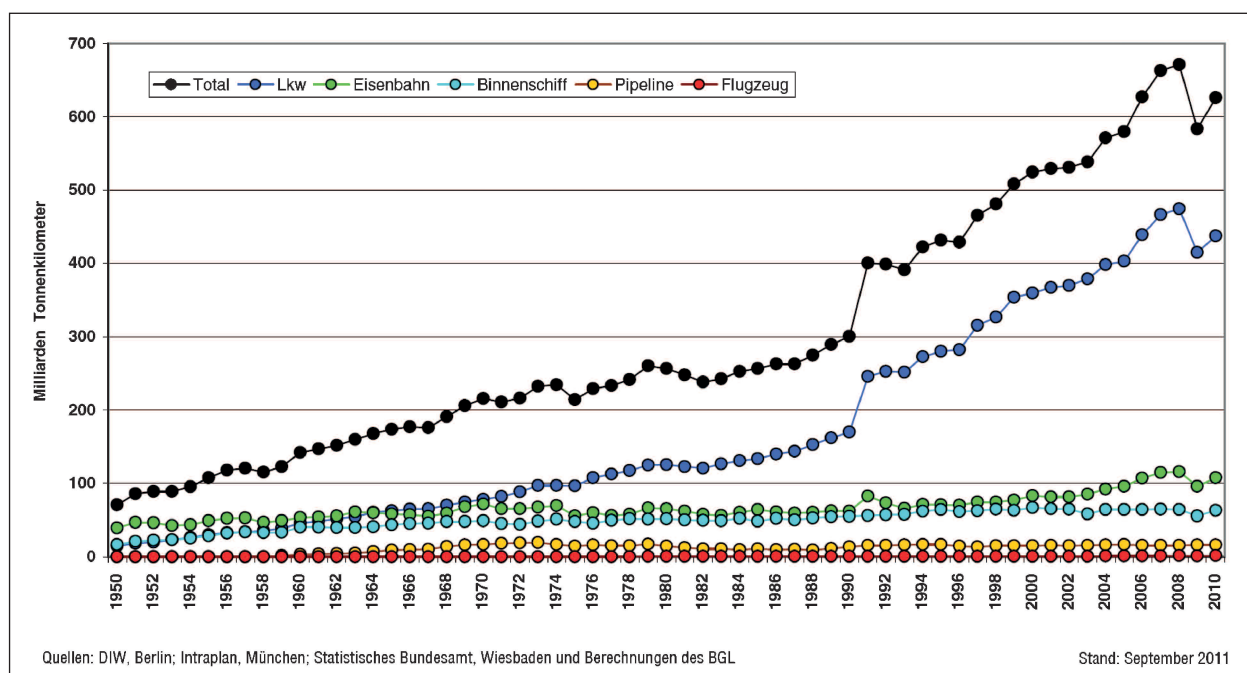


Bild 81: Entwicklung der Transportleistung unterschiedlicher Verkehrsträger im Bundesgebiet von 1950 bis 2010

Anhörungen für genehmigungspflichtige Schwertransporte dargestellt. Im Verantwortungsbereich von „Straßen.NRW“ ist die Anzahl von Anhörungen für Sondertransporte mit Gesamtgewichten > 150 t in den letzten 6 Jahren um fast das 7-fache angestiegen (2005: 163 Anhörungen, 2011: 1.103 Anhörungen). Dabei ist anzumerken, dass ein großer Teil dieser Sondertransporte nicht in den Nachtstunden auf abgesperrten Straßen durchgeführt wird, sondern im regulären Verkehr als zusätzliche Belastung für die Brücken abgewickelt wird. Die daraus resultierenden höheren Lasten, die nicht bei der Bemessung berücksichtigt wurden, können die Trag- und Gebrauchsfähigkeit sowie die Dauerhaftigkeit beeinflussen. Nach [BuSL09] können überschwere Einzellasten und höchste Gesamtgewichte für die Dauerhaftigkeit der Brückenausstattung wie z. B. Lager, Fahrbahnübergänge, Leiteinrichtungen von Bedeutung sein. Zudem können Risse in bisher ungerissenen Tragwerksbereichen, z. B. in dünnen Fahrbahnplatten oder (befahrenen) Kragarmen, infolge hoher Achslasten auftreten. Im Hinblick auf die Ermüdungsnachweise bei Betonbrücken sind jedoch ermüdungsrelevante Spannungsänderungen aufgrund der vielen Achsen und der größeren Gesamtlänge von Schwertransporten nach [BuSL09] nicht zu erwarten.

Einwirkungen aus Verkehr stellen neben den Schädigungspotenzialen für die statische Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit insbesondere auch Schädigungspotenziale für die Ermüdungssicherheit von Brücken dar. Ein wesentliches Schädigungspotenzial im Hinblick auf die Einwirkungen auf Brücken geht von den ermüdungsrelevanten Beanspruchungen des Schwerverkehrs aus. Untersuchungen am IfM [BuSL09] haben gezeigt, dass bei Fahrzeugen mit einem Gesamtgewicht  $\geq 30$  t mit einer ermüdungsrelevanten Spannungsänderung zu rechnen ist. Besonders im Bereich von Spanngliedkopplungen können Brücken mit Baubeginn vor 1977 grundsätzlich eine ungenügende Ermüdungssicherheit aufweisen. Darüber hinaus können bei Brücken mit Baubeginn bis etwa 1981 grundsätzlich Biegerisse mit großen Rissweiten in Feldbereichen von Spannbetonbrücken auftreten, die sich negativ auf die Dauerhaftigkeit und insbesondere die Ermüdung der Bauwerke auswirken [BuSL09]. Nach dem in [BuSL09] gemessenen derzeitigen Verkehrsaufkommen weisen Haupttragwerke, die nach Brückenklasse 60 bemessen wurden noch gewisse Sicherheitsreserven in Bezug auf die Ermüdungssicherheit auf. Abschnittsweise hergestellte Brückenbauwerke, die auf Lehrge-

rüsten oder Vorschubrüstungen vor 1970 hergestellt wurden, haben jedoch die Auslastungsgrenze im Bereich der Koppelfugen nahezu erreicht. Laut [NoBR02] stellen zudem Stahlbetonbrücken, die gemäß BK 60/30 bemessen wurden, Spannbetonbrücken mit voller Vorspannung nach DIN 4227, die gemäß BK60/30 bemessen wurden, sowie Spannbetonbrücken mit beschränkter Vorspannung nach DIN 4227, die gemäß BK 60/30 bemessen wurden keine ermüdungsgefährdeten Bauwerke dar.

Untersuchungen in [GrHL07] haben darüber hinaus gezeigt, dass die Auswirkungen des zunehmenden Schwerverkehrs auf die Ermüdungsbeanspruchung von Brücken abhängig von einer Vielzahl von Einflussgrößen, wie z. B. der Stützweite, den Querschnittsabmessungen und den Bewehrungsgehalten sind. Insbesondere die Lastmodelllänge bzw. das Verhältnis der Modelllänge zur Stützweite und das Gesamtgewicht des Lastmodells haben großen Einfluss auf die globalen Beanspruchungen der Brücke. Daher ist eine Übertragbarkeit von Ergebnissen untersuchter Brücken auf den Gesamtbestand nicht generell möglich. Die in [GrHL07] untersuchten Brückenbauwerke weisen im Allgemeinen eine ausreichende Sicherheit gegen Ermüdung auf. Bei bestimmten Querschnittsformen können sich jedoch Grenzwertüberschreitungen ergeben. In Brückenlängsrichtung führen z. B. Querschnitte mit kleiner Zugzonenbreite (z. B. Plattenbalken mit hohen Stegen) zu hohen Ausnutzungsgraden des Bewehrungs- und Spannstahls. Die Bewehrung in der Zugzone wird dabei, aufgrund der weit oben im Querschnitt liegenden Spannungsnulllinie, hohen Spannungsschwingbreiten ausgesetzt. Das Schädigungspotenzial infolge ermüdungsrelevanter Einwirkungen bei Fahrbahnplatten und Kragarmen ist wesentlich davon abhängig, ob diese in Querrichtung vorgespannt sind und ob die Kragarme befahren sind. Quervorgespannte Querschnitte sind i. d. R. nicht ermüdungsgefährdet. Die Spannungsschwingbreiten von nicht vorgespannten Fahrbahnplatten hingegen können die zulässigen Grenzwerte, aufgrund der i. A. gerissenen Querschnittsbereiche, zum Teil überschreiten.

Neben den zuvor beschriebenen Auswirkungen, die maßgeblich die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Tragsystems beeinflussen, wirken sich die gestiegenen Verkehrslasten auch direkt auf die Verschleißteile der Brücke aus. Zu den Verschleißteilen bei Brücken gehören Brückenlager, Übergangskonstruktionen Belag und Abdichtung sowie Brückenkappen. Die Verschleißteile werden durch die

stetige Zunahme des Schwerverkehrs, insbesondere auf den Bundesfernstraßen, hoch belastet und weisen somit ein erhebliches Schädigungspotenzial auf. Schäden an diesen Teilen können zu schwerwiegenden Folgeschäden führen und insbesondere die Verkehrssicherheit gefährden. Die Auswertungen der tatsächlichen Schäden aus der Datenbank belegt die, im Vergleich zu anderen Schäden der Brückenausrüstung, hohe Anzahl an relevanten Schäden am Fahrbahnbelag. Diese Schäden beeinflussen mehrheitlich die Dauerhaftigkeit, wirken sich aber auch auf die Verkehrssicherheit der Bauwerke aus.

### **Einfluss des Schwerverkehrs anhand vorliegender DTV-SV Daten**

Zur Abschätzung des Schädigungspotenzials von Verkehrslasten wurden von der BASt zusätzlich zur Schadensdatenbank (Brücken von 1935-2010) Verkehrszahlen in Form der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV-Zahlen) zur Verfügung gestellt. Nach der Zuordnung der DTV-Zahlen zu den entsprechenden Brücken ergibt sich eine Datengrundlage zur Berücksichtigung der Verkehrslasten von insgesamt 40.042 Schäden an 1.104 Brücken (ursprünglich 43.605 Schäden an 1.312 Brücken).

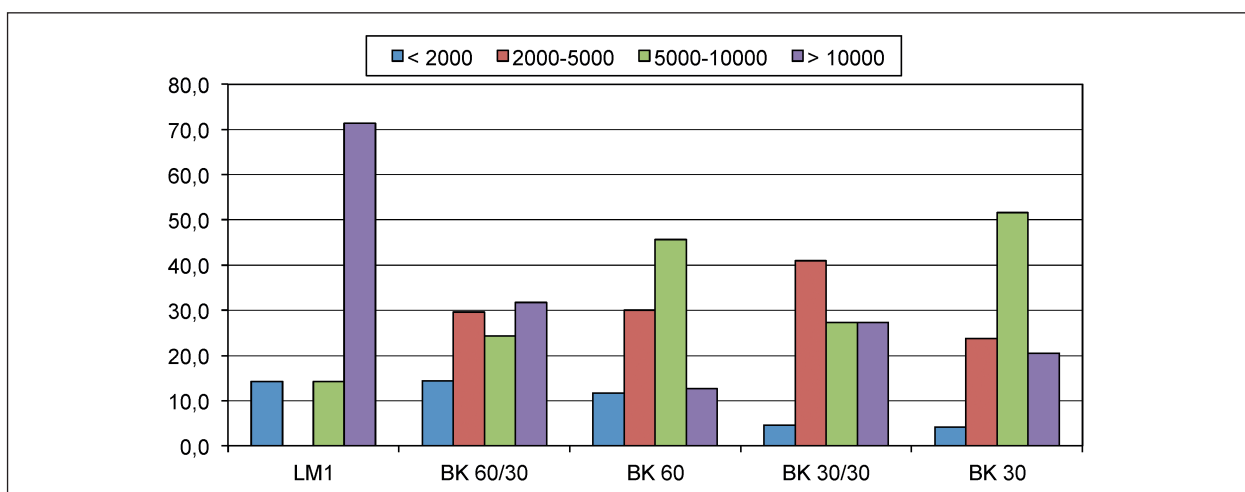
Da das Schädigungspotenzial von Verkehrslasten maßgeblich durch den Schwerverkehr bestimmt wird, wurde bei der Auswertung die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der Fahrzeugarten des Schwerverkehrs (DTV-SV) als Kriterium zugrunde gelegt. Zur Beurteilung des Einflusses unterschiedlicher Verkehrsstärken, wurden die DTV-SV-Zahlen dabei in vier Gruppen unterteilt:

- $DTV-SV < 2.000$ ,
- $2.000 \leq DTV-SV < 5.000$ ,
- $5.000 \leq DTV-SV < 10.000$ ,
- $DTV-SV \geq 10.000$ .

### **Einfluss der Verkehrsbelastung in Abhängigkeit der Brückenklasse**

In einem ersten Schritt wird die Verteilung des Schwerverkehrsanteils für die bei der Planung angesetzten Brückenklassen dargestellt. Das Schädigungspotenzial der unterschiedlichen Brückenklassen wird dabei, auf der Grundlage des Ziellastniveaus der Nachrechnungsrichtlinie ([BMVBS11]), bewertet. Bild 82 zeigt die Verteilung des Schwerverkehrsanteils für die jeweilige Brückenklasse.

Bei der Bewertung des Schädigungspotenzials im Hinblick auf das Ziellastniveau der Nachrechnungsrichtlinie ergeben sich für Brücken, die gemäß LM1, BK 60/30 und BK 60 bemessen wurden, keine grundsätzlichen Defizite bezüglich der Verkehrsstärke des Schwerverkehrs. In Abhängigkeit der Anforderungen für das bei der Bemessung angesetzte Lastmodell kommt es zu einem Rückgang des Anteils von Brücken mit hohen Verkehrsstärken ( $> 10.000$  SV-Fzg./Tag). Im Gegensatz dazu ist die Verteilung der Verkehrsbelastung bei Brücken, die nach BK 30/30 und BK 30 bemessen wurden, im Hinblick auf das Ziellastniveau bei der Brückennachrechnung kritisch zu beurteilen. Insbesondere der Anteil hoher Verkehrsstärken (ab 5.000 SV-Fzg./Tag) ist im Vergleich zu den niedrigeren Verkehrsbelastungen (unter 5.000 SV-Fzg./Tag) sehr groß. Die Auswertung bezüglich des Schwer-



**Bild 82:** Verteilung der Schwerverkehrsanteils in Abhängigkeit der Brückenklasse



verkehrsanteils gibt somit einen Hinweis auf vorhandene Defizite bei Brücken, die gemäß Brückenklasse BK 30/30 und BK 30 bemessen wurden.

#### Auswertung der DTV-SV-Daten bezüglich der Schadensbewertungen

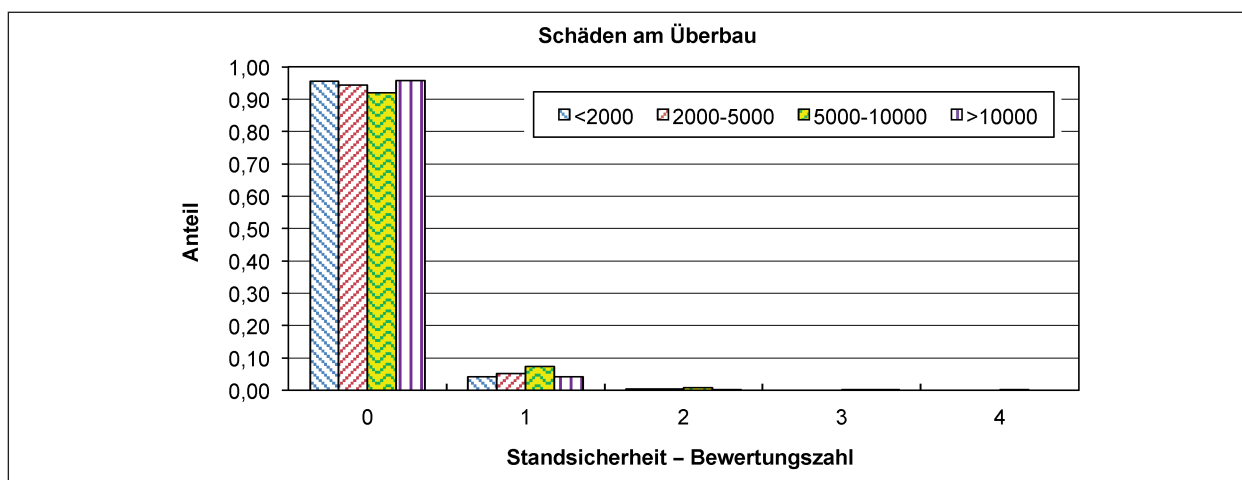
Zur Bewertung des Schädigungspotenzials sollen die Auswirkungen des Schwerverkehrs auf die tatsächlich aufgetretenen Schäden erarbeitet werden. Die gemäß den Bewertungszahlen nach RI-EBW-PRÜF ausgewerteten Schäden werden dazu getrennt für die Merkmale Standsicherheit und Dauerhaftigkeit den unterschiedlichen Verkehrsstärken des Schwerververkehrs zugeordnet. Somit ergeben sich für die unterschiedlichen Verkehrsstärken (DTV-SV) jeweils die Verteilungen der Schadensbewertungszahlen von 0 (beste Schadensbewertung) bis 4 (schlechteste Schadensbewertung). Die

Bewertung des Schädigungspotenzials erfolgt mithilfe der Auswertung der Schadensverteilungsdiagramme von Schäden am Überbau sowie im speziellen von Risschäden am Überbau.

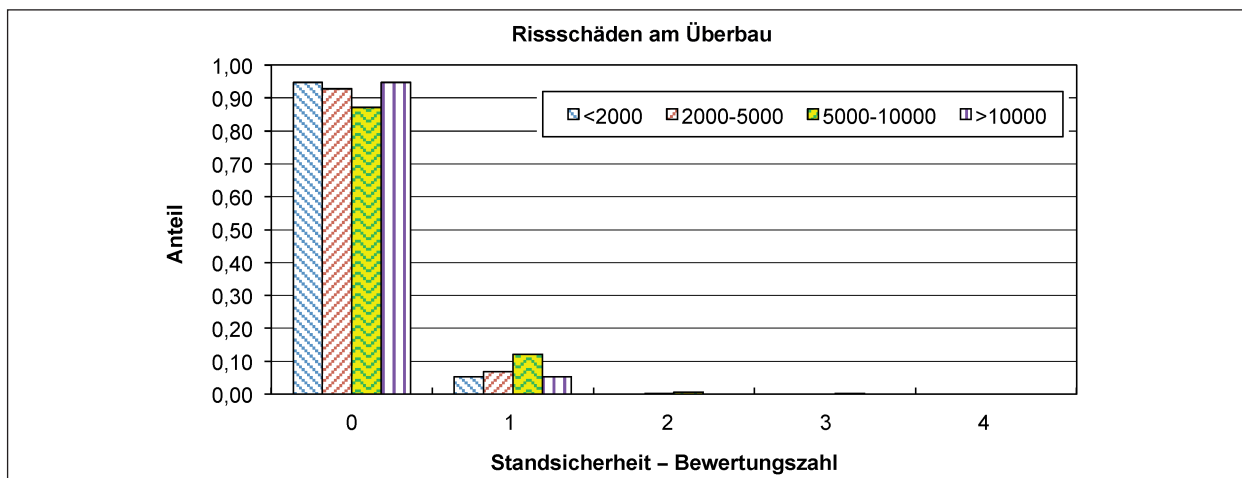
#### Standsicherheit

Die Auswertungen belegen, dass es mit zunehmendem Schwerverkehrsaufkommen zu einer leichten Verschlechterung der Schadensbewertung (von „0“ zu „1“) kommt. Lediglich für einen Schwerverkehrsanteil über 10.000 Fzg./Tag nimmt die Bewertungszahl leicht ab. Der Grund für diese Abnahme ist, dass der größte Anteil dieser Brücken gemäß Lastmodell 1 bemessen wurde und somit generell wenige Schäden aufweist (s. Bild 83 und Bild 84).

Insgesamt ist jedoch kein Anstieg für den Anteil relevanter Schäden (Bewertungszahl  $\geq 2$ ) in Abhän-



**Bild 83:** Schadensverteilung von standsicherheitsrelevanten Schäden am Überbau bezüglich des Schwerverkehrs (Grundlage: 9.974 Schäden an 993 Brücken)



**Bild 84:** Schadensverteilung von standsicherheitsrelevanten Risschäden am Überbau bezüglich des Schwerverkehrs (Grundlage: 2.895 Schäden an 656 Brücken)



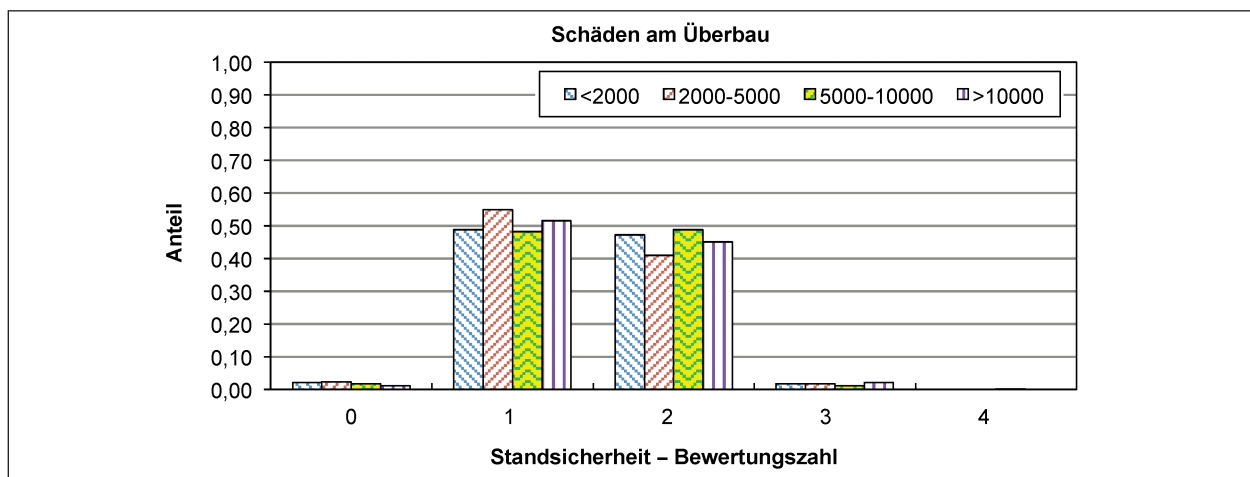
gigkeit des Schwerverkehrsanteils erkennbar, so dass auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Daten kein negativer Einfluss in Abhängigkeit des Schwerverkehrsaufkommens hinsichtlich der Standsicherheit festzustellen ist. Dabei ist anzumerken, dass der Anteil an standsicherheitsrelevanten Schäden (Bewertungszahl  $\geq 2$ ) insgesamt mit unter 1 % der Gesamtschäden sehr gering ist (vgl. Kapitel 2.2.9).

### Dauerhaftigkeit

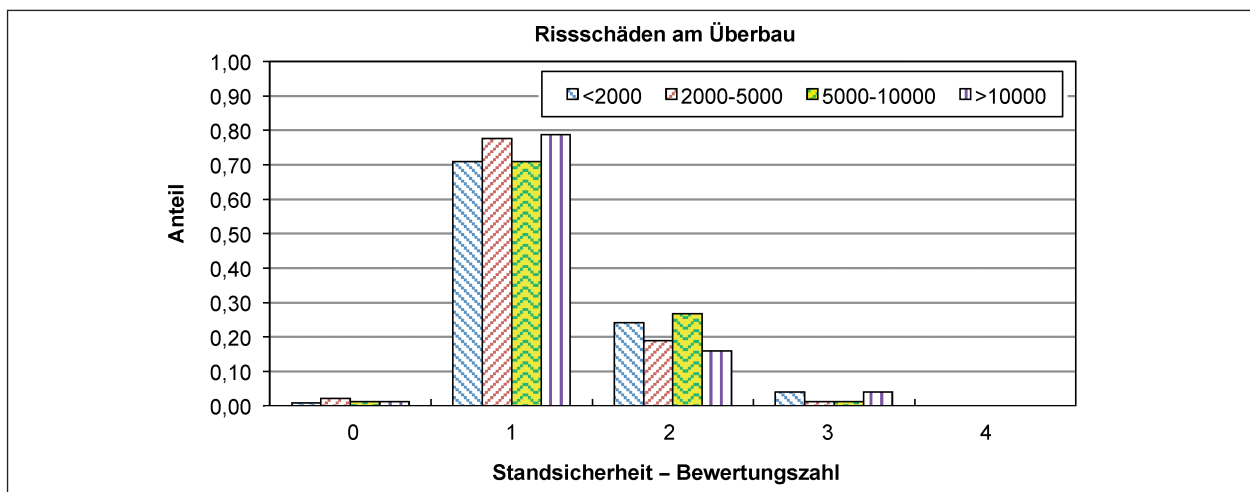
Abweichend zum Merkmal der Standsicherheit ist der Anteil von relevanten Schäden bezüglich der Dauerhaftigkeit (Bewertungszahl  $\geq 2$ ) insgesamt mit bis zu ca. 50 % deutlich höher (vgl. Tabelle 3, Kapitel 2.2.9). Risschäden am Überbau werden sogar in ca. 5 % der Schadensfälle mit der Scha-

denzahl „3“ bewertet. Dies bedeutet eine mittelfristige Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit und macht eine kurzfristige Schadensbeseitigung nach RI-EBW-PRÜF erforderlich (s. Bild 85 und 86).

Die Auswertung der DTV-SV-Zahlen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit zeigt, anders als bei der Auswertung für die Standsicherheit, keine eindeutige Tendenz einer direkten Abhängigkeit von der Verkehrsstärke. Es sind zwar Unterschiede in der Verteilung der Schadensbewertungen bezüglich der Verkehrsstärke, besonders bei der Auswertung von Rissen am Überbau erkennbar, jedoch nehmen die Schadensbewertungen nicht mit steigender Verkehrsstärke zu. Anhand der vorliegenden Schadensauswertung lässt sich somit kein negativer Einfluss für die Dauerhaftigkeit von Brücken infolge höherer Verkehrsbelastung belegen.



**Bild 85:** Schadensverteilung von dauerhaftigkeitsrelevanten Schäden am Überbau bezüglich des Schwerverkehrs (Grundlage: 9.974 Schäden an 993 Brücken)



**Bild 86:** Schadensverteilung von dauerhaftigkeitsrelevanten Risschäden am Überbau bezüglich des Schwerverkehrs (Grundlage: 2.895 Schäden an 656 Brücken)

### Zukünftige Verkehrsentwicklungen/„GigaLiner“

Nach der vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vorgelegten Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025 [BMVBS07] soll das Verkehrsaufkommen ausgehend vom Stand des Jahres 2004 bis zum Jahr 2025 für den motorisierten Personenverkehr um ca. 7 % und für den Straßengüterfernverkehr um ca. 55 % steigen.

Um diese steigenden Güterverkehrsmengen zukünftig effizient zu befördern, steht derzeit die Einführung neuer bzw. größerer Transportfahrzeuge in der Diskussion. Dabei werden nach [FrHB07] die folgenden zwei Fahrzeugkombinationen näher begutachtet:

- Fahrzeugkombination 1: Konventioneller 12 m langer Lastkraftwagen mit einem Anhänger bestehend aus einem Dolly (Doppelachse mit Zugvorrichtung und Sattelkupplung) und einem darauf aufgesatteltem Sattelaufleger.
- Fahrzeugkombination 2: Konventioneller Sattelzug mit 16,5 m Länge (Sattelzugmaschine mit einem 13,6 m langen Sattelaufleger) und einem 7,8 m langen Anhänger.

Diese beiden Fahrzeugkombinationen werden als „GigaLiner“ bezeichnet und haben jeweils eine Gesamtlänge von 25,25 m und ein zulässiges Gesamtgewicht von bis zu 60 t. Gegenüber herkömmlichen bzw. derzeitigen Fahrzeugkombinationen ist mit den „GigaLinern“ eine Erhöhung des Transportvolumens um bis zu 50 % möglich. Um die Auswirkungen des Einsatzes dieser „Gigaliner“ auf das Straßennetz zu beurteilen, wurden und werden verschiedene Untersuchungen durchgeführt (z. B. [FrHB07, Geiß09]). Derzeit wird zudem ein Feldversuch mit sog. „Long-Linern“ durchgeführt, die bei gleichen Abmessungen wie „GigaLiner“ auf ein zulässiges Gesamtgewicht von 40 t beschränkt sind. Bei dem Feldversuch werden primär die Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und die Eignung dieser Fahrzeuge innerhalb des Straßenverkehrs beurteilt. Aufgrund derselben Gewichtsbeschränkung wie bei den derzeit zugelassenen Transportfahrzeugen ist im Hinblick auf die Merkmale Standortsicherheit und Dauerhaftigkeit kein erhöhtes Schädigungspotenzial infolge der „Long-Liner“ zu erwarten.

In [Geiß09] wurde z. B. untersucht, welche Auswirkungen die Zulassung von 60-t-Lkw auf die Tragfähigkeit bestehender Brücken hat.

Mithilfe von Verkehrssimulationsrechnungen wurden die Beanspruchungen von verschiedenen Brückensystemen mit unterschiedlichen Anteilen der „Giga-Liner“ erarbeitet. Die Ergebnisse der Simulationsrechnung wurden den Ergebnissen der Berechnung infolge der normierten Verkehrslasten nach DIN 1072 (BK 60/30, BK 30/30, BK 60, BK 45 und BK 30) gegenübergestellt. Als Brückenquerschnitt wurde im Rahmen der Vergleichsrechnung ein typischer 2-stegiger Plattenbalken mit zweispurigem Überbau gewählt. Die Auswertung der Ergebnisse führte, in Abhängigkeit der Stützweiten, zu folgenden Erkenntnissen:

- **Einfeldsysteme**

Für einfeldrige Brückenkonstruktionen bis ca. 50 m Feldlänge ist die Tragfähigkeit für die Beanspruchungen infolge eines 60-t-Lkw für Brücken, die gemäß der Brückenklassen BK 60/30, BK 60 und dem Lastmodell 1 (LM1) bemessen wurden, noch ausreichend.

- **Zweifeldsysteme**

Für Brücken mit Feldlängen kleiner als ca. 20 m ist die Tragfähigkeit für die Beanspruchungen infolge eines 60-t-Lkw für Brücken, die gemäß der Brückenklassen BK 60/30, BK 60 und dem Lastmodell 1 (LM1) bemessen wurden, ungefähr noch ausreichend.

Bei Brücken mit Stützweiten größer als ca. 20 m führen die Beanspruchungen infolge eines 60-t-Lkw zu deutlichen höheren Schnittgrößen für Brücken, die gemäß den Brückenklassen nach DIN 1072 (BK 60/30, BK 30/30, BK 60, BK 45 und BK 30) bemessen wurden.

Für Brücken mit Einzelstützweiten zwischen ca. 30 m und ca. 60 m sind die Bemessungswerte für die Stützmomente bei der Beanspruchung infolge eines 60-t-Lkw bereits für Brücken, die nach dem Lastmodell 1 (LM1) bemessen wurden, überschritten.

Weitere Untersuchungen zur Auswirkungen auf die Tragfähigkeit von Brücken durch die Belastung der höheren Fahrzeuggewichte von „GigaLinern“ im Vergleich zu konventionellen Transportfahrzeugen wurden im Rahmen von Simulationsrechnungen in [FrHB07] durchgeführt. Dabei wurde unter Berücksichtigung eines Schwerverkehrsanteils von 15 % auf dem Überholstreifen, zwischen der Verkehrs-

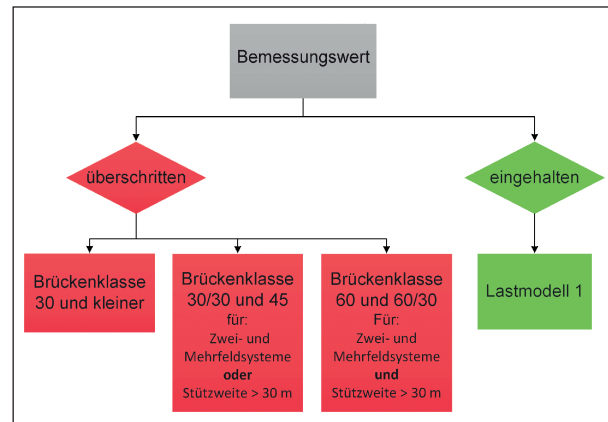
situation „fließender Verkehr“ und der Verkehrssituation „Verkehr mit höherem Stauanteil“ unterschieden.

Die Ergebnisse der Simulation unter „fließendem Verkehr“ zeigen, dass sich die Feldmomente bei Einfeldträgern bis zu 25 % und die Stützmomente bei Mehrfeldträgern bis zu 45 % infolge der 60-t-Lastzugkombinationen im Vergleich zum aktuell gemessenen Verkehr erhöhen. In Abhängigkeit des Lastmodells (Brückenklasse) ergaben sich darüber hinaus folgende Erkenntnisse (vgl. Bild 87):

- Brückenklasse 30 und kleiner  
Für alle untersuchten Systeme und Stützweiten ergeben sich Beanspruchungen, die oberhalb der Bemessungswerte liegen.
- Brückenklasse 30/30 und 45  
Für Einfeldsysteme ab einer Stützweite von ca. 30 m und für Zwei-/Mehrfeldsysteme ergeben sich Beanspruchungen, die oberhalb der Bemessungswerte liegen.
- Brückenklasse 60 und 60/30  
Für Zwei-/Mehrfeldsysteme ab einer Stützweite von ca. 30 bzw. 40 m ergeben sich Beanspruchungen, die oberhalb der Bemessungswerte liegen.
- Lastmodell 1  
Das LM1 deckt die Beanspruchungen aus den 60-t-Lastzugkombinationen ab.

Neben der Auswertung im Hinblick auf die Tragfähigkeit von Brückenbauwerken wurden in [FrHB07] auch die Auswirkungen auf die Schädigung der Straße bzw. der Fahrbahnoberfläche untersucht. Daraus lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- Mit einer Gefahr von früher einsetzender Spurrinnenbildung in Asphaltdecksichten infolge der Zulassung von „Giga-Linern“ ist nicht zu rechnen.
- Die höhere relative Achsenzahl der „Giga-Liner“ führt, aufgrund der geringeren Achslasten, zu einer Reduzierung der Straßenbeanspruchung und damit zu geringeren Schäden am Straßenkörper.
- Infolge der „Giga-Liner“ würde sich somit zunächst keine Reduzierung der Nutzungsdauer von Straßenaufbauten ergeben.



**Bild 87:** Auswirkungen der Bemessung unter Berücksichtigung einer 60-t-Lastzugkombination

Die Ausführungen beruhen dabei jedoch auf der Annahme gleichbleibender Transportleistung. Geht man jedoch davon aus, dass für die Abwicklung derselben Transportleistung weniger Fahrzeuge benötigt werden, ergeben sich neue potenzielle Kapazitäten auf den Straßen. Aufgrund der Prognosen der deutlich steigenden Anzahl von Schwertransporten kann man davon ausgehen, dass diese freien Kapazitäten wieder aufgebraucht werden und die Straßen sowohl von mehr Fahrzeugen als auch von größerem Transportvolumen beansprucht werden. Dieser Effekt würde dazu führen, dass die Straßenbefestigung in Zukunft absolut gesehen (also in Jahren) früher und relativ gesehen (nach Transportleistung) später geschädigt würde. Abschließend wird in [FrHB07] festgehalten, dass negative Auswirkungen auf die Straßenschädigung nur durch die Erhöhung der zulässigen Fahrzeuggewichte zu erwarten sind. Negative Auswirkungen infolge längerer Fahrzeuge mit 7 bzw. 8 Achsen sind nicht zu erwarten.

#### 4.3.2 Temperatur

Wesentliche Einwirkungen aus Temperatur ergeben sich für Brücken, abgesehen von den herstellungsbedingten Temperaturzuständen (z. B. Hydratationswärme, Aufbringen von Gussasphalt), aus den täglich und jahreszeitlich veränderlichen und von der geografischen Lage abhängigen Witterungsverhältnissen. Bild 88 zeigt das aus den meteorologisch bedingten Einwirkungen resultierende Temperaturprofil aus dem DIN-Fachbericht 101.

Im Allgemeinen braucht dabei nur der Ansatz des konstanten Temperaturanteils  $\Delta T_N$  (verursacht Längsverformungen) und des linear veränderlichen Temperaturanteils in der x-y-Ebene  $\Delta T_{My}$  (verur-

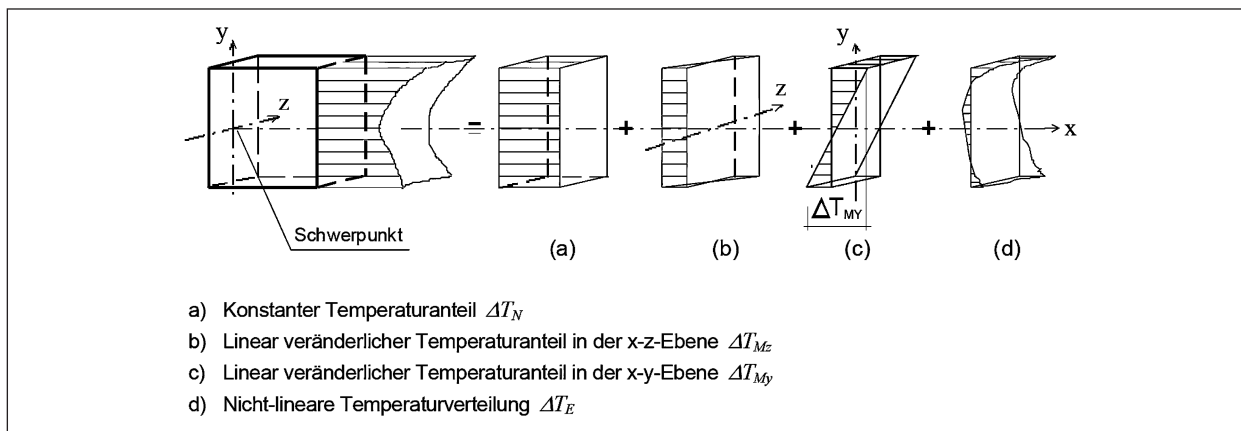


Bild 88: Anteile des Temperaturprofils (aus DIN FB 101:2009)

sacht Krümmungen) für die Bemessung berücksichtigt zu werden. Da der Ansatz des linear veränderlichen Temperaturanteils (Erwärmung der Oberseite gegenüber der Unterseite) erst im Jahr 1979 in der Bemessungsnorm für Spannbetonbauteile eingeführt und 1985 (in der DIN 1072) sowie 2001 (im DIN FB 101) nochmals angepasst wurde, ist dieser im Hinblick auf die Beurteilung bestehender bzw. älterer Spannbetonbrücken von besonderem Interesse. Beide Anteile können aufgrund der behinderten Verformung bei statisch unbestimmten Systemen Schnittgrößen hervorrufen und somit zu Spannungen in Brückenquerschnitt führen. Nach [KöMZ86] stellt der bis zum Jahr 1979 in der Bemessung nicht berücksichtigte lineare Temperaturunterschied eine wesentliche Ursache für die Rissbildung bei Spannbetonbrücken, die als Durchlaufträger ausgebildet sind, dar. Nach [Have00] kann sich daraus bei älteren Spannbetonbrücken eine relevante, in der Bemessung nicht berücksichtigte Einwirkung ergeben, welche die Größenordnung des Lastfalls Verkehr haben und die Betonzugfestigkeit entlang der Brückenunterseite überschreiten kann. Daraus ergeben sich über den gesamten Überbau unplanmäßige Risse, die sich zuerst in den Koppelfugen (erfahrungsgemäß die Schwachstellen des Überbaus) bilden [Have00]. Untersuchungen vom IfM an rund 50 Brückenbauwerken mit unterschiedlichen Querschnitten haben gezeigt, dass sich an Hohlkastenbrücken im Vergleich zu Plattenbalken- und Plattenbrücken eher kleinere Temperaturgradienten ergeben [BuLu06]. Mit Bezug auf die Bemessungsvorschriften ergibt sich somit für Hohlkastenbrücken mit einem Baubeginn nach 1979 in der Regel eine ausreichende Sicherheit bezüglich des linearen Temperaturgradienten. Dies belegt auch die Auswertung der tatsächlich aufgetretenen Risschäden an Überbauten von

Spannbetonbrücken im Rahmen der Datenbankauswertung. Es zeigt sich ein signifikanter Rückgang der Schädigungshäufigkeit bei Brücken mit einem Baubeginn nach 1979, also ab dem Jahr, in dem der lineare Temperaturgradient in der Bemessung berücksichtigt wurde.

### 4.3.3 Umgebungsbedingungen (Chloride/CO<sub>2</sub>)

Der bedeutendste Schadenstyp im Hinblick auf die Tragfähigkeit von Stahl- und Spannbetonbrücken ist im Allgemeinen die Korrosion der Bewehrung. Neben der Rissbildung sind eindringenden Chloride und der Eintrag von CO<sub>2</sub> die maßgebenden bzw. relevanten Einwirkungen für Betonbrücken aus den Umgebungsbedingungen, die zur Korrosion von Bewehrungsstahl führen können.

#### Chloride

Chloride können sowohl zur Schädigung des Betongefüges bei Frost-Tausalz-Angriff (siehe folgendes Kapitel) als auch zur (chloridinduzierten) Korrosion der Bewehrung führen. Bei der chloridinduzierten Korrosion bilden sich Makroelemente infolge einer elektrochemischen Reaktion aus, welche zu einer lokal begrenzten aber sehr schnell fortschreitenden Korrosion der Bewehrung führen. Diese sogenannte „Lochfraßkorrosion“ ist aufgrund der geringen Menge an Korrosionsprodukten (lokal begrenzte Schädigung) von außen nur schwer erkennbar. Nach internationalen Untersuchungen verursacht die Korrosion von Beton- und Spannstahl, hervorgerufen durch eingedrungene Chloride, rund 66 % aller festgestellten Schäden an Brücken [DaSS08]. Die häufigste Beanspruchung ergibt sich bei Brücken aus den eingesetzten Tausalzen (in der Regel Natriumchlorid) zur Bekämp-



fung von Schnee und Eis in den Wintermonaten. Eine von der BAST durchgeführte und vom IfM begleitete Länderbefragung ergab, dass der Einsatz von Tausalz mit einem höheren Magnesiumsalz-Anteil größere Schäden verursacht als andere Taumittel [ScPS10]. Chloride können jedoch auch bereits bei der Herstellung des Betons in den Ausgangsstoffen vorhanden sein, werden aber in der Regel durch entsprechende Vorschriften auf unwirksame Größenanteile begrenzt. Durch mangelhafte Betondeckung oder Risse im Beton können Chloride von außen in den Beton eindringen und bis zur Bewehrung gelangen. So treten Korrosionserscheinungen infolge Chloridangriff meist dann auf, wenn Durchfeuchtungen von Bauteilen auftreten. Die Gefahr von eindringendem Wasser mit gelösten Chloriden besteht daher besonders bei Abdichtungen, Fahrbahnbelägen/Fahrbahnplatten, Fahrbahnübergängen und der Entwässerung.

## CO<sub>2</sub>

Das in der Luft mit einem Anteil von ca. 0,04 Vol.-% enthaltene Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) diffundiert von der Betonoberfläche in das Porensystem des Betons und führt in der Folge zur Karbonatisierung. Bei der karbonatisierungsinduzierten Korrosion bilden sich in einem elektrochemischen Vorgang Mikroelemente aus, welche die gesamte Stahloberfläche überziehen und zu einer flächigen Korrosion des depassivierten Betonstahls führen. Als Folge der Depassivierung kann jedoch erst bei ausreichendem Feuchtigkeits- und Sauerstoffangebot eine Korrosion der Bewehrung auftreten. Die Schäden zeigen sich dann in Form von Rissen oder schalenförmigen Betonabplatzungen und können bei entsprechendem Korrosionsfortschritt die Tragfähigkeit des Bauteils gefährden. Durch Poren und Fehlstellen im Betongefüge kann der Fortschritt der Karbonatisierungsfront dabei deutlich beschleunigt werden. Bei falscher Zusammensetzung des Betons, falscher Verarbeitung (mangelhafter Verdichtung) oder mangelhafter Nachbehandlung kann die erforderliche Dichtigkeit der Betonoberfläche verhindert werden. Neben diesen Faktoren haben auch die Umgebungsbedingungen einen großen Einfluss auf die Karbonatisierungstiefe. Luftfeuchten von 50-70 % stellen begünstigende Werte für die Ausbildung der Karbonatisierung dar.

Bei der (visuellen) Bauwerksprüfung kann die Färbung der Rostfahnen Aufschluss über die Art der Bewehrungskorrosion geben. Eine chloridinduzierte Korrosion tritt zumeist durch schwarz ge-

färbte Rostfahnen zutage, wohingegen rote bis braune Rostfahnen auf eine karbonatisierungsinduzierte Korrosion hinweisen.

### 4.3.4 Frost-/Frost-Tausalz-Angriff

Bei der Schädigung infolge Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff handelt es sich um komplexe mikroskopische und makroskopische Wechselwirkungen, die im Zusammenhang mit dem Gefrierverhalten der Porenflüssigkeit stehen [StWi95]. Die durch Frost-Tauwechsel verursachten Schäden lassen sich prinzipiell in zwei Arten unterscheiden. Zum einen die Oberflächenabwitterung und zum anderen eine innere Gefügeschädigung. Die häufigste Schadensart des Frostangriffs ist nach [VDZ02] die Oberflächenabwitterung, also das Herauslösen oder Absprengen dünner Schichten des Betons. Auch lokale Abplatzungen an oberflächennahen Gesteinskörnungen (sogenannte „pop-outs“) werden der Oberflächenabwitterung zugeordnet und entstehen durch einen unzureichenden Verbund zwischen Betonmatrix und Gesteinskörnung oder durch nicht frostbeständige Gesteinskörnung. Diese äußere Schädigung infolge Oberflächenabwitterung kann zum Eindringen von schädlichen Substanzen in den Beton und zum Freilegen der Bewehrung führen und somit in erster Linie die Dauerhaftigkeit des Bauteils beeinflussen. Die größte Schädigungsrelevanz geht von einem gleichzeitigen Auftreten von Frost und der Beaufschlagung von Chloriden in Form von Tausalzen aus. Die wiederholten Frost-Tau-Wechsel von Beton führen zu einer deutlichen Beschleunigung der Zerstörung innerhalb der Betonstruktur. Im Gegensatz dazu kann die innere Gefügeschädigung, also die fortschreitende Zerstörung des tieferliegenden Betongefüges, die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Betons beeinträchtigen und somit sowohl die Dauerhaftigkeit als auch die Standsicherheit des Bauteils herabsetzen. Der Schädigungsprozess kann dabei im Frühstadium optisch nicht erkannt werden und ist lediglich durch gezielte zerstörungsfreie Messungen erkennbar. Erst im weiteren Schadensverlauf werden die Gefügeschädigungen in Form von Rissen bzw. größeren scholligen Abplatzungen im Beton sichtbar.

Die Schadensauswertungen im Rahmen des Forschungsprojekts belegen eine deutliche Schadenshäufigkeit und somit auch ein nicht unerhebliches Schädigungspotenzial infolge eines Frost-/Frost-Tausalz-Angriffs in Bezug auf die Dauerhaftigkeit



bei Brückenkappen und Brückenunterbauten. Die Schäden zeigen sich dabei in Form von Abplatzungen und freiliegender Bewehrung.

#### 4.3.5 Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

Bei der Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnung kann es zu einer chemischen Reaktion mit den Alkalien der Porenlösung des Betons, die entweder aus dem Zement stammen oder von außen eingedrungen sind, kommen. Als Reaktionsprodukt dieser sog. Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) bilden sich (gelförmige) Alkalisilikate, welche bestrebt sind Wasser aufzunehmen. Bei einem erhöhten Feuchtigkeitsangebot, z. B. im Bereich der Fahrbahn, der Kappen und der Widerlager von Brücken, kommt es zu einer Volumenvergrößerung bei der Wasseraufnahme. Diese, als Treiben bezeichnete, Beanspruchung kann zu Rissen im Beton führen, die sich netzartig auf der Oberfläche ausbreiten. Liegen alkaliempfindliche Gesteinskörnungen direkt unter der Betonoberfläche kann es infolge der AKR zudem zu lokalen Abplatzungen („pop-outs“) kommen. Risse, sowie ggf. „pop-outs“ infolge einer AKR-Reaktion lassen sich jedoch optisch nicht immer von Rissen, die aufgrund anderer Einwirkungen, wie z. B. Frost-/Frost-Tausalz-Angriff oder Temperaturbeanspruchungen entstanden sind unterscheiden. Die Überprüfung der zuvor beschriebenen Schäden und die Beurteilung des Schädigungspotenzials infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion an tatsächlich aufgetretenen Schäden aus der Datenbank sind somit im Allgemeinen schwierig. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit ist das Schädigungspotenzial infolge AKR jedoch als erhöht einzuschätzen, insbesondere vor dem Hintergrund, dass betroffene Bauteile oder ganze Bauwerke oftmals ersetzt werden müssen, da eine wirtschaftliche Sanierung nicht mehr möglich ist.

Aus einer Länderbefragung der Straßenbauverwaltungen im Rahmen der Erstellung des Sachstandsberichts zu Verstärkungsverfahren [ScPS10] geht hervor, dass die Unterbauten von Brücken teilweise erhebliche Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) aufweisen. In diesen Fällen ist eine wirtschaftliche Verstärkung nicht mehr möglich, sodass die betroffenen Bauteile oder sogar ganze Bauwerke ersetzt werden müssen.

In Deutschland sind die ersten Schäden infolge AKR Ende der 1960er Jahre in Norddeutschland aufgetreten. Daraufhin wurde für den gesamten

norddeutschen Raum Opalsandstein und poröser Flint als alkaliempfindliche Gesteinskörnung nachgewiesen. Mit dem Auftreten von Schadensfällen in der ehemaligen DDR ab Mitte der 1970er Jahre wurden zudem Gesteinskörnungen aus präkambrischer Grauwacke, Kieselschiefer und vereinzelt Quarzporphyren als alkaliempfindlich eingestuft. In Südwestdeutschland sind in den Jahren 1996 bis 1998 erstmals Schäden an Betonfahrbahnen aufgetreten, die auf die Verwendung von alkaliempfindlichen Kies-Edelsplitt aus dem Bereich des Oberrheins zurückgeführt wurden. Im Folgenden traten weitere Schäden infolge AKR an Betonfahrbahnen auf, bei denen Grauwacke, Quarzporphyr und Granodiorit verwendet wurde [BMDG10].

#### 4.3.6 Spannungsrissskorrosion (SpRK)

Die Spannungsrissskorrosion beschreibt die Rissausbreitung im Spannstahl infolge einer gleichzeitigen mechanischen Zugbeanspruchung und eines korrosiven Mediums. Der Riss breitet sich dabei von innen nach außen, ohne eine Brucheinschnürung im Spannstahl aus.

Untersuchungen von [MoSc00] und [NüBe00] haben gezeigt, dass Zugschwellenbeanspruchungen und Zusatzdehnungen infolge einer Nutzungsänderung oder einer Lasterhöhung die SpRK-Empfindlichkeit von Spannstählen auffällig vergrößern. Diese Untersuchungen wurden jedoch unter korrosiven Umgebungsbedingungen durchgeführt, die in der Regel bei Brückenbauwerken nicht in diesem Maße vorliegen. Trotzdem ist die Zunahme der SpRK-Empfindlichkeit vor dem Hintergrund des zunehmenden Schwerverkehrs kritisch zu beurteilen. Die Gefahr, die von spannungsrissskorrosionsempfindlichen Spannstählen ausgeht, ist ein unmerklich fortschreitender Spannstahlausfall. Zur Überprüfung, ob sich der sukzessive Spannstahlausfall durch Rissbildung am Bauwerk zeigt und somit einen drohenden Biegebruch rechtzeitig ankündigt, oder ob es zu einem plötzlichen und unangekündigten Biegebruch führen kann, wurden im Jahr 1993 vom Bundesministerium für Verkehr Empfehlungen zur Nachrechnung veröffentlicht.

Insgesamt ist das Schädigungspotenzial infolge einer Spannungsrissskorrosion als hoch einzuschätzen, sobald ein spannungsrisssgefährdeter Spannstahl vorliegt. Daraus ergibt sich auch die Notwendigkeit für Brücken, bei denen solche Spannglieder zum Einsatz kamen, das Ankündigungsverhalten rechnerisch nachzuweisen.

#### 4.3.7 Feuchte

Das Schädigungspotenzial von Wasser lässt sich grundsätzlich in zwei Aspekte unterteilen. Zum einen geht das Schädigungspotenzial von Wasser als Voraussetzung oder Verstärkung von anderen Schädigungsvorgängen (z. B. karbonatisierungs- oder chloridinduzierte Korrosion der Bewehrung, Frost-Tau-Angriff usw.) aus. Der Korrosionsprozess der Bewehrung wird beispielsweise erst bei der Anwesenheit von Feuchte initiiert oder im Fall des Frost-Tau-Angriffs wird die Schädigung durch Wasser noch verstärkt. Zur Beurteilung des Schädigungspotenzials von Feuchte kann die Durchfeuchtung von Bauteilen als Indikator herangezogen werden. Die Schadensauswertung relevanter Schäden im Rahmen des Projekts belegt, dass der Brückenunterbau insgesamt deutlich häufiger von Durchfeuchtungen betroffen ist als andere Bauwerksteile. Gefährdete Bereiche in denen Wasser in die Konstruktion eindringen kann sind zudem schadhafte Abdichtungen, schadhafte Entwässerungen der Fahrbahnplatte und undichte Fahrbahnübergänge. Durchfeuchtungen und Ausblühungen zeigen sich als Verfärbungen der Betonoberfläche oder lokale Verkrustungen und haben zunächst keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und beeinflussen zumeist nicht die Dauerhaftigkeit des Betons, solange keine wesentlichen Schädigungen, wie z. B. Abplatzungen des Betons eingetreten sind. Jedoch geben sie eindeutige Hinweise auf vorhandene Schäden oder Schwachstellen in der Konstruktion (z. B. Hohlstellen oder Risse), der Abdichtung oder der Entwässerung.

Zum anderen kann Wasser zu unmittelbaren Schäden an Stahlteilen von Brückenbauwerken in Form von Korrosion führen. Davon betroffen sind diejenigen Stahlteile, die nicht im Beton liegen oder durch andere Baustoffe umschlossen sind und dem Wasser und Sauerstoff in der Luft somit direkt ausgesetzt sind. Zu ihnen gehören beispielsweise Brückenlager, Fahrbahnübergänge, Geländer, Leiteinrichtungen und Beschilдерungen.

### 4.4 Implementierung der Ergebnisse in ein zuverlässigkeitsbasiertes Erhaltungsmanagement

#### 4.4.1 Zuverlässigkeitsbasiertes Erhaltungsmanagement

Das aktuelle Vorgehen im Rahmen des Erhaltungsmanagements für Brücken ist darauf ausgerichtet, die bei der Bauwerksprüfung festgestellten Schäden zu beheben. Die Bauwerksprüfungen finden dazu in festgelegten Zyklen (Hauptprüfung alle 6 Jahre, einfache Prüfung alle 3 Jahre nach einer Hauptprüfung) statt. Im Bauwerksmanagement-System (BMS), werden die Ergebnisse der Bauwerksprüfung unter Berücksichtigung der Bauwerksdaten analysiert und in entsprechende Erhaltungsprogramme eingebunden. Die Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen beruht dabei auf der Annahme, dass eine Maßnahme am geschädigten Bauteil durchgeführt wird bevor die Versagenswahrscheinlichkeit einen unakzeptablen Wert erreicht [Haar10]. Jedoch werden Defizite bzw. Risiken im Hinblick auf die Tragfähigkeit der Bauwerke zurzeit nur indirekt berücksichtigt. Auch zukünftige Einflüsse, insbesondere die prognostizierte Zunahme des Schwerverkehrs, werden aktuell nicht berücksichtigt. Da dieses Vorgehen nur unter bestimmten Voraussetzungen und mit erheblichen finanziellen Erhaltungsmitteln, die über die zur Verfügung stehenden Mittel hinausgehen, zielführend ist, wird derzeit ein zuverlässigkeitsbasiertes Erhaltungsmanagement entwickelt. Die Komponenten, aus dem ein zuverlässigkeitsorientiertes System bestehen soll, werden in [Haar10] dargestellt:

- Systemanalyse zur Ermittlung der Schädigungswahrscheinlichkeit des Bauwerks und seiner Elemente sowie zur Identifizierung sogenannter „hot spots“,
- risikobasierte Bauwerksprüfung unter Berücksichtigung der Schwachstellen,
- optimierte Erhaltungsplanung unter Berücksichtigung der zu erwartenden Schadensfolge.

Die Grundlage eines zuverlässigkeitsbasierten Erhaltungsmanagements zur Bewertung von Brückenbauwerken soll die Beschreibung des zeitlich veränderlichen Zustandes eines Bauteils anhand von Einwirkungs- und Widerstandsfunktionen darstellen. Da die Einwirkungen und Widerstände gewissen Streuungen unterliegen, soll die Beschreibung der Parameter auf Grundlage probabilisti-

scher Modelle erfolgen. Die sich daraus ergebenden Verteilungskurven von Einwirkung und Widerstand werden zur Bewertung der Schädigungswahrscheinlichkeit überlagert. Der Überschneidungsbereich beider Verteilungsfunktionen bildet das Maß der Schädigungswahrscheinlichkeit.

Mithilfe der ermittelten Schädigungswahrscheinlichkeiten lassen sich Maßnahmen zur Bauwerkserhaltung gezielter planen und Zeitpunkte sowie Umfänge von Brückenprüfungen festlegen. Im Gegensatz zum aktuellen Vorgehen bei der Bauwerksprüfung, bei der festgeschriebene Prüfumfänge in vordefinierten Zeitabständen unabhängig vom Bauwerkzustand vorgenommen werden, braucht eine Prüfung (eines beliebigen Schadens) erst dann durchgeführt zu werden, wenn mit einer Schädigung zu

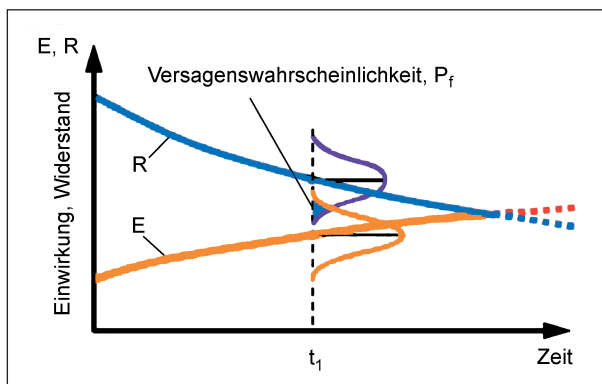


Bild 89: Schema des probabilistischen Bemessungskonzeptes [MüVN11]

rechnen ist. Daraus können sich unter reduzierten Erhaltungsaufwendungen längere Nutzungsdauern der Bauwerke ergeben. In [ZiSD11] wird dazu der grundsätzliche Zyklus eines Modells der zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung aufgezeigt (siehe Bild 90).

Eine Schwierigkeit bei der systemanalytischen Betrachtung mithilfe probabilistischer Methoden ist die Auswahl geeigneter Modelle zur Beschreibung von Schädigungsprozessen und die Festlegung von Grenzzuständen dieser Prozesse. Um die Parameter der Berechnungsmodelle zu quantifizieren, müssen zunächst relevante Einwirkungen und Widerstände erfasst werden und mögliche Schädigungen identifiziert werden. Für einige Schädigungen liegen bereits Untersuchungen und daraus entwickelte Modelle vor. Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit des Gesamtbauwerks ist es jedoch erforderlich die Zusammenhänge von verschiedenen Modellen zu beurteilen, und die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Bauteilen und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen des Forschungsprojektes „Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnisse“ [ThSt13] ein Modell zur Beschreibung des Brückensystems entwickelt, welches eine Bewertung über den Zustand und die Zuverlässigkeit der Brücke und seiner Bauteile ermöglichen soll.

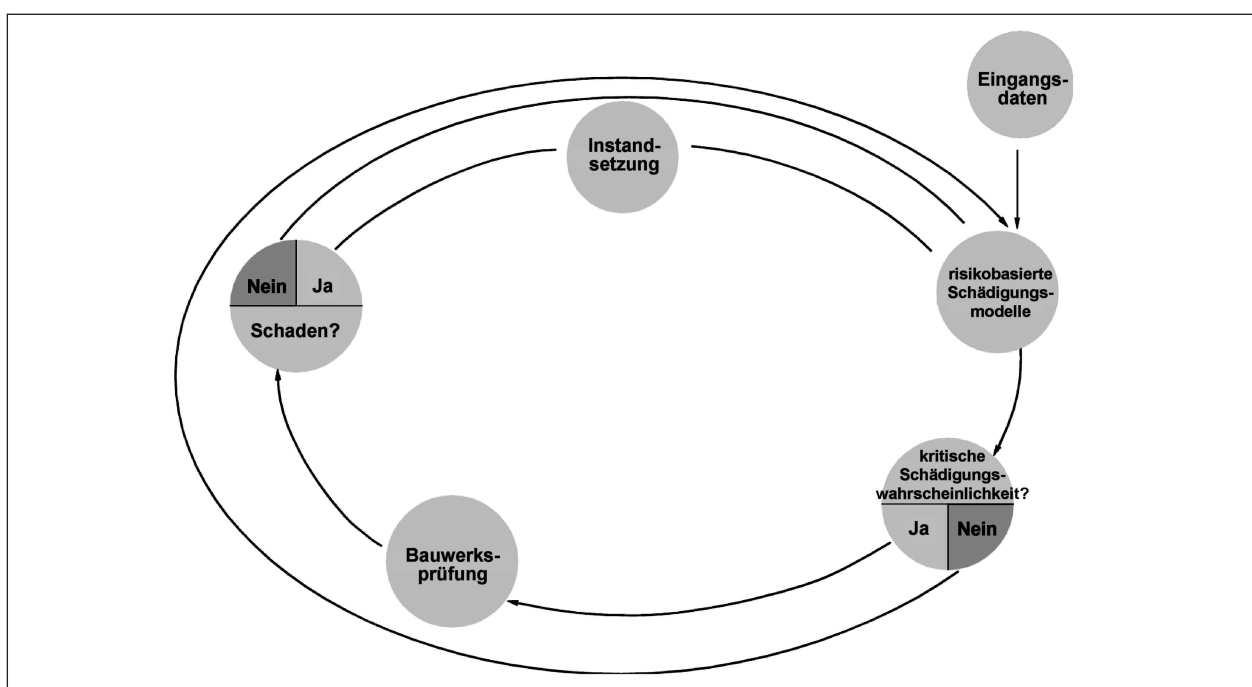


Bild 90: Grundmodell der zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung [ZiSD11]

#### 4.4.2 Implementierung der Ergebnisse

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, stellt die Systemanalyse eine wesentliche Komponente im Rahmen des zuverlässigkeitsbasierten Erhaltungsmanagements dar. Im Auftrag der BAST wurde dazu in [BoFi13] die „Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse“ erarbeitet. Im Rahmen der Systemmodellierung wurde ein Ansatz entwickelt, der sowohl strukturelle Abhängigkeiten als auch Interaktionen zwischen unterschiedlichen Schäden berücksichtigt. Mithilfe von Logik-Elementen können Verknüpfungen sowohl zwischen den Komponenten innerhalb einer Ebene als auch Ebenen übergreifend hergestellt werden. Dabei können frei definierte Vorschriften, Erkenntnisse hinsichtlich Schädigungsmechanismen oder andere Zusammenhänge in die Logik-Elemente implementiert werden. Des Weiteren können verschiedene Ansätze, wie beispielsweise probabilistische Ansätze, physikalische/chemische Modelle mit deterministischen Ansätzen oder empirische Modelle zur Anwendung kommen [BoFi13]. Nach [Haar10] stellen insbesondere probabilistische Untersuchungen der einzelnen Bauteile des Gesamtsystems die Grundlage für eine systemanalytische Betrachtung des Brückenbauwerks dar. Die Voraussetzung dieser Untersuchungen bildet zunächst die Identifizierung von Schäden und Schädigungsarten (Kapitel 2). Darüber hinaus sind relevante Einwirkungen und Widerstände zu erfassen (Kapitel 3) und im Hinblick auf das Schädigungspotenzial zu bewerten (Kapitel 4). Des Weiteren sollen relevante Schädigungsprozesse in Form von Schädigungsmodellen dargestellt und Grenzzustände dieser Prozesse bzw. Modelle festgelegt werden (Kapitel 5). Die Ergebnisse der im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführten Untersuchungen bilden somit eine Grundlage für die Erarbeitung zuverlässigkeitsbasierter Systeme, insbesondere:

- um einen generellen Überblick über den Bestand und die Einwirkungen zu erhalten,
- zur Kalibrierung der Methoden bzw. Modelle zur Zuverlässigkeitsanalyse und zur Kalibrierung der Schädigungsmodelle und deren Grenzzuständen,
- zur Identifizierung relevanter Einwirkungen,
- zur Abgrenzung auffälliger Bauwerkstypen,
- zur Lokalisierung von sog. „hot spots“,

- als Hilfe bei der Definition von Anforderungen zur Auswahl von Sensoren zur Erfassung relevanter Parameter (siehe [ScKK13]).

Im Rahmen eines Systemmodells lassen sich somit die Erkenntnisse im Hinblick auf relevante Einwirkungen, konstruktive Schwachstellen, Schäden und Schädigungsmechanismen in den Einflussbau implementieren und ermöglichen somit genauere Zustandsbeschreibungen und Zustandsprognosen. Detaillierte Ansätze der Systemmodellierung sowie Möglichkeiten einer programmtechnischen Umsetzung sind in [BoFi13] dargestellt.

## 5 Schädigungsmodelle

Schädigungsmodelle existieren für die nachfolgend aufgeführten maßgebenden Schädigungsprozesse an Massivbrücken:

- Karbonatisierung,
- Chlorideindringung,
- Bewehrungskorrosion,
- Spannungsrissskorrosion (SpRK),
- Frost-/Frost-Tausalz-Angriff,
- Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR),
- Ermüdung.

Schädigungsmodelle können zur Schadenserkennerung sowohl bei der globalen als auch bei der lokalen Bauwerksüberwachung zum Einsatz kommen. Im Rahmen einer globalen Bauwerksüberwachung lassen sich beispielsweise geeignete (physikalische) Schädigungsmodelle in das Strukturmodell einbinden [ScKK13]. Für die lokale Bauwerksüberwachung hingegen, können mechanische, physikalische oder chemische Schädigungsprozesse mithilfe von Schädigungsmodellen direkt beschrieben werden.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Schädigungsprozesse kurz beschrieben und die entsprechenden, zur Abbildung der Schädigung geeigneten Schädigungsmodelle dargestellt. Zur Abschätzung der Anwendbarkeit der Schädigungsmodelle im Hinblick auf die Beurteilung des Schädigungspotenzials werden die einzelnen Einflussparameter der Modelle aufbereitet. Es wird dargestellt, wie die erforderlichen Einflussparameter der



Schädigungsmodelle ermittelt werden und ob diese mit geeigneten Verfahren am Bauteil messbar sind.

## 5.1 Karbonatisierung

Die Karbonatisierung von Beton ist eine chemische Reaktion von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) aus der Luft mit den alkalischen Bestandteilen des Zementes. Im Porenwasser des Betons gelöstes Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) reagiert dabei mit  $\text{CO}_2$  zu Calciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Wenn das reaktionsfähige Calciumhydroxid infolge dieser Reaktion verbraucht ist, sinkt der pH-Wert des Betons ab und der alkalische Korrosionsschutz der Bewehrung geht verloren. Ist die Karbonatisierungstiefe soweit fortgeschritten, dass sie den Bewehrungsstahl erreicht, kann es unter Einfluss von Luft und Wasser zu Korrosion kommen.

### Schädigungsmodelle

Zur Beschreibung der Schädigung bzw. des Schädigungsfortschritts lässt sich die Grenzzustandsfunktion der Karbonatisierung mithilfe der Betondeckung und der Karbonatisierungstiefe darstellen:

$$g_K(t) = d - x_K(t)$$

mit

$g_K(t)$  Grenzzustandsfunktion der Karbonatisierung in Abhängigkeit der Zeit

$d$  Betondeckung [cm]

$x_K(t)$  Karbonatisierungstiefe zum Zeitpunkt  $t$  [cm]

#### 5.1.1 Schädigungsmodell nach SCHIEßL

Die Karbonatisierungstiefe war in den letzten Jahren Inhalt vieler Forschungstätigkeiten, wobei die Mehrheit der Modelle auf dem 1. Fickschen Diffusionsgesetz beruht. Die meisten Modelle zur Beschreibung der Karbonatisierungstiefe für ungerissenen Beton basieren auf dem empirischen Schädigungsmodell von SCHIEßL [Schi76]:

$$x_K = \sqrt{K \cdot t}$$

mit

$x_K$  Karbonatisierungstiefe [cm]

$K$  Karbonatisierungsfaktor [cm/a]

$t$  Zeit [a]

Dabei wird für die Ermittlung des Karbonatisierungsfaktors  $K$  u. a. nach [Schie76] folgende Formel angegeben:

$$K = \frac{2 \cdot D_B \cdot c}{a}$$

mit

$D_B$  Diffusionskonstante [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]

$c$   $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft an der Betonaußenseite [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$a$  benötigte Menge  $\text{CO}_2$  zur vollständigen Karbonatisierung der vorhandenen karbonatisierbaren Substanz [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

### Parameter

Betondeckung ( $d$ )

Zur Ermittlung der Betondeckung stehen verschiedene zerstörungsfreie Verfahren zur Verfügung. Gebräuchliche Verfahren sind z. B. magnetische Verfahren, Wirbelstrom-Verfahren, Mikrowellen/Radar-Verfahren usw. (siehe [DGZfP90]). Des Weiteren kann die Betondeckung für eine erste Berechnung auch den zur Planung der Brücke gültigen Normen entnommen werden. Da die Betondeckung, infolge der Bauausführung, gewissen Streuungen unterliegt, sollte eine Abminderung der planerischen Betondeckung berücksichtigt werden (siehe z. B. [BrKe09], [EmHe09]).

Diffusionskonstante ( $D_B$ )

Die Diffusionskonstanten wurden von SCHIEßL für verschiedene Betonmischungen durch Laborversuche an Betonprobekörpern ermittelt. In [Schi76] sind die ermittelten Diffusionskonstanten in Abhängigkeit der Betonfestigkeit in einem Diagramm zusammengetragen. Zudem kann man, unter der Annahme, dass die im ersten Jahr aufgetretene Karbonatisierung noch mit ausreichender Genauigkeit dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz folgt, mit den Parametern  $a$  und  $c$  aus den entsprechenden Messwerten die tatsächlich wirksame Diffusionskonstante errechnen [Schi76].

$\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft ( $c$ )

Zur Bestimmung des Kohlendioxidgehalts in der Luft stehen verschiedene Messsysteme bzw. Sensoren zur Verfügung. Eingesetzte  $\text{CO}_2$ -Sensoren sind beispielsweise Halbleiter-Sensoren, elektrochemische Sensoren oder Infrarot-Sensoren.



Benötigte Menge CO<sub>2</sub> zur vollständigen Karbonatisierung (a)

Die benötigte Menge Kohlendioxid zur vollständigen Karbonatisierung (a) hängt maßgeblich vom w/z-Wert bzw. dem Zementgehalt des Betons ab. Da es in Abhängigkeit der Nachbehandlung und des Hydratationsvorgangs zu Abweichungen des w/z-Wertes kommen kann und es keine zuverlässige Messmethode zur nachträglichen Bestimmung des Zementgehaltes von Festbeton gibt, ist auch eine exakte Ermittlung der benötigten CO<sub>2</sub>-Menge nur schwer möglich. SCHIEßL gibt in [Schi76], im Rahmen eines Karbonatisierungsprogramms gemessene CO<sub>2</sub>-Gehalte zur vollständigen Karbonatisierung zwischen 30-40 Gew.-%, bezogen auf das Zementgewicht an. Auf Grundlage dieser Werte lässt sich für gegebene Zementgewichte die benötigte Menge CO<sub>2</sub> zur vollständigen Karbonatisierung berechnen.

Aufgrund der Komplexität einiger Parameter stellt die Ermittlung der Karbonatisierungstiefe auf der Grundlage empirisch ermittelter Karbonatisierungsfaktoren eine praxisingerechte Alternative dar. Empirisch ermittelte Karbonatisierungsfaktoren finden sich z. B. in [NoBA03] und [PoFS08].

Darüber hinaus lässt sich die tatsächliche Karbonatisierungstiefe des Bauteils durch einen Indikator-test bestimmen. Da bei diesem Verfahren mit dem Farbindikator Phenolphthalein eine frische Betonbruchfläche besprüht wird, stellt dieses Vorgehen jedoch ein zerstörendes Verfahren dar. Zur Bestimmung des Schädigungsfortschritts kann der Karbonatisierungsfaktor mithilfe der so ermittelten Karbonatisierungstiefe ermittelt werden ( $K = \frac{x_K^2}{t}$ ).

### 5.1.2 Schädigungsmodell nach Model Code

Neben dem Schädigungsmodell von SCHIEßL gibt der Model Code for Service Life Design [Model06] auf der Grundlage des Modells von GEHLEN [Gehl00] ein komplexes physikalisches Schädigungsmodell zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe an:

$$x_K(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot R_{NAC,0}^{-1} \cdot \Delta C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)}$$

mit

$x_K(t)$  Karbonatisierungstiefe [cm]

$k_e$  Parameter zur Berücksichtigung der Feuchteabhängigkeit [-]

$k_c$  Parameter zur Berücksichtigung der Nachbehandlungsabhängigkeit [-]

$R_{NAC,0}^{-1}$  inverser effektiver Karbonatisierungswiderstand von trockenem Beton, bestimmt an definiert hergestellten und vorgelagerten Prüfkörpern mithilfe der Normalkarbonatisierungsmethode NAC [m<sup>2</sup>/s/kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]

$\Delta C_s$  CO<sub>2</sub>-Konzentrationsgradient, der als Variable der Einwirkung bei der Bemessung zu berücksichtigen ist [kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]

$t$  Betonalter [s]

$W(t)$  Witterungsfunktion [-]

#### Parameter

Parameter zur Berücksichtigung der Feuchteabhängigkeit ( $k_e$ )

Zur Berücksichtigung der Feuchteabhängigkeit werden in [Gehl00] zwei mögliche Vorgehensweisen dargestellt. Zum einen kann der Parameter über das Verhältnis der am Bauteil vorhandenen Luftfeuchtigkeit zu einer im Labor ermittelten Referenzluftfeuchtigkeit berechnet werden. Die vorhandene Luftfeuchtigkeit kann vereinfacht durch die Angaben einer nahegelegenen Wetterstation oder über entsprechenden Sensoren am Bauwerk (z. B. kapazitive Hygrometer) bestimmt werden. Die zweite Methode stellt der Vergleich von zwei unterschiedlichen Karbonatisierungsbedingungen ausgesetzten Prüfkörpern dar. Aufgrund des deutlich höheren (zeitlichen) Aufwands ist diese Vorgehensweise jedoch für die Praxis eher ungeeignet.

Parameter zur Berücksichtigung der Nachbehandlungsabhängigkeit ( $k_c$ )

Zur Quantifizierung des Parameters eignet sich ein Laborverfahren, bei dem über das Verhältnis zweier unterschiedlich nachbehandelter Prüfkörper der Nachbehandlungsparameter berechnet wird. Eine weitere Methode zur Bestimmung des Parameters stellt die Regression nach Bayes dar. In Abhängigkeit der Nachbehandlungsdauer und entsprechenden Regressionsparametern lässt sich der Nachbehandlungsparameter bestimmen. Bei der Anwendung dieses Verfahrens müssen jedoch verlässliche Angaben der Nachbehandlungsdauer für den Beton vorliegen.

Inverser effektiver Karbonatisierungswiderstand  $R_{NAC,0}^{-1}$

Der Karbonatisierungswiderstand wird prinzipiell mit der Normalkarbonisierungsmethode NAC bestimmt. Zur Bestimmung des Karbonatisierungsfortschrittes wird ein Betonprobekörper gängigen CO<sub>2</sub>-Belastungen unter Laborklima ausgesetzt. Da diese Versuchsmethode jedoch sehr zeitintensiv ist, wird häufig die beschleunigte Karbonisierungsmethode ACC (Accelerated Carbonation) bevorzugt. Die dabei zusätzlich erforderlichen Übergangsparameter ( $k_t$  und  $\varepsilon_t$ ) werden nach [Model06] bzw. [Gehl00] entsprechend definiert.

CO<sub>2</sub>-Konzentrationsgradient ( $\Delta C_s$ )

Der Kohlenstoffdioxid-Konzentrationsgradient ergibt sich aus der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre zuzüglich einer Berücksichtigung örtlicher CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen. Deutlich genauer und praxistauglicher ist jedoch die Bestimmung des Kohlendioxidgehalts in der Luft mit entsprechenden Messsystemen bzw. Sensoren, wie beispielsweise Halbleiter-Sensoren, elektrochemischen Sensoren oder Infrarot-Sensoren.

Witterungsfunktion ( $W$ )

Die Witterungsfunktion berücksichtigt die diffusionshemmende Wirkung des oberflächennahen Betons mithilfe eines Witterungsexponenten. Der maßgebende Parameter zur Bestimmung des Exponenten ist die Regenhäufigkeit. Auf der Grundlage des KOSTRA-Atlas des Deutschen Wetterdienstes kann die Anzahl der Tage mit Niederschlägen  $\geq 2,5$  mm ermittelt werden und daraus der Witterungsexponent berechnet werden.

Analog zum zuvor dargestellten Modell nach SCHIEßL stellt die Ermittlung der Karbonisierungstiefe auf der Grundlage empirisch ermittelter Karbonisierungsfaktoren eine praxismgerechte Alternative dar. Empirisch ermittelte Karbonisierungsfaktoren finden sich z. B. in [NoBA03] und [PoFS08].

## 5.2 Chlorideindringung

Chloride sind Anionen von Salzen, die im Porenwasser des Betons in Lösung gehen. Sie können zum einen über die Ausgangsstoffe in den Beton eingetragen werden oder nachträglich von außen

durch Diffusion oder kapillares Saugen in den Beton eindringen. Durch den Einsatz von Tausalzen oder durch Meerwasser werden die Bauwerke durch einen erhöhten Chloridgehalt belastet. Übersteigt die Chloridkonzentration auf Höhe der Bewehrung einen bestimmten Grenzwert, wird die Passivschicht des Betonstahls aufgehoben und es kann zu Korrosion kommen.

### Schädigungsmodelle

In der Literatur ist eine Vielzahl von unterschiedlichen Modellen zur Beschreibung der Chlorideindringung zu finden. Im Folgenden werden exemplarisch zwei Schädigungsmodelle – ein physikalisches Modell und ein empirisches Modell – erläutert.

#### 5.2.1 Schädigungsmodell nach Model Code

Der Model Code for Service Life Design [Model06] gibt ein physikalisches Schädigungsmodell zur Erfassung des kritischen Chloridgehalts in Abhängigkeit der vorhandenen Betondeckung, auf Grundlage des Modells von Gehlen [Gehl00] an. Im Unterschied zum Schädigungsmodell für die Karbonatisierung unterliegt dieses Modell dem 2. Fickschen Diffusionsgesetz.

$$C_{crit} = C_{S,\Delta x} \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{d - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{eff,c}(t) \cdot T}} \right]$$

mit

$C_{crit}$	kritische Chloridkonzentration [M.-%/ Zementgehalt]
$C_{S,\Delta x}$	Chloridkonzentration in der Tiefe $\Delta x$ (Ersatzoberflächenkonzentration) [M.-%/ Zementgehalt]
$\operatorname{erf}$	Fehlerfunktion
$d_c$	Betondeckung [cm]
$\Delta x$	Tiefenbereich, der vom Fickschen Verhalten abweichende Chloridkonzentrationen aufweist
$D_{eff,c}(t)$	effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Zeitpunkt $t$
$T$	Zeitpunkt der chloridinduzierten Depassivierung des Bewehrungsstahls [s]

Dabei ergibt sich der effektive Chloriddiffusionskoeffizient  $D_{eff,c}(t)$  zu:

$$D_{eff,c}(t) = D_{RCM,0} \cdot k_e \cdot k_t \cdot \left( \frac{t_0}{t} \right)^a$$

mit

$D_{RCM,0}$  Chloridmigrationskoeffizient von wassergesättigtem Beton, bestimmt zum Referenzzeitpunkt  $t_0$  an definiert hergestellten und vorgelagerten Prüfkörpern [ $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ]

$k_e$  Parameter zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit von  $D_{eff,c}(t)$  [-]

$k_t$  Übertragungsparameter

$t$  Betonalter [s]

$t_0$  Referenzzeitpunkt [s]

$a$  Altersexponent zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von  $D_{eff,c}(t)$  [-]

### Parameter

kritische Chloridkonzentration ( $C_{crit}$ )

Die kritische Chloridkonzentration ist wesentlich von der Betonqualität und der vorherrschenden Feuchtigkeit abhängig und aktuell Gegenstand intensiver Diskussionen und Forschungen. In [Gehl00] wird eine Empfehlung für die Anwendung des Modells mit  $C_{crit,\mu} = 0,6 \text{ M.-%}$  bezogen auf den Zementanteil und  $C_{crit,\sigma} = 0,15 \text{ M.-%}$  gegeben.

Chloridkonzentration in der Tiefe  $\Delta x$  ( $C_{S,\Delta x}$ )

Die Ersatzoberflächenkonzentration  $C_{S,\Delta x}$  ist ein Modelleingangswert, der die am Bauteil vorhandene Chloridkonzentration beschreibt. Dabei ist die Ersatzoberflächenkonzentration eine Variable, welche in Abhängigkeit der Tiefe i. d. R. nicht konstant ist. Die maßgeblichen Einflussfaktoren zur Beschreibung der Ersatzoberflächenkonzentration sind die vorherrschenden Umweltbedingungen, denen das Bauteil ausgesetzt ist sowie die beton-technologischen Faktoren, die sich auf das Porengefüge auswirken. Die Umweltbedingungen lassen sich auf Grundlage der äquivalenten Chloridkonzentration  $C_{Aqv}$  bestimmen. Die äquivalente Chloridkonzentration ist im Wesentlichen von der Lage des Bauwerks abhängig und berücksichtigt den Chloridgehalt des Tauwassers, die Anzahl der Streueignisse pro Kalenderjahr, die Chloridstreuung pro Streueinsatz und den Niederschlag während der Streuperiode. Der funktionale Zusammenhang zwischen den Umweltparametern und den Materialfaktoren liefert die Chloridsättigungskonzentration  $C_{S,0}$  [Gehl00]. Jedoch konnte bisher noch keine Übertragungsfunktion zur Überführung

der Oberflächenkonzentration bzw. Chloridsättigungskonzentration  $C_{S,0}$  in die Ersatzoberflächenkonzentration  $C_{S,\Delta x}$  aufgestellt werden. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Betondeckung ( $d$ )

Die Ermittlung der Betondeckung ist bereits in Kapitel 5.1.1 beschrieben.

Chloridmigrationskoeffizient ( $D_{RCM,0}$ )

Die Grundlage zur Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten stellt eine Laborprüfung dar, bei der Prüfkörper mit chloridhaltiger Lösung beaufschlagt werden. Zur Beschleunigung des Ionentransports in den Prüfkörper kommt dabei i. d. R. der Chloridmigrationstest RCM (Rapid-Chloride-Migration) zum Einsatz. Mithilfe des Verhältnisses der Chloridkonzentration, welcher auf Grundlage des RCM-Tests errechnet wird und der Chloridkonzentration der Lösung sowie mithilfe der visuell erfassten Chlorideindringtiefe (mittels Indikatorlösung) lässt sich der Chloridmigrationskoeffizient bestimmen.

Parameter zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit ( $k_e$ )

Der Parameter zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur ergibt sich zu:

$$k_e = \exp \left( b_e \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{ist}} \right) \right)$$

Dabei entspricht die Referenztemperatur  $T_{ref}$  der Standardprüftemperatur von  $20^\circ\text{C}$ . Die Regressions-temperatur  $b_e$  wird als stochastische Größe mithilfe eines Mittelwertes und einer zugehörigen Standardabweichung definiert. Entsprechende Werte sind in der Literatur (z. B. [Model06]) zu finden. Die vorhandene Temperatur wird als stochastische Größe über den Mittelwert und die Standardabweichung der Jahrestemperatur einer naheliegenden Wetterstation ermittelt. Alternativ bietet sich hier die Ermittlung der Temperatur durch entsprechende, am Bauwerk applizierte Sensoren (z. B. Thermoelemente, Widerstandsthermometer, faseroptische Sensoren) an.

Übertragungsparameter ( $k_t$ )

Der Übertragungsparameter dient zur Berücksichtigung der tatsächlichen Chlorideinwirkung für den unter Laborbedingungen (RCM – Rapid Chloride

Migration) ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten. Weitere Ausführungen zum Übertragungsparameter finden sich in [Gehl00].

Altersexponent ( $a$ )

In Abhängigkeit der verwendeten Zementsorte lässt sich der Chloridwiderstand reduzieren. In [Gehl00] sind entsprechende Werte des Altersexponenten in Abhängigkeit der Zementsorte angegeben.

### 5.2.2 Empirisches Schädigungsmodell

In [ZiSD11] wird ein empirisches Schädigungsmodell vorgestellt, mit dessen Hilfe die Schädigung bzw. der Schädigungsfortschritt für die Chlorideindringung auf der Grundlage einer Grenzzustandsfunktion in Abhängigkeit der Chlorideindringtiefe und der Betondeckung beschreiben werden kann:

$$g_C(t) = d - x_C(t)$$

mit

$g_C(t)$  Grenzzustandsfunktion der Chlorideindringung in Abhängigkeit der Zeit

$d$  Betondeckung [cm]

$x_C(t)$  Eindringtiefe für eine konstante Chloridkonzentration [cm]

Die K-Chloridkonzentration  $x_C$  lässt sich dabei nach [NoBR02] und [PoFS08] folgendermaßen bestimmen:

$$x_C = \sqrt{D_W \cdot a_c \cdot t}$$

mit

$D_W$  Chloridwanderungskoeffizient im Beaufschlagungszeitraum [cm<sup>2</sup>/a]

$a_c$  Anteil der Chloridbeaufschlagungsdauer am Bauteilalter [-]

$t$  Dauer der Beaufschlagung [a]

#### Parameter

Betondeckung ( $d$ )

Die Ermittlung der Betondeckung ist bereits in Kapitel 5.1.1 beschrieben.

Chloridwanderungskoeffizient ( $D_W$ )

Der Chloridwanderungskoeffizient kann mithilfe der tatsächlich am Bauteil gemessenen Chlorid-

eindringtiefe bestimmt werden ( $D_W \cdot a_c = \frac{x_{C,i}^2}{t_i}$ ).

Dazu stehen verschiedene chemische Verfahren, wie z. B. Schnelltests an Bohrmehlproben oder Sprühverfahren an Betonbruchflächen zur Verfügung. Darüber hinaus ist derzeit ein zerstörungsfreies Prüfverfahren auf Grundlage der spektroskopischen Laseranalyse (LIBS) in der Entwicklung.

Nach [ZiSD11] lässt sich der Chloridwanderungskoeffizient  $D_W$  für eine erste Abschätzung aus der Literatur entnehmen und wird meist für verschiedene kritische Chloridkonzentrationen angegeben.

## 5.3 Bewehrungskorrosion

Der Prozess der Bewehrungskorrosion lässt sich generell in zwei Phasen unterteilen, die getrennt voneinander zu betrachten sind. In der Einleitungsphase kommt es zur Depassivierung der Bewehrung infolge der Karbonatisierung und/oder der Chlorideindringung. Diese beiden Schädigungsprozesse wurden bereits in den vorhergehenden Kapiteln behandelt. Die zweite Phase wird als Schädigungsphase bezeichnet, in der es aufgrund elektrochemischer Prozesse zur Querschnittschwächung des Bewehrungsstahls mit einhergehender Verminderung der Duktilität und Verschlechterung des Verbundes zwischen dem Betonstahl und dem umgebenden Beton kommt. Die Volumenzunahme der Korrosionsprodukte (zwei- bis sechsfach größeres Volumen als das Ausgangsprodukt) führt zudem zur Rissbildung und Abplatzung der Betondeckung.

### Schädigungsmodelle

In der Literatur sind diverse Modelle u. a. zur Beschreibung des Materialabtrages der Bewehrung, der Rissbildung und der Verringerung des Verbundes zu finden. Neuere Erkenntnisse der DFG-Forschergruppe 537 zur Modellierung des Schadensfortschritts bei Korrosion von Stahl in Beton finden sich zudem in den Heften 601 (Systemparameter der Bewehrungskorrosion) und 602 (Dauerhaftigkeitsbemessung) der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb). Im Folgenden werden exemplarisch zwei Schädigungsmodelle zum Materialabtrag und ein Schädigungsmodell zur Rissbildung infolge Korrosion dargestellt.



### 5.3.1 Schädigungsmodelle zum Materialabtrag infolge Korrosion

In [ZiSD11] wird der Schädigungsverlauf des Materialabtrags durch Korrosion auf Grundlage eines zeitlich linearen Korrosionsabtrags beschrieben. Die Grenzzustandsfunktion, bei der ein vorhandener Korrosionsabtrag einem zulässigen Abtrag gegenübergestellt wird, ergibt sich zu:

$$g_{BK}(t) = \Delta s_{zul} - \Delta s$$

mit

$g_{BK}(t)$  Grenzzustandsfunktion der Bewehrungskorrosion in Abhängigkeit der Zeit [-]

$\Delta s_{zul}$  zulässiger Korrosionsabtrag [ $\mu\text{m}$ ]

$\Delta s$  absoluter Korrosionsabtrag [ $\mu\text{m}$ ]

Der absolute Korrosionsabtrag  $\Delta s$  lässt sich dabei mit folgender Gleichung bestimmen:

$$\Delta s = r_{Bew} \cdot t$$

mit

$r_{Bew}$  jährlicher Korrosionsabtrag [ $\mu\text{m}$ ]

$t$  Zeit nach Depassivierung der Bewehrung [a]

#### Parameter

Jährlicher Korrosionsabtrag/Korrosionsrate ( $r_{Bew}$ )

In der Literatur gibt es zahlreiche Empfehlungen geeigneter Abrostungs- bzw. Korrosionsraten (u. a. [NoBR02], [SaVe96], [Dura00]), die sich jedoch in Abhängigkeit der berücksichtigten Einflussparameter zum Teil deutlich unterscheiden.

Nach [SaVe96] kann der jährliche Korrosionsabtrag  $r_{Bew}$  beispielsweise in Abhängigkeit der Bauteiltemperatur wie folgt ermittelt werden:

$$r_{Bew} = c_T \cdot r_0$$

mit

$c_T$  Temperaturkoeffizient [-]

$r_0$  jährlicher Korrosionsabtrag bei + 20 °C [ $\mu\text{m/a}$ ]

Zu Ermittlung der erforderlichen Parameter sind in [SaVe96] entsprechende Tabellen aufgeführt. Für ausgewählte europäische Städte werden beispielsweise Werte des Temperaturkoeffizienten  $c_T$  explizit angegeben.

### Weiteres Schädigungsmodell zum Materialabtrag infolge Korrosion

In [Gehl00] findet sich ein weiteres, ausführliches Schädigungsmodell zur Beschreibung des Materialabtrags der Bewehrung infolge Korrosion:

$$A_s(t) = A_{s,0} \cdot (1 - g(t_{Corr}, V_{Corr}))$$

mit

$A_s(t)$  verbleibende Restquerschnittsfläche des Bewehrungsstahles [ $\text{cm}^2$ ]

$A_{s,0}$  ursprüngliche Querschnittsfläche des Bewehrungsstahles [ $\text{cm}^2$ ]

$g(t_{Corr}, V_{Corr})$  Abtragungsfunktion in Abhängigkeit der korrosionsaktiven Zeit  $t_{Corr}$  und der Korrosionsabtragsrate  $V_{Corr}$

#### Parameter

Korrosionsaktive Zeit ( $t_{Corr}$ )

Die Zeitspanne ab dem Zeitpunkt der Depassivierung des Betonstahls bis zum betrachteten Zeitpunkt wird als korrosionsaktive Zeit bezeichnet. Dabei kann der Zeitpunkt der Depassivierung mit den entsprechenden Modellen der Einleitungsphase der Bewehrungskorrosion (Karbonatisierung und Chlorideindringung) bestimmt werden (vgl. Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2).

Korrosionsabtragsrate ( $V_{Corr}$ )

Analog zum zuvor dargestellten Schädigungsmodell zur Beschreibung des Materialabtrages infolge Korrosion finden sich in der Literatur zahlreiche Empfehlungen geeigneter Abrostungs- bzw. Korrosionsraten (u. a. [NoBR02], [SaVe96], [Dura00]), die sich jedoch in Abhängigkeit der berücksichtigten Einflussparameter zum Teil deutlich unterscheiden.

In [Gehl00] wird ein ausführliches Verfahren zur Ermittlung der Abtragsrate auf Grundlage des spezifischen Elektrolytwiderstands von Beton und der Potenzialdifferenz zwischen anodisch und kathodisch wirkender Stahlfläche dargestellt. Die sich aus Elektrolytwiderstand und Potenzialdifferenz errechnete Korrosionsstromdichte lässt sich dabei mithilfe der Faradaykonstante in eine Abtragsrate umrechnen. Jedoch erweist sich dieses Vorgehen in vielen Fällen als äußerst kompliziert, da die Festlegung der Geometrieverhältnisse zwischen anodisch bzw. kathodisch wirkender Stahlfläche schon durch die



Anordnung mehrerer Stahllagen oder durch unterschiedlich aktive Korrosionsbereiche schwierig ist [Gehl00].

### 5.3.2 Schädigungsmodelle zur Rissbildung infolge Korrosion

Neben dem Modell zur Beschreibung des jährlichen Korrosionsabtrages gibt GEHLEN in [Gehl00] ein lokales Schädigungsmodell zur Modellierung der Rissbildung infolge korrosionsinduzierter Volumenvergrößerung des Bewehrungsstahls an. Dabei wird eine Radienzunahme infolge der Korrosionsabtragsrate dem Widerstand des Betons gegen den entstehenden Sprengdruck gegenübergestellt:

$$\Delta r_{(R)} = \Delta r_{(S)}(t_{Corr,ER})$$

mit

$\Delta r_{(R)}$  von Beton rissfrei maximal aufnehmbarer Radienzuwachs an der Bewehrung [ $\mu\text{m}$ ] („Widerstand“)

$\Delta r_{(S)}(t_{Corr,ER})$  korrosionsbedingter Radienzuwachs zum Zeitpunkt der Erstrissbildung  $t_{Corr,ER}$  [ $\mu\text{m}$ ] („Einwirkung“)

Zur Ermittlung des maximal aufnehmbaren Radienzuwachses  $\Delta r_{(R)}$  sind in [Gehl00] zwei mögliche Ansätze beschrieben. Der erste Ansatz beruht auf der Elastizitätstheorie des Betons, um einige nicht-lineare Eigenschaften erweitert:

$$\Delta r_{(R)} = \frac{f_t}{E_B} \cdot \left[ 0,6 \cdot \frac{(d_c + r_s)^2}{r_s} + 0,4 \cdot r_s \right] \cdot K_N \cdot K_R \cdot K_S$$

mit

$f_t$  Zugfestigkeit des Betons [MPa]

$E_B$  E-Modul des Betons [MPa]

$d_c$  Betondeckung [mm]

$r_s$  Bewehrungsstahlradius [mm]

$K_N$  Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des nicht-linearen Materialverhaltens von Beton [-]

$K_R$  Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Relaxationsfähigkeit von Beton

$K_S$  Korrekturfaktor zur Berücksichtigung von Spannungsüberlagerungen infolge zu geringer Stababstände

Der zweite Ansatz zur Bestimmung des maximal aufnehmbaren Radienzuwachses  $\Delta r_{(R)}$  beruht auf empirisch ermittelten Regressionskonstanten:

$$\Delta r_{(R)} = A_1 + A_2 \cdot \frac{d_c}{2 \cdot r_s} - A_3 \cdot f_{sp,t}$$

mit

$A_{1-3}$  empirisch ermittelte Regressionskonstanten;  $A_1 = 83,6$ ;  $A_2 = 7,4$ ;  $A_3 = 22,6$

$f_{sp,t}$  Zugfestigkeit des Betons [MPa]

Neben der Beschreibung der Widerstandsseite wird in [Gehl00] auch eine Gleichung zur Ermittlung des korrosionsbedingten Radienzuwachses  $\Delta r_{(S)}(t_{corr})$ , in Abhängigkeit der Korrosionsrate und der Dauer der korrosionsaktiven Zeit angegeben:

$$\Delta r_{(S)}(t_{corr}) = L \cdot (V_{Corr} \cdot t_{corr} - V_P) \cdot K_E$$

mit

$L$  lastabhängiger Regressionsparameter zur Berücksichtigung radialer, lastabhängiger Zusatzbeanspruchungen auf den Beton [-]

$V_{Corr}$  Korrosionsrate [ $\mu\text{m/a}$ ]

$t_{Corr}$  korrosionsaktiver Auslagerungszeitraum [a]

$V_P$  flächenbezogener Porenraum, der für eine spannungsfreie Aufnahme von Korrosionsprodukten zur Verfügung steht [ $\mu\text{m}$ ]

$K_E$  Expansionsfaktor [-]

### Parameter

Zugfestigkeit ( $f_t$ ) und E-Modul ( $E_B$ )

Eine nachträgliche Ermittlung der Zugfestigkeit und des E-Moduls ist nur indirekt oder mithilfe zerstörender Prüfungen, z. B. durch die Entnahme von Bohrkernen und anschließenden Laborprüfungen, möglich. Indirekt können die Zugfestigkeit und der E-Modul mithilfe entsprechender Umrechnung der Druckfestigkeit rechnerisch ermittelt werden. Zur Bestimmung der Druckfestigkeit am Bauwerk können zerstörungsfreie Prüfungen wie z. B. der Rückprallhammer oder das Ultraschallverfahren zum Einsatz kommen.

Betondeckung ( $d$ )

Die Ermittlung der Betondeckung ist bereits in Kapitel 5.1.1 beschrieben.

Korrekturfaktoren ( $K_N$ ), ( $K_R$ ), ( $K_S$ )

Nach [Gehl00] sind die Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhal-

tens, der Relaxationsfähigkeit und der Spannungsüberlagerung infolge zu geringer Stababstände nur mit großem Aufwand und mithilfe von FE-Analysen zu berechnen.

#### Lastabhängiger Regressionsparameter ( $L$ )

Der lastabhängige Regressionsparameter berücksichtigt radiale, lastabhängige Zusatzbeanspruchungen auf den Beton. Weiterführende Angaben zur Ermittlung des Parameters sind in [Gehl00] nicht gegeben.

#### Korrosionsrate ( $V_{Corr}$ ) und korrosionsaktive Zeit ( $t_{Corr}$ )

Die Parameter zur Beschreibung der Korrosionsrate und korrosionsaktiven Zeit sind bereits im vorherigen Abschnitt zur Beschreibung des Schädigungsmodells zum Materialabtrag der Bewehrung infolge Korrosion dargestellt (siehe Kapitel 5.3.1) und werden an dieser Stelle nicht wiederholt.

#### Flächenbezogener Porenraum ( $V_p$ )

Da der Porenraum bzw. Luftporengehalt üblicherweise am Frischbeton ermittelt wird, ist eine nachträgliche Bestimmung am Festbeton sehr aufwändig und nur mit der Entnahme von Betonproben möglich. In der Literatur sind Werte für Luftgehalte von vollständig verdichtetem Beton zwischen 1-2 Vol.-% angegeben.

#### Expansionsfaktor ( $K_E$ )

Der Expansionsfaktor gibt das Verhältnis zwischen dem Volumen des durch Korrosion entstandenen Metalloxids ( $R$ ) und dem ursprünglichen Volumen des Stahls an ( $K_E = R - I$ ).

## 5.4 Spannungsrissskorrosion

Die Spannungsrissskorrosion (SpRK) beschreibt die Korrosion des Spannstahls infolge einer gleichzeitigen mechanischen Zugbeanspruchung und eines korrosiven Mediums. Das Versagen infolge einer Spannungsrissskorrosion erfolgt spröde, ohne Brucherscheinung, senkrecht zur angreifenden Kraft. Aufgrund des sich von innen nach außen ausbreitenden Risses ist der Korrosionsvorgang von außen meist nicht zu erkennen und der Schädigungsfortschritt ist somit i. d. R. nicht zu bestimmen.

## Schädigungsmodelle

Schädigungsmodelle zur Beschreibung der Versagenswahrscheinlichkeit oder des Versagensfortschritts infolge einer Spannungsrissskorrosion konnten im Zuge der Literaturrecherche nicht gefunden werden (vgl. [ZiSD11]). Im Folgenden werden jedoch zwei Verfahren zur Überprüfung der Sicherheit von spannungsrissskorrosionsgefährdeten Brücken und zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Spannungsrissskorrosion vorgestellt.

### 5.4.1 Handlungsanweisung des BMVBS

Aufgrund einiger Schäden an Spannbetonbrücken infolge Spannungsrissskorrosion hat das damalige Bundesministerium für Verkehr (BMV) im Jahr 1993 eine „Empfehlung zur Überprüfung und Beurteilung von Brückenbauwerken, die mit vergütetem Spannstahl St 145/160 Neptun N40 bis 1965 erstellt wurden“ ausgesprochen. Im Jahr 2009 wurde eine aktualisierte und an neue Erkenntnisse angepasste „Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung älterer Brückenbauwerke, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden“ [BMVBS09] veröffentlicht. Das Konzept der Handlungsanweisung beruht auf der rechnerischen Überprüfung, ob ein Bauteil mit ausreichender Sicherheit einen möglichen Spannstahlausfall durch Rissbildung im Beton anzeigt, oder ob ein unbemerktes Fortschreiten des Spannstahlausfalls zu einem unangekündigten Versagen des Bauwerks führt. Dabei wird in den Zehntelpunkten des Brückenfeldes die vorhandene Restspanngliedanzahl zum Zeitpunkt der Rissbildung im Beton unter der häufigen Lasteinwirkungskombination ermittelt und der rechnerisch erforderlichen Restspanngliedanzahl für die seltene Einwirkungskombination gegenübergestellt ( $n_{cr,i} > n_{br,i}$ ). Die vorhandene Restspanngliedanzahl kann nach [BMVBS09] wie folgt bestimmt werden:

$$n_{cr,i} = \frac{\sigma_{b,\Delta q} - \beta_{bz} + \frac{M_{vx,\infty}}{W_b} + \frac{M_{\Delta T, freq}}{W_b}}{\varepsilon_{v,\infty}^{(0)} \cdot E_Z \cdot \left( \frac{1}{A_b} + \frac{\gamma_{bz}}{W_b} \right)} \cdot \frac{1}{A_{Z,n}}$$

mit

$n_{cr,i}$  Restspannglieder bei Rissbildung im Querschnitt  $i$ , abgerundet auf die nächstkleinere ganzzahlige Spanngliedanzahl [-]

$\sigma_{b,\Delta q}$  Betonrandspannung infolge häufiger Einwirkung aus Verkehr und ständiger Last [MN/m<sup>2</sup>]

$\beta_{bZ}$	Zentrische Betonzugfestigkeit gemäß Handlungsanweisung [MN/m <sup>2</sup> ]	$M_{As}$	Tragmoment der vorhandenen Betonstahlbewehrung [MNm]
$M_{vx,\infty}$	statisch unbestimmter Anteil des Moments aus Vorspannung zum Zeitpunkt $t = \infty$ [MNm]	$z_z$	Innerer Hebelarm für den Spannstahl [m]
$W_b$	Widerstandsmoment des Betonbruttoquerschnitts [m <sup>3</sup> ]		
$M_{\Delta T, freq}$	Moment infolge eines häufigen Anteils aus linearem Temperaturunterschied [MNm]		
$\varepsilon_{v,\infty}^{(0)}$	Vordehnung des Spannstahls zum Zeitpunkt $t = \infty$ unter Berücksichtigung der Verluste [-]		
$E_Z$	Elastizitätsmodul des Spannstahls [MN/m <sup>2</sup> ]		
$A_b$	Betonquerschnittsfläche (Bruttoquerschnitt) [m <sup>2</sup> ]		
$\gamma_{bz}$	Abstand des Spannstahlschwerpunkts zum Schwerpunkt des Betonquerschnitts (Bruttoquerschnitt) [m]		
$A_{Z,n}$	Querschnittsfläche eines einzelnen Spannglieds [m <sup>2</sup> ]		

Die erforderliche Restspanngliedanzahl kann nach [BMVBS09] mit folgender Formel berechnet werden:

$$n_{br,i} = \frac{\gamma_g \cdot M_g + \gamma_p \cdot M_p + M_{vx,\infty} + M_{\Delta T} - M_{As}}{\varepsilon_{v,\infty}^{(0)} \cdot E_Z \cdot z_z} \cdot \frac{1}{A_{Z,n}}$$

mit

$n_{br,i}$	Zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit im Querschnitt $i$ erforderliche Restspanngliedanzahl, aufgerundet auf die nächstgrößere ganzzahlige Spanngliedanzahl [-]
$\gamma_g$	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen [-]
$M_g$	Biegemoment infolge ständiger Last [MNm]
$\gamma_p$	Teilsicherheitsbeiwert für Verkehrseinwirkung [-]
$M_p$	Biegemoment infolge voller Verkehrsbeanspruchung [MNm]
$M_{\Delta T}$	Biegemoment infolge linearen Temperaturunterschieds [MNm]

### Parameter

Da der Nachweis zur Überprüfung spannungsrisssgefährdeter Brücken gemäß der Handlungsanweisung mit rechnerisch ermittelten Größen analog einer normativen Bemessung geführt wird, sind am Bauteil gemessene Parameter nicht erforderlich.

### 5.4.2 Stochastisches bzw. vereinfachtes Verfahren nach LINGEMANN

In [Ling10] wird ein stochastisches Verfahren vorgestellt, mit dem die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung in einer Systembetrachtung abgeschätzt werden kann. Das Verfahren basiert auf Ergebnissen der rechnerischen Untersuchungen des Ankündungsverhaltens gemäß der Handlungsanweisung [BMVBS09]. Aufgrund des enormen Rechenaufwandes bei der Anwendung des stochastischen Verfahrens, wurde ein vereinfachtes Verfahren entwickelt, mit dem sich die maximale Auftretenswahrscheinlichkeit eines Versagens ohne Vorankündigung auf der sicheren Seite abschätzen lässt.

Zur Beschreibung der maximal zu erwartenden Auftretenswahrscheinlichkeit wurde ein linearer Ansatz gewählt:

$$P_L = a \cdot x + b$$

mit

$P_L$	logarithmierte Auftretenswahrscheinlichkeit einer Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit (rechnerisches Versagen) ohne Vorankündigung des betrachteten Hauptträgers im jeweiligen Feld. Wenn $P_L > 0$ ermittelt wird, so ist $P_L = 0$ anzunehmen.
$a, b$	Parameter des linearen Ansatzes zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit einer Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit (rechnerisches Versagen) ohne Vorankündigung.
$x$	Eingangswert; das vereinfachte Verfahren ist nur anwendbar für $x > 0$ .

Dabei werden die Geradenparameter  $a$  und  $b$  wie folgt ermittelt:

$$a = \frac{47}{\left[ s_{min} + \frac{q_s}{q} \cdot (s_{max} - s_{min}) \right]^{0,10}} - 60$$

und

$$b = \frac{25}{\left[ s_{min} + \frac{q_s}{q} \cdot (s_{max} - s_{min}) \right]^2} + 0,25$$

mit

$q_s$  Anzahl der Querschnitte mit Spanngliedanzahl  $s_{max}$ . Bei konstanter Spanngliedanzahl im Untersuchungsbereich gilt  $q_s = q$  bzw.  $q_s/q = 1$

$q$  Anzahl der Untersuchungsquerschnitte

$s_{max}$  maximale Spanngliedanzahl im untersuchten Bereich (falls z. B. im Stützbereich eine größere Spanngliedanzahl vorhanden ist). Bei konstanter Spanngliedanzahl im Untersuchungsbereich gilt  $q_s = q$

$s_{min}$  minimale Spanngliedanzahl im untersuchten Bereich (i. d. R. im Feldbereich)

Der Eingangswert  $x$  wird auf Grundlage der vorhandenen und erforderlichen Restspanngliedanzahl gemäß der Handlungsanweisung [BMVBS09] bestimmt:

$$x = \kappa_{cr,max} - \kappa_{br,max}$$

mit

$\kappa_{cr,max}$  Maximum der bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung in den Querschnitten mit  $n_{br,i} \leq n_{cr,i}$  [-]

$\kappa_{br,max}$  Maximum der zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit in den Querschnitten mit erforderlichen bezogenen Spanngliedanzahlen  $n_{br,i} > n_{cr,i}$  [-]

Bei der Anwendung des vereinfachten Verfahrens sind gemäß [Ling10] folgende fünf Anwendungsgrenzen zu beachten:

1) Für die Anwendung des vereinfachten Verfahrens müssen mindestens acht Untersuchungsquerschnitte vorliegen. Obwohl das Verfahren mit zehn Nachweisquerschnitten entwickelt wurde, ist der Fehler bei einer geringeren Anzahl von Untersuchungsquerschnitten klein, wenn mindestens acht Querschnitte vorhanden sind. Wenn weniger Querschnitte vorhanden sind, liegt der Ansatz ggf. auf der unsicheren Seite.

2) In jedem Untersuchungsquerschnitt müssen mindestens vier Spannglieder vorhanden sein. Das stochastische Verfahren ist zwar auch bei einer geringeren Anzahl von Spanngliedern anwendbar, in der Parameterstudie für das vereinfachte Verfahren wurden im Hinblick auf die im Brückenbau üblichen Spanngliedanzahlen jedoch nur Spanngliedanzahlen  $s_{min} \geq 4$  untersucht.

3) Beim vereinfachten Verfahren darf in höchstens 50% der Querschnitte eine gegenüber dem Feldbereich vergrößerte Spanngliedanzahl vorhanden sein (entspricht  $q_s/q = 0,5$ ). In diesen Querschnitten darf gegenüber dem Feldbereich maximal die doppelte Spanngliedanzahl vorliegen. Dies entspricht dem in der Parameterstudie überprüften Wertebereich.

4) Das Verfahren ist anwendbar wenn in maximal 50% der Querschnitte  $\eta_{br,i} > \eta_{cr,i}$  ist, also kein Ankündigungsverhalten vorliegt. In der zugrundeliegenden Parameterstudie wurden keine höheren Anzahlen von Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten vorgesehen, da hier nicht mit einem ausreichenden Ankündigungsverhalten zu rechnen ist.

5) Bei Anwendung des vereinfachten Verfahrens in Bauwerkslängsrichtung müssen je Hüllrohr mindestens 20 Drähte vorhanden sein.

## Parameter

Analog zum Vorgehen gemäß der Handlungsanweisung sind auch beim vereinfachten Nachweis nach [Ling10], bis auf die Anzahl der Spannglieder und der Untersuchungsquerschnitte, keine am Bauteil gemessenen Parameter erforderlich.

## 5.5 Frost-/Frost-Tausalz-Angriff

Bei tiefen Temperaturen gefriert das durch kapillares Saugen oder Diffusion von außen eingedrungene Wasser, sowie das Porenwasser des Betons. Infolge des Phasenübergangs von Wasser zu Eis und der damit einhergehenden Volumenzunahme von ca. 9 % entsteht ein hydraulischer Druck innerhalb des Betongefüges. Darüber hinaus entstehen bei Frost-/Frost-Tausalz-Angriff infolge wechselnder Temperaturen oder Taumitteleinsetz im Betongefüge Druckunterschiede, wodurch bei äußerem Feuchteangebot zusätzlich Wasser in die noch freien Poren eindringt. Wird ein spezifischer Sätti-

gungsgrad erreicht, stehen nicht mehr genügend freie Poren (Ausweichräume) zur Verfügung und es entstehen Zugspannungen im Beton, die zur Zerstörung des Gefüges führen. Darüber hinaus führt der Einsatz von Taumitteln bzw. Tausalzen in den oberflächennahen Bereichen des Betons zu einer weiteren Verstärkung des Angriffs. Zum einen steigt der Sättigungsgehalt bei zunehmendem Salzgehalt in den oberflächennahen Poren an, zum anderen entstehen aufgrund des plötzlichen Wärmeentzuges beim Aufbringen der Tausalze zusätzliche Spannungen im Betongefüge.

Die durch Frost-/Frost-Tausalz-Angriff verursachten Schäden lassen sich grundsätzlich in zwei Arten unterscheiden. Zum einen die Oberflächenabwitterung und zum anderen eine innere Gefügeschädigung. Die äußere Schädigung infolge Oberflächenabwitterung kann zum Eindringen von schädlichen Substanzen in den Beton und zum Freilegen der Bewehrung führen. Im Gegensatz dazu kann die innere Gefügeschädigung, also die fortschreitende Zerstörung des tieferliegenden Betongefüges die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Betons beeinträchtigen.

### Schädigungsmodelle

Zur Beschreibung der Schädigung infolge eines Frost-/Frost-Tausalz-Angriffs liegen in der Literatur zahlreiche Modelle mit verschiedenen Ansätzen vor. Im Folgenden werden zwei Modelle aus dem Model Code for Service Life Design zur Schädigung der Betonstruktur und zur Abwitterung der Betonoberfläche, sowie ein weiteres Modell zur Abwitterung der Betonoberfläche aus [SaVe96] beschrieben.

#### 5.5.1 Schädigungsmodell zur Schädigung der Betonstruktur

Im „Model Code for Service Life Design“ [Model06] wird ein physikalisches Schädigungsmodell zur Beschreibung der Schädigung der Betonstruktur infolge Frost-/Frost-Tau-Angriff angegeben. Das Modell beruht auf dem Konzept, den Widerstand des Betons zu bestimmen und diesen der maßgebenden Einwirkung gegenüberzustellen.

$$g(S_{CR}, S_{ACT}(t < t_{SL})) = S_{CR} - S_{ACT}(t < t_{SL})$$

mit

$S_{CR}$  kritischer Wert des Wassersättigungsgrades [-] („Widerstand“)

$S_{ACT}(t)$  Wassersättigungsgrad zum Zeitpunkt  $t$  [-] („Einwirkung“)

$t$  Zeit [a]

$t_{SL}$  angestrebte Lebensdauer [a]

Der Wassersättigungsgrad  $S_{ACT}$  lässt sich nach [Model06] anhand folgender Gleichung bestimmen:

$$S_{ACT}(t < t_{SL}) = S_n + e \cdot t_{eq}^d$$

mit

$t_{eq}$  äquivalente Feuchteperiode [d]

$S_n$  Sättigungsgrad im  $\sqrt{t}$ -Diagramm am Knickpunkt

$e$  Parameter zur Berücksichtigung des Abfalls der Wasserabsorption

$d$  Exponent zur Berücksichtigung des Abfalls der Wasserabsorption

### Parameter

Kritischer Wert des Wassersättigungsgrades ( $S_{CR}$ ) (Widerstandsseite)

Der kritische Wert des Wassersättigungsgrades wird anhand von Laborversuchen bestimmt. Dabei werden die Probekörper einer festgelegten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt oder einmalig eingefroren. Durch Vergleich der E-Module vor und nach dem Einfrieren ergibt sich der kritische Wassersättigungsgrad zum Zeitpunkt des größten Festigkeitsverlustes.

Wassersättigungsgrad ( $S_{ACT}$ ) (Einwirkungsseite)

Die äquivalente Feuchteperiode  $t_{eq}$  kann aus einer entsprechenden Tabelle im Model Code for Service Life Design [Model06] entnommen werden.

Auf der Grundlage von Versuchen zur Wasseraufnahme lässt sich die Wassersättigung in Abhängigkeit der Zeit in Form von  $\sqrt{t}$ -Diagrammen beschreiben. Der Sättigungsgrad ( $S_n$ ) ist in [Model06] als Knickpunkt der Wassersättigungskurve innerhalb des  $\sqrt{t}$ -Diagramms definiert.

Zur Berücksichtigung des Abfalls der Wasserabsorption sind im Model Code für den Parameter  $e$  und den Exponenten  $d$  Diagramme gegeben.



### 5.5.2 Schädigungsmodell zur Abwitterung der Betonoberfläche

Neben dem Modell zur Beschreibung der Schädigung der Betonstruktur gibt der Model Code for Service Life Design [Model06] ein physikalisches Modell zur Beschreibung der Abwitterung von Beton infolge Frost-/Frost-Tausalz-Angriff an. Analog zum vorhergehenden Modell wird auch bei diesem Modell der Widerstand des Betons bestimmt und der Einwirkung gegenübergestellt.

$$g(T, T_R(t < t_{SL})) = T(t \leq t_{SL}, Cl) - T_R(RH(T), T(t), \dots)$$

mit

$T(t)$  Betontemperatur zum Zeitpunkt  $t$  [K] („Widerstand“)

$t$  Zeit [a]

$t_{SL}$  angestrebte Lebensdauer [a]

$T_R(t)$  kritische Temperatur bei der Witterungsercheinungen auftreten, zum Zeitpunkt  $t$  [K] („Einwirkung“)

Zur Bestimmung der Betontemperatur  $T(t)$  gibt der Model Code folgende Gleichung an:

$$T(t < t_{SL}) = T_{air} + \frac{\alpha_r}{\alpha_r + \alpha_{cv}} \cdot (T_{sky} - T_{air})$$

mit

$T_{air}$  Temperatur der Umgebungsluft [K]

$\alpha_r$  Wärmeübergangskoeffizient infolge Strahlung [W/(m<sup>2</sup>K)]

$\alpha_{cv}$  Wärmeübergangskoeffizient infolge Konvektion [W/(m<sup>2</sup>K)]

$T_{sky}$  korrespondierende Temperatur der Atmosphäre [K]

#### Parameter

Kritische Temperatur ( $T_R$ )

Die kritische Temperatur, bei der Witterungseinflüsse auftreten, wird anhand von Laborversuchen an 28 Tage alten Probekörpern geprüft. Allerdings gibt der Model Code keine weiterführenden Erläuterungen zur Bestimmung des Widerstandes an.

Betontemperatur ( $T$ )

Die Temperatur der Umgebungsluft  $T_{air}$  kann hinreichend genau durch die Daten einer nahegelegenen Wetterstation erfasst werden.

Im Model Code wird ein Diagramm zur Bestimmung der „korrespondierenden Temperatur der Atmosphäre“  $T_{sky}$  in Abhängigkeit der Lufttemperatur angegeben.

Der „Wärmeübergangskoeffizient infolge Strahlung“  $\alpha_r$  kann in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz von Luft und Atmosphäre und des Emissionsgrades bestimmt werden. Dabei wird der Emissionsgrad zu  $\varepsilon = 0,9$  und die Stefan-Boltzmann Konstante zu  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$  definiert.

$$\alpha_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{(T_{sky} - T_{air})^3}{2}$$

Der „Wärmeübergangskoeffizient infolge Konvektion“  $\alpha_{cv}$  kann in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit  $u$  bestimmt werden. Zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit  $u$  können Anemometer (z. B. Schalensternanemometer, Ultraschallanemometer) eingesetzt werden.

$$\alpha_{cv} = 6 + 4 \cdot u$$

Zur direkten Ermittlung der Betontemperatur  $T(t)$  besteht darüber hinaus die Möglichkeit einer Messung am bzw. im Bauteil durch entsprechende Sensoren (z. B. Thermoelemente, Widerstandsthermometer, faseroptische Sensoren).

#### Weiteres Modell zur Beschreibung der Abwitterung von Beton

In [SaVe96] wird ein weiteres Modell zur Beschreibung der Abwitterung von Beton in Abhängigkeit der Umweltbedingungen der Nachbehandlung, der Alterung und des Luftgehaltes angegeben.

$$s = r \cdot t$$

mit

$s$  Abwitterung des statisch ansetzbaren Betons [mm]

$r$  Abwitterungsfaktor [mm/a]

$t$  Bauwerksalter [a]

Der Abwitterungsfaktor  $r$  lässt sich dabei mithilfe folgender Gleichung bestimmen:

$$r = c_{env} \cdot c_{cur} \cdot c_{age} \cdot a^{-0,7} \cdot (f_{ck} + 8)^{-1,4}$$

mit

$c_{env}$  Faktor zur Erfassung der Umweltbedingungen [-]

$c_{cur}$  Nachbehandlungsfaktor [-]

$c_{age}$  Alterungsfaktor [-]

$a$  Luftgehalt des Betons [%]

$f_{ck}$  Charakteristische Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen [N/mm<sup>2</sup>]

Der Nachbehandlungsfaktor  $c_{cur}$  ergibt sich zu:

$$c_{cur} = \frac{1}{0,85 + 0,17 \cdot \log_{10}(d)}$$

mit

$d$  Dauer der Nachbehandlung

Der Alterungsfaktor  $c_{age}$  kann wie folgt bestimmt werden:

$$c_{age} = \frac{1}{1 - 0,045 \cdot p_{sf} - 0,008 \cdot p_{sl} - 0,001 \cdot p_{fl}}$$

mit

$p_{sf}$  Anteil von Silika-Staub [M.-%/z]

$p_{sl}$  Anteil von Hochofenschlacke [M.-%/z]

$p_{fl}$  Anteil von Flugasche [M.-%/z]

### Parameter

Faktor zur Erfassung der Umweltbedingungen ( $c_{env}$ )

In [SaVe96] ist eine Tabelle zur Erfassung der Umweltbedingungen für verschiedene Umgebungsklassen gegeben. Die Werte für  $c_{env}$  variieren dabei von kleiner 20 bis 160.

Nachbehandlungsfaktor ( $c_{cur}$ )

Der Nachbehandlungsfaktor wird mithilfe der Nachbehandlungsdauer bestimmt. Da bei Bestandsbauwerken nicht immer verlässliche Angaben dazu vorhanden sind, wird in [ZiSD11] auf der sicheren Seite die Annahme einer Nachbehandlungsdauer von einem Tag vorgeschlagen.

Alterungsfaktor ( $c_{age}$ )

Der Alterungsfaktor ergibt sich in Abhängigkeit der verwendeten Betonzusatzstoffe (z. B. Flugasche und Silika-Staub) sowie dem Anteil der Hochofenschlacke. Falls in den Bestandsunterlagen keine Angaben zu den Anteilen der Zusatzstoffe enthalten sind, wird in [ZiSD11] vorgeschlagen, den Alterungsfaktor auf der sicheren Seite zu eins anzunehmen, da eine nachträgliche exakte Ermittlung der Zusatzstoffe im Festbeton kaum möglich ist.

Luftgehalt des Betons ( $a$ )

In [SaVe96] werden keine weiteren Angaben bezüglich des Luftgehalts des Betons gegeben. Da der Luftporengehalt üblicherweise am Frischbeton ermittelt wird, ist eine nachträgliche Bestimmung am Festbeton sehr aufwendig und nur mit der Entnahme von Betonproben möglich. In der Literatur sind Luftgehalte von vollständig verdichtetem Beton zwischen 1-2 Vol.-% zu finden.

Charakteristische Würfeldruckfestigkeit ( $f_{ck}$ )

Liegen in den Bestandsunterlagen keine verlässlichen Angaben zur 28-Tage-Festigkeit vor, besteht die Möglichkeit, die charakteristische Würfeldruckfestigkeit durch Ermittlung der Betonfestigkeit am Bauwerk (z. B. Bohrkernprüfung, Rückprallhammer, Ultraschallgeschwindigkeit) abzuschätzen.

## 5.6 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist ein chemischer Prozess, bei dem alkaliempfindliche kieselsäurehaltige Bestandteile der Gesteinskörnung mit den Alkalien in der Porenlösung des Betons reagieren. Die Alkalien können dabei sowohl aus dem Zement, den Betonzusatzstoffen, den Betonzusatzmitteln und der Gesteinskörnung stammen, als auch durch den Einsatz von Taumitteln von außen in den Beton eingetragen werden. Infolge der Wasserzunahme kommt es zu einer Volumenzunahme des Gels, was zu einem treibenden Angriff für den Beton führt. Bei Überschreitung der Zugfestigkeit des Betons kommt es in der Folge zu Schäden in Form von Rissen und Abplatzungen.

### Schädigungsmodell

Im Zuge der Literaturrecherche konnte derzeit kein Modell zur Beschreibung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion gefunden werden. Zur Beurteilung des Schädigungspotenzials auf Grundlage eines Schädigungsmodells besteht somit noch weiterer Forschungsbedarf.

## 5.7 Ermüdung

Infolge zyklisch wechselnder Beanspruchung, vorwiegend aus Verkehr und Wind, kommt es zu Schädigungen des Materialgefüges, was in der Folge zu einem Ermüdungsversagen des Bauteils führen

kann. Die einzelne Beanspruchung kann dabei zum Teil weit unter der statisch maximal ertragbaren Beanspruchung liegen. Der Schädigungsprozess von Beton- und Spannstahl lässt sich in drei Phasen unterteilen. Die erste Phase beginnt mit einer Entfestigung, bei einbetonierten Stäben meist durch einen Riss im Beton, und führt zu ersten Mikrorissen im Materialgefüge (Rissentstehung). In der zweiten Phase breitet sich der Riss, aufgrund der Spannungskonzentration an der Risspitze, langsam weiter aus (stabiles Risswachstum). Die dritte Phase beschreibt den schnellen Rissfortschritt bis zum spröden Bruch, aufgrund der Überbeanspruchung des Restquerschnitts (instabiles Risswachstum). Beton zeigt unter nicht ruhender Belastung ein Ermüdungsverhalten, dessen Mechanismen aufgrund der sehr komplexen Abläufe der Ermüdung im Werkstoff noch nicht vollständig geklärt sind ([Penk04], [Fehl12]).

### Schädigungsmodell

Numerische, auf bruchmechanischen Ansätzen basierende Modelle zur Analyse ermüdungsrelevanter Bauteile, wie sie z. B. bei der Vorhersage der Restlebensdauer von Stahltragwerken zum Einsatz kommen, sind im Betonbau noch nicht ausreichend erforscht. Nach [ZiSD11] ist das bruchmechanische Konzept zudem für Bauwerke des Massivbaus nicht geeignet, da diese u. a. größeren Streuungen unterliegen und die Möglichkeit fehlt, Anrisse von einbetonierten Stäben zu erkennen. So sind die phänomenologischen Aspekte der Ermüdung von Stahlbeton durch die bisherige Forschung gut abgedeckt, aber es ist bis heute nicht gelungen, die in zahlreichen Experimenten beobachteten Phänomene hinreichend zu begründen und einer Ursache zuzuordnen [Fehl12].

Zur Ermittlung einer Wahrscheinlichkeit, dass die Lebensdauer eines Bauwerks infolge Ermüdungsbeanspruchung erreicht wird, kann folgende Grenzzustandsfunktion herangezogen werden:

$$g_{Erm}(t) = 1 - D_{vorh}$$

mit

$g_{Erm}(t)$  Grenzzustandsfunktion für Ermüdung in Abhängigkeit der Zeit [-]

$D_{vorh}$  vorhandene Schädigung auf Grundlage der Schadensakkumulation nach PALMGREN-MINER [-]

Die vorhandene Schädigung  $D_{vorh}$  kann dazu auf Grundlage der Schädigungshypothese nach PALMGREN-MINER ermittelt werden. Dabei wird angenommen, dass jeder Spannungswechsel eine Schädigung des Bauteils verursacht und sich die Schädigungen addieren bis eine Grenzschädigung erreicht wird. Es sei darauf hingewiesen, dass bei diesem Ansatz die Reihenfolge der aufgetretenen Schwingbreiten nicht berücksichtigt wird, und demnach auch die Berücksichtigung von Vorschädigungen kaum möglich ist.

$$D_{vorh} = \sum \frac{n(\Delta\sigma_i)}{N(\Delta\sigma_i)} < 1$$

mit

$n(\Delta\sigma_i)$  auftretende Lastwechsel eine Schwingbreite  $\Delta\sigma_i$  [-]

$N(\Delta\sigma_i)$  ertragbare Lastwechsel eine Schwingbreite  $\Delta\sigma_i$  [-]

### Parameter

Auftretende Lastwechsel und deren Schwingbreiten (Einwirkungsseite)

Zur Beschreibung der auftretenden Lastwechsel und deren Schwingbreiten, ist die Ermittlung der tatsächlichen Beanspruchungen bzw. Bauwerksreaktionen erforderlich.

Dazu kann zum einen die realistische Ermittlung des Beanspruchungskollektivs durch direkt am Bauteil gemessene Parameter (z. B. Dehnungen) erfolgen. Aus diesen gemessenen Parametern, die automatisch alle im Messzeitraum auf das Bauwerk wirkenden Beanspruchungen (Verkehr, Temperatur, Wind, usw.) berücksichtigen, ergeben sich die tatsächlich gemessenen Spannungsschwingbreiten.

Zum anderen können Tragwerksreaktionen infolge der Beanspruchungen durch gemessene oder simulierte Verkehrslasten hinsichtlich der Ermüdungsrelevanz ausgewertet werden [FrKV13]. Zur Auswertung der gemessenen Einwirkungen (Verkehrsaufkommen, Schwerverkehrsanteil, Achslasten, Fahrzeugabstände) können diese durch geeignete Zählverfahren (z. B. Rainflow-Verfahren oder Reservoir-Methode) in eine Häufigkeitsverteilung überführt werden. Aus den Schwingspielen der Einwirkungen werden somit die Spannungsschwingbreiten mithilfe mechanischer Modelle am Bauteil berechnet.

Ertragbare Lastwechsel und deren Schwingbreiten (Widerstandsseite)

Zur Beschreibung der ertragbaren Lastwechsel und deren Schwingbreiten sind Ermüdungsmodelle für die einzelnen Baustoffe erforderlich, die durch entsprechende Wöhlerlinien (S-N-Kurven) beschrieben werden. In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Wöhlerlinien, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht weiter ausgeführt werden. Generell wird das Ermüdungsverhalten von Beton- und Spannstahl maßgeblich von der aufgetragenen Spannungsschwingbreite beeinflusst. Die Oberlast und die Mittelspannung haben nur einen geringen Einfluss, sodass das Ermüdungsverhalten ausreichend genau mit einer Wöhlerlinie dargestellt werden kann, die nur von dem Parameter Spannungsschwingbreite abhängt. Im DIN-Fachbericht 102 wird hierfür eine abschnittsweise lineare Beziehung mit einem Knickpunkt bei  $N^*$  Lastwechseln verwendet. Nach [Penk04] tritt zusätzlich zu den beschriebenen Parametern beim Spannstahl der Effekt der Reibkorrosion auf, der je nach Größe des auftretenden Schlupfes und der vorhandenen Querpressung die Ermüdungsfestigkeit reduziert. Im Gegensatz zum Ermüdungsverhalten von Beton- und Spannstahl ist das Verhalten von Beton hinsichtlich Ermüdung von mehreren Faktoren bzw. Parametern abhängig. Generell ist aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens zwischen Zug- und Druckbeanspruchung des Betons zu unterscheiden. Darüber hinaus haben die Spannungsschwingbreite, die Ober- und Unterspannung, die Lastspielzahl, die Belastungsfrequenz sowie die Materialparameter Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Daher kann das Ermüdungsverhalten des Betons nur über Wöhlerlinien mit mehreren Parametern beschrieben werden.

## 5.8 Zusammenfassung

In der Literatur finden sich zahlreiche Modelle zur Beschreibung relevanter Schädigungsprozesse, insbesondere im Hinblick auf die Korrosion der Bewehrung. Sowohl zur Darstellung der Einleitungsphase (Karbonatisierung und Chlorideindringung) als auch zur Darstellung der Schädigungsphase stehen entsprechende Modelle zur Verfügung. Jedoch sind die Modelle zur Beschreibung der Schädigungsphase sehr komplex und zum Teil von Parametern abhängig, die noch nicht endgültig verifiziert werden konnten. Darüber hinaus stehen

für einige Schädigungsprozesse (z. B. Spannungsrisskorrosion und Alkali-Kieselsäure-Reaktion) derzeit noch keine geeigneten Modelle zur Verfügung.

Insgesamt sind die vorliegenden Schädigungsmodelle von vielen spezifischen Material- und Umweltparametern abhängig, die speziell für das jeweilige Modell erarbeitet und definiert wurden. Daraus ergibt sich die Problematik, dass die Ermittlung der Parameter mit großem Aufwand verbunden ist und einige Parameter nicht mit entsprechender Sensorik direkt am Bauteil zu ermitteln sind, sondern weiterführende (Labor-)Versuche erforderlich werden. Das Ziel wäre es, die vorhandenen Schädigungsmodelle soweit anzupassen und weiterzuentwickeln, dass die Beschreibung der Modelle maßgeblich auf der Grundlage von am Bauteil messbaren Parametern möglich ist. Darüber hinaus ergibt sich, insbesondere im Hinblick auf das Korrosionsmonitoring, ein hohes Entwicklungspotenzial sowohl für die Verbesserung vorhandener Modelle als auch für die Entwicklung und Umsetzung neuer Ideen [BuEB06]. Dazu gehören z. B. die Verbesserung der theoretischen Grundlagen, und die Entwicklung von Modellen zum besseren Verständnis der komplexen Wirkung korrosionsrelevanter Faktoren.

## 6 Relevante Parameter und Sensoren

Ein „intelligentes Überwachungskonzept“ muss auf die auftretenden Schädigungen und relevanten Einwirkungen abgestimmt werden. Dazu ist die Kenntnis relevanter Bauwerksparameter ebenso erforderlich, wie die Möglichkeit zur Erfassung dieser Parameter mit geeigneter Sensorik. Relevante Einwirkungen stellen dabei zum einen die Eingangsgrößen von lokalen und globalen Überwachungssystemen dar, zum anderen können die am Bauwerk gemessenen Einwirkungsgrößen als Parameter in entsprechende Schädigungsmodelle einfließen (vgl. Kapitel 5). Jedoch hat die Auswertung der Schädigungsmodelle gezeigt, dass sich einige Einflussparameter der Modelle nicht mithilfe von Sensoren am Bauteil bestimmen lassen und somit die Beschreibung bzw. Beurteilung von Schädigungen auf Grundlage dieser Modelle oft sehr schwierig oder nicht abschließend möglich ist. Daher stehen spezielle Sensoren zur Erfassung relevanter Parameter zur Verfügung, mit deren Hilfe die Ermittlung von Schädigungen und/oder Schädigungsfortschritten überwacht und bewertet werden kann, ohne



dass die Parameter dabei in komplexe Schädigungsmodelle eingebunden werden müssen.

Da im Rahmen des Forschungsvorhabens der Schwerpunkt auf fest am Bauwerk installierte Sensoren (sowohl Neu- als auch Bestandsbau) gelegt wird, werden Methoden der zerstörungsfreien Prüfungen (ZfP) nicht eingehend behandelt. Zur Erfassung relevanter Parameter steht nach derzeitigem Stand der Technik eine große Anzahl von Sensoren und Verfahren zur Verfügung, die im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht umfassend vorgestellt werden können. Im Folgenden werden vorrangig Sensoren vorgestellt, die sich für den Einsatz bei Massivbrücken eignen. Die Beschreibung der genauen Konstruktions- und Funktionsweisen einzelner Sensoren können den vorhandenen Literaturstellen entnommen werden (u. a. [KrGr10], [BuEB06], [Bude10], [Hols10], [KoJo10], [GrDS06], [EbFr12], [WiKW99], [LiGP11], [Krug07], [MoDe12], [Glln07], [Webe12], [PaFT07], [AkCG03], [ASCE11], [Senso12]).

Generell lassen sich die Sensoren bzw. Messverfahren in drei Gruppen, (i) elektrische und kapazitive Sensoren, (ii) faseroptische Sensoren (FOS) und (iii) geodätische Messverfahren, unterteilen. Die Mehrzahl der konventionellen Sensoren basieren auf der Veränderung von elektrischen oder kapazitiven Größen (i). Zu ihnen gehören z. B. Dehnmessstreifen (DMS), (induktive) Wegaufnehmer, Schwingsaitenaufnehmer, (piezoresistive und kapazitive) Beschleunigungssensoren, Sensoren zur Erfassung von Feuchte und Temperatur. Gegenüber ihrem vergleichsweise günstigen Preis haben diese Sensoren jedoch einige Nachteile, wie beispielsweise die Anfälligkeit gegenüber elektromagnetischen Störquellen und rauen Umgebungen, die Signalabschwächung bei großen Kabellängen und die Temperaturempfindlichkeit einiger Sensoren.

Trotz der im Vergleich zu den konventionellen Sensoren höheren Kosten bieten faseroptische Sensoren (ii) entscheidende Vorteile. Zu nennen sind hier insbesondere Langzeitstabilität, Präzision, Zuverlässigkeit, geringe Abschwächung des Messsignals auch bei großen Leitungslängen, kurze Ansprechdauern und Unempfindlichkeit gegenüber chemisch aggressiven Umgebungen sowie elektromagnetischen Feldern. Darüber hinaus kann bei der Verwendung von Faser-Bragg-Gittersensoren eine große Anzahl von Sensoren mit einer einzelnen Faser in das Bauteil eingebracht werden [ScKK13].

Neuartige Faser-Bragg-Gittersensoren ermöglichen zudem das Multiplexing, also das gleichzeitige Messen mehrerer unterschiedlicher Größen (Dehnungs- und Bewegungszustände sowie Schwingungen) mit einer optischen Faser ([Glln07], [ScKK13]).

Geodätische Messverfahren (iii) basieren auf dem berührungslosen Abtasten der Bauteiloberfläche zur Bestimmung von Durchbiegungen, Schwingungseigenschaften, Positionsänderungen oder Entfernungen. Sie bieten eine hohe Genauigkeit bei der Messung und unterliegen geringen Verschleißbeanspruchungen, sind jedoch häufig kostenintensiv.

## 6.1 Einwirkungen

Im Folgenden werden Parameter und Sensoren zur Ermittlung der relevanten Einwirkungen für Brückenbauwerke erarbeitet. Folgende Einwirkungsparameter werden behandelt:

- Verkehrsbeanspruchung,
- Umgebungs- und Umwelteinflüsse
  - Temperatur,
  - Feuchte,
  - Chloride/Tausalz,
  - CO<sub>2</sub>.

### 6.1.1 Verkehrsbeanspruchung

Methoden zur Ermittlung der Verkehrsbelastung können allgemein in direkte und indirekte Messungen unterteilt werden.

Die direkte Messung von Fahrzeuggewichten kann mithilfe von Weigh-in-Motion-(WIM-)Systemen vorgenommen werden. Dabei kommen Platten- oder Streifensensoren zum Einsatz, die in oder auf der Fahrbahn angeordnet werden. Beim Plattensensor (Wiegeplatten) ergeben sich die Lasten direkt durch die Auswertung von gemessenen Dehnungsänderungen. Streifensensoren hingegen sind piezoelektrische Sensoren, bei denen die aufgezeichneten Messsignale (Spannungen) über die Zeit integriert werden. Streifensensoren weisen i. Allg. eine geringere Genauigkeit als Plattensensoren auf, sind jedoch deutlich günstiger [Luba09]. Zur Bestimmung von Fahrzeuggeschwindigkeiten stehen



darüber hinaus weitere Sensoren und Messeinrichtungen zur Verfügung. Durch hintereinander angeordnete Piezosensoren oder Induktionsschleifen lassen sich die Fahrzeuggeschwindigkeiten über die Zeitspanne beim Überfahren der Messelemente ermitteln. Weitere Möglichkeiten zur Bestimmung von Fahrzeuggeschwindigkeiten sind z. B. Leitpfosten-Zählgeräte auf Seitenradarbasis, Videoaufnahmen (Computer Vision) oder Methoden der Spurverfolgung (Tracking). Derzeit werden zudem Verfahren entwickelt, bei dem Verkehrslasten direkt an den Fahrbahnübergangskonstruktionen erfasst werden können. Mit faseroptischen Sensoren (Rosetten) werden dabei Dehnungen an Lamellen- und Fingerübergängen bzw. an den Stützträgern der Übergänge aufgezeichnet [GrTu12].

Im Gegensatz zu den direkten Methoden erfolgen die indirekten Messungen von Verkehrslasten über globale Ansätze, die das gesamte Bauwerk als Messinstrument nutzen (Bridge Weigh in Motion). Die Lasten ergeben sich dabei unter Einsatz komplexer Algorithmen aus der Analyse der Strukturantwort. Zur Messung werden handelsübliche Sensoren, wie z. B. Dehnungsmessstreifen (DMS) und Wegaufnehmer an ausgewählten Stellen am Bauwerk appliziert.

Darüber hinaus werden zur Erfassung des dynamischen Bauwerkverhaltens vorrangig Beschleunigungssensoren aufgrund ihrer sehr hohen Genauigkeit bei der Erfassung eingesetzt. Dazu steht eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren/Messelemente zur Verfügung, dessen Auswahl von der Frequenz und der zu messenden Größenordnung der Beschleunigung bestimmt wird. Aufgrund ihrer Robustheit, ihrer relativ geringen Größe, der Einsetzbarkeit in einem großen Frequenzbereich usw., werden Piezoelektrische Beschleunigungsmesser am häufigsten verwendet. Zudem kommen besonders zur Erfassung in sehr niedrigen Frequenzbereichen kapazitive Beschleunigungssensoren zum Einsatz. Eine weitere Möglichkeit zur Messung von Beschleunigungen stellen z. B. faseroptische Sensoren (Faser-Bragg-Gitter) dar.

### 6.1.2 Umgebungs- und Umwelteinflüsse

#### Temperatur

Messungen der Luft- und Bauteiltemperaturen gehören zu den grundlegenden Untersuchungen im Rahmen einer (Dauer-)Überwachung von Brücken, da die Temperatur Auswirkungen auf die Baustoffe

(z. B. Frostangriff) und das Gesamtbauwerk (z. B. Temperaturgradienten) hat und zudem häufig andere Messungen maßgeblich beeinflussen kann.

Für die Temperaturmessung steht eine Vielzahl von Sensoren zur Verfügung. Die in der Praxis am häufigsten eingesetzten Sensoren sind Thermoelemente, Widerstandsthermometer und Thermistoren. Widerstandsthermometer sind beim Einsatz von drahtlosen Sensoren bevorzugt einzusetzen und im Vergleich zu Thermoelementen genauer [KrGr10]. Thermoelemente zeichnen sich hingegen durch ihre Robustheit und geringere Kosten aus. Neben den zuvor beschriebenen Sensoren bieten auch faseroptische Sensoren (z. B. Faser-Bragg-Gitter) und Schwingsaitenaufnehmer die Möglichkeit der Temperaturerfassung im und am Bauteil.

#### Feuchte

Zur Bestimmung der Luftfeuchte stehen sog. Hygrometer zur Verfügung. Die gebräuchlichsten Sensoren sind Absorptionsthermometer (z. B. Impedanzsensoren), bei denen sich die Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Feuchte aus der Luft ändert. Bei kapazitiven Sensoren hingegen wird die Luftfeuchte durch Umrechnung der gemessenen Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Feuchte ermittelt.

Die Ermittlung der Bauwerksfeuchte ist deutlich schwieriger und meist aufgrund der Vielzahl von Materialparametern nur mit indirekten Messmethoden möglich. Grundsätzlich eignen sich kapazitive Verfahren, Leitfähigkeitsverfahren, Luftausgleichsverfahren und faseroptische Sensoren. Ein bereits im Praxiseinsatz erprobter Sensor zur Bestimmung der Bauwerksfeuchte ist die Multiringelektrode (Leitfähigkeitsverfahren). Der Sensor wird in die Betondeckung, während der Bauphase oder nachträglich mithilfe von Bohrungen, eingebracht und misst die Feuchteverteilung in Abhängigkeit der Tiefe. Bei Brückenbauwerken werden Multiringelektroden u. a. zur Überwachung der Wirksamkeit von Abdichtungen unter Brückenkappen oder in Fugenbereichen appliziert und können auch nachträglich in das Bauteil eingebracht werden.

#### Chloride/Tausalz

Als Chloridsensoren können mit einer Silberchloridschicht überzogene Silberdrähte bzw. -stäbe eingesetzt werden [BuEB06]. In Abhängigkeit der freien Chloride im Beton bzw. Porenwasser stellt sich am Sensor das Potenzial bezüglich einer Referenz-

elektrode (z. B. eine Mangandoxidelektrode) ein. Bei der Anordnung mehrerer Chloridsensoren in unterschiedlichen Tiefen kann ein entsprechendes Chloridprofil erstellt werden. Der Chloridsensor eignet sich auch unter dem Einsatz von speziellen Mörteln für den nachträglichen Einbau in Bestandsbauwerke.

## CO<sub>2</sub>

Zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Luft stehen zahlreiche handelsübliche CO<sub>2</sub>-Sensoren diverser Hersteller zur Verfügung. Neben der Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Luft, kann mittels einer pH-Wert-Bestimmung der Porenlösung der Karbonatisierungsfortschritt des Betons infolge CO<sub>2</sub> bewertet werden. Jedoch sind derzeit nur wenige Sensoren zur Bestimmung des pH-Wertes verfügbar und ihre Anwendung ist noch nicht ausreichend erprobt [KrGr10]. Zu den zukünftig einsetzbaren Sensoren zählen an faseroptische Sensoren angebundene Spektrophometer bzw. Fluorometer, sowie Modifikationen der Mangandioxidelektrode, welche bereits bei der Korrosionsmessung (bzw. Potenzialmessung) eingesetzt wird.

## 6.2 Schäden

Im Folgenden werden Parameter und Sensoren zur Ermittlung der häufig an Massivbrücken auftretenden Schäden erarbeitet. Relevante Schäden, deren Parameter mit geeigneten Sensoren erfasst werden können, sind:

- unzureichende Betondeckung,
- Risse im Beton,
- Korrosion der Bewehrung,
- Schäden am Vorspannsystem,
- Bauteilverformungen/Durchbiegungen,
- (Fundament-)Setzungen,
- Lagerschäden,
- Schäden an der Ausrüstung.

### 6.2.1 Unzureichende Betondeckung

Eine ausreichend dichte und dicke Betondeckung ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Dauerhaftigkeit von Stahl- und Spannbetonbauwer-

ken [Floh99]. Daher werden im Rahmen der Qualitätssicherung bei der Erstellung von Stahl- und Spannbetonbauwerken Nachweise über die korrekte Lage der Bewehrung gefordert. Da die Ermittlung der Betondeckung mit Sensoren die langfristig am Bauteil verbleiben nicht zweckmäßig erscheint oder entsprechende Sensoren zur flächigen Messung nicht verfügbar sind, wird die Ermittlung der Betondeckung i. d. R. mithilfe zerstörungsfreier Prüfungen (ZfP) durchgeführt. Diese Verfahren werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens, wie bereits in der Einführung zum Kapitel der relevanten Parameter und Sensoren angemerkt wurde, nicht explizit betrachtet. Mögliche ZfP zur Ermittlung der Betondeckung sind magnetische Verfahren, Wirbelstrom-Verfahren, Mikrowellen/Radar-Verfahren, Induktionsthermografie-Verfahren und Durchstrahlungsverfahren [Floh99].

### 6.2.2 Risse im Beton

Zur Beurteilung der Schädigung eines Bauteils oder Bauwerks in Bezug auf Risssschäden kann zwischen zwei Konzepten unterschieden werden. Zum einen kann die Identifikation von neu aufgetretenen Rissen und zum anderen kann die Überwachung bereits vorhandener Risse erfolgen (vgl. ScKK13).

#### Identifikation neuer Risse

Zur Identifikation neuer Risse bzw. gerissener Bereiche eignen sich grundsätzlich globale Überwachungskonzepte, bei denen das Tragverhalten der gesamten Bauwerksstruktur z. B. mithilfe eines FE-Modells abgebildet wird (globale Bauwerksüberwachung). Zur Erfassung der Bauwerksreaktionen wird die gesamte Brücke mit entsprechenden Sensoren, z. B. Dehnungssensoren, Neigungssensoren und Sensoren zur Messung von Bauwerksschwingungen, ausgestattet.

Häufig verwendetet Dehnungssensoren sind Dehnmessstreifen (DMS), die entweder auf die Stahl- und Betonoberfläche appliziert werden, oder in speziellen Sensorgehäusen in den Beton eingebracht werden. Darüber hinaus eignen sich auch Schwingsaitendeformungsmesser (Schwingsaitenaufnehmer) und faseroptische Sensoren (z. B. Faser-Bragg-Gitter) zur Dehnungsmessung.

Häufig eingesetzte Neigungssensoren (auch Inclinometer oder Tiltmeter genannt) sind Schwingsaitenneigungsmesser und elektronische Neigungsmesser, die jedoch den Nachteil aufweisen,

dass sie sich nicht zur Messung von sich schnell ändernden Neigungen in Folge dynamischer Einflüsse eignen. Im Gegensatz dazu eignen sich Servo-Neigungsmesser auch für die Messung sich schnell ändernder Neigungen. Darüber hinaus können auch spezielle faseroptische Messaufnehmer (sog. SOFO-Sensoren) zur Neigungsmessung eingesetzt werden [ScKK13]. Zudem sind, insbesondere beim Einsatz drahtloser Sensornetze, kostengünstige MEMS-Sensoren (Micro-Electro-Mechanical-Systems) zur Erfassung von Neigungsänderungen verfügbar, deren Langzeitstabilität jedoch noch nicht ausreichend untersucht ist.

Zur Erfassung des dynamischen Bauwerkverhaltens (Bauwerksschwingungen) werden vorrangig Beschleunigungssensoren verwendet. Dazu steht eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren zur Verfügung, die in Abhängigkeit der Frequenz und der zu messenden Beschleunigung ausgewählt werden können. Neben den gängigen Piezosensoren (piezoelektrische oder piezoresistive Sensoren) ist die Erfassung von Schwingungen mit kapazitiven Beschleunigungssensoren und Servo-Beschleunigungssensoren möglich. Zudem stehen bereits kostengünstige MEMS-Sensoren zur Verfügung, die eine ausreichende Genauigkeit und Auflösung aufweisen [KrGr10].

Abschließend sei angemerkt, dass bei einer globalen Bauwerksüberwachung zur Identifikation gerissener Bereiche die gemessenen Bauwerksreaktionen ausreichend von der Rissbildung beeinflusst werden müssen, sodass die Rissbildung erst zu einem fortgeschrittenen Stadium erkannt wird.

### Überwachung bestehender Risse

Zur Überwachung gerissener Bereiche bzw. vorhandener Risse und zur Ermittlung von Rissbreiten(-änderungen) einzelner Risse stehen verschiedene Sensoren zur Verfügung.

Mit speziellen Dehnmessstreifen (Riss-DMS) kann die Rissentwicklung bzw. die Rissöffnung erfasst werden. Die DMS werden direkt über die vorhandenen Risse geklebt, sodass die Messgenauigkeit i. d. R. sehr gut ist. Da der Sensor jedoch mit zunehmender Rissaufweitung zerstört wird, eignet er sich nicht für die Dauerüberwachung von Bauwerken. Zur kontinuierlichen und dauerhaften Rissüberwachung eignen sich insbesondere Wegsensoren (induktive Wegaufnehmer), die über den jeweiligen Rissen angeordnet werden. Darüber

hinaus eignen sich zur Rissüberwachung allgemein Sensoren zur Aufnahme von Verschiebungen bzw. Dehnungen, wie beispielsweise faseroptische Sensoren (Faser-Gragg-Gitter) oder Schwingsaitenaufnehmer. Eine weitere Möglichkeit, Risse zu detektieren und zu überwachen bietet die Schallemissionsanalyse. Zur Erfassung der im Beton freiwerdenden Schallwellen müssen die entsprechenden Sensoren an ausgewählte Stellen des Bauteils appliziert werden.

Eine berührungslose Alternative zu den beschriebenen Sensoren bieten optische Verfahren. Mit photogrammetrischen Verfahren unter Verwendung von (Video-)Kameras oder mit Verfahren der Laser- und Mikrowellen-(Radar-)Interferometrie lassen sich relative Bewegungen eines Punktes am Brückentragwerk auswerten und somit das Risswachstum beschreiben. Diese Verfahren sind jedoch insbesondere bei größeren Bauwerken (Brücken) i. d. R. ungenauer als z. B. induktive Wegaufnehmer und mit einem hohen Aufwand der Installation am Bauwerk verbunden.

Weitergehende Entwicklungen bei der Rissüberwachung stellen z. B. intelligente Folien (Smart Film) dar, mit denen Risse in Betonbauwerken auch flächenhaft detektiert werden können. Eine weitere, aus dem Flugzeugmonitoring adaptierte Methode, stellt der Comparative-Vacuum-Monitoring-(CVM-) Sensor dar. Der sich im Vakuum befindende Sensor reagiert auf atmosphärische Druckänderungen und zeichnet daraufhin die Rissentwicklung auf [ScBr13].

### 6.2.3 Korrosion der Bewehrung

Die Bewehrungskorrosion und insbesondere die zwei Phasen des Korrosionsprozesses (Einleitungs- und Schädigungsphase) wurde bereit im Kapitel 5.3 beschrieben.

Zur Überwachung der Einleitungsphase des Korrosionsprozesses stehen zum einen Parameter und Sensoren zur direkten Beurteilung von Korrosionserscheinungen zur Verfügung, zum anderen können die wesentlichen Parameter bzw. Einflussgrößen, welche die Voraussetzungen einer Korrosion darstellen, bestimmt werden. Zu den maßgeblichen Einflussgrößen zählen insbesondere die Bauwerksfeuchte, die Chloridkonzentration, die Temperatur, der pH-Wert der Porenlösung und die Betonzusammensetzung. Bis auf die Betonzusammensetzung, welche i. d. R. am Festbeton nur durch zerstörende

Prüfungen im Labor aufwendig zu bestimmen ist, sind entsprechenden Sensoren zur Ermittlung der Einflussparameter bereits im Kapitel 6.1.2 beschrieben.

Zur direkten Bestimmung von Korrosionsvorgängen bieten sich Messungen von Korrosionspotenzialen (elektrochemische Messverfahren) sowie Messungen von Kurzschlussströmen an geeigneten Korrosionselementen an. Der meistverwendete Sensor zur Messung von Korrosion in Betonbauteilen ist der Anodenleiter [ScKK13]. Aufgrund der Sensorgeometrie und der Positionierung direkt an der Bewehrung ist der Sensor für den Einsatz bei neuen oder in der Sanierung befindlichen Bauwerken vorgesehen. Die Korrosionsaktivität wird dabei in Form von Kurzschlussströmen gemessen und kann für unterschiedliche Tiefenlagen bestimmt werden. Auf dem gleichen Messprinzip wie der Anodenleiter basiert auch die Korrosionsuhr. Dieser für den Einsatz an neuen Bauwerken konzipierte Sensor ermöglicht ebenso tiefenabhängige Aussagen zur Korrosionsaktivität. Ein weiterer direkter Korrosionssensor ist der sog. „Stellvertreter-sensor“ bzw. Drahtsensor, bei dem sehr dünne Stahldrähte übereinander angeordnet sind. Durch die stufenweise Durchrostung der einzelnen Drähte wird eine Änderung des elektrischen Widerstandes und somit die Korrosionsaktivität messbar. Speziell für Bestandsbauwerke stehen darüber hinaus Bohrkernanoden z. B. die Expansionsring-Anode und Nagelsensoren zur Verfügung. Die Sensoren werden mithilfe entsprechender Bohrungen in das Bestandsbauwerk eingebracht und ermöglichen die Messung der Elementströme und der Potenzialunterschiede zur Ermittlung des Korrosionspotenzials in unterschiedlichen Tiefenlagen. Darüber hinaus eignet sich zur Potenzialüberwachung der Einbau interner Bezugs Elektroden. Die Elektroden werden i. d. R. bereits in der Bauphase in unmittelbarer Nähe zum Bewehrungsstahl positioniert, eignen sich aber auch zum nachträglichen Einbau in entsprechend hergestellte Bohrlöcher bei Bestandsbauwerken. Als Bezugselektrode hat sich aufgrund des günstigen Ruhepotenzials und der guten Wartungseigenschaften der Einsatz von Mangandioxid Elektroden in den letzten Jahren durchgesetzt [BuEB06].

Im Gegensatz zu den aufgeführten Sensoren, mit denen in erster Linie die Einleitungsphase der Korrosion erfasst werden kann, sind für die Zerstörungsphase kaum einsatzfähige Sensoren verfügbar. Im Rahmen des DFG Sonderforschungsbe-

reichs 477 wurden zwar Verfahren zur Bruchdetektion und Ortung von bereits geschädigten Stahl- oder Spannstahlquerschnitten auf Grundlage der reflektometrischen Spektroskopie und der elektromagnetischen Resonanzmessung entwickelt, jedoch sind sie für den Praxiseinsatz noch nicht ausreichend erprobt [Bude06].

## 6.2.4 Schäden am Vorspannsystem

### Risse im Bereich der Koppelfugen

Zur Beurteilung von Koppelfugenrissen ist es zunächst erforderlich, Rissbreitenänderungen mit entsprechenden Sensoren, z. B. mithilfe von induktiven Wegaufnehmern zu messen (vgl. Kapitel 6.2.2). Um darüber hinaus das Verformungsverhalten der gerissenen Koppelfuge zu bewerten, ist die Kenntnis weiterer Parameter notwendig. In [BAST98] werden im Hinblick auf die Ermüdungsbruchgefährdung der Koppelfugen Messungen der Dehnungsänderungen des Spannstahls und Wegänderungen des Betons gefordert.

Aufgrund der Abhängigkeiten von der Luft- und Bauteiltemperatur sowie der auftretenden Verkehrsbelastung sind auch diese Parameter zu bestimmen. Sensoren zur Ermittlung der einzelnen Messparameter sind bereits in den vorherigen Kapiteln aufgeführt.

Zur Dauerüberwachung gerissener Koppelfugen eignen sich zudem lokale Überwachungsansätze unter Einsatz nichtphysikalischer Modelle. Dazu können zum einen die Modelle mithilfe von Kalibrierfahrten entwickelt werden und zum anderen kann die Beziehung zwischen Rissbreitenänderungen und Temperaturbeanspruchung Berücksichtigung finden [ScKK13].

### Spanngliedbrüche

Die Detektion von Spannstahlbrüchen kann mit indirekten Methoden zur Erfassung der Rissbildung im Beton erfolgen. Dabei ist die Aufnahme von Riss- und Dehnungsänderungen u. a. mit entsprechenden Dehnmessstreifen (DMS) oder faseroptischen Sensoren sowie mit der Schallemissionsmethode möglich (vgl. Kapitel 6.2.2). Darüber hinaus kann die Identifikation von Spannstahlbrüchen mit Methoden der globalen Bauwerksüberwachung auf Grundlage des Tragverhaltens der gesamten Brücken erfolgen (vgl. Kapitel 6.2.2). Jedoch ist die Rissidentifikation hierbei erst dann möglich, wenn



es infolge eines Spanngliedbruchs zu einer deutlichen Änderung der Tragwerkssteifigkeit kommt.

Neben den indirekten Methoden eignen sich Spannkraftmessungen zur direkten Beurteilung der Spannglieder. Die Erfassung der Spannkraft kann dazu beispielsweise mit Kraftmessdosen, magnetoelastischen Spannkraftmessungen oder Wirbelstrom-Multisensoren erfolgen. Kraftmessdosen können während der Applikation der Spannglieder in der Neubauphase oder bei der nachträglichen Verstärkung mit externer Vorspannung am Festanker angebracht werden und die Vorspannkraft kontinuierlich messen. Die Vorteile der magnetoelastischen Spannkraftmessungen bestehen in den nur geringen Messunsicherheiten, der Möglichkeit eines nachträglichen Einbaus auch bei Bestandsbauwerken, sowie der Möglichkeit, den Sensor an einer beliebigen Stelle des Spannglieds einbauen zu können [ScBr13].

Zur Ortung von Spannstahlbrüchen stehen zudem zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP), wie beispielsweise Endoskopie, Ultraschallecho-Verfahren, Radiografie, elektromagnetische Resonanzmessungen, usw. zur Verfügung. Die einzelnen Verfahren und deren Anwendungsmöglichkeiten sind u. a. in [StSM09] und [Hols10] detailliert beschrieben.

### 6.2.5 Bauteilverformungen/Durchbiegungen

Zur Erfassung kleiner Verschiebungen am Bauteil eignen sich potenziometrische, induktive oder kapazitive Wegaufnehmer. Die Vorteile dieser Sensoren sind ihre Haltbarkeit und Robustheit, die gute Messauflösung und die Möglichkeit bei dynamischen Messungen eingesetzt zu werden. Für größere Messdistanzen bieten sich zudem Schwingsaitenaufnehmer, faseroptische Sensoren (spezielle SOFO-Sensoren), Laserwegsensoren und Seilwegsensoren an [KrGr10]. Darüber hinaus stehen hydrostatische Messsysteme auf der Grundlage des Schlauchwaagenprinzips für die Durchbiegungsmessung an Brücken zur Verfügung. Aufgrund ihrer Robustheit und Genauigkeit eignen sich diese Sensoren besonders zur Messung von Höhenunterschieden an Brücken. Eine berührungslose Alternative zu den beschriebenen Sensoren bieten optische Verfahren, wobei diese Verfahren jedoch insbesondere bei größeren Bauwerken i. d. R. ungenauer als z. B. induktive Wegaufnehmer sind (vgl. Kapitel 6.2.2).

### 6.2.6 (Fundament-)Setzungen

Setzungen von Fundamenten, die sich infolge von Stützensenkungen auf den Brückenüberbau auswirken können, lassen sich mit geodätischen Messgeräten erfassen. Mithilfe moderner elektronischer Tachymeter lässt sich die Lage von Reflektoren, die an ausgewählten Stellen des Bauwerks (Widerlagern, Stützen, usw.) angebracht sind, automatisch bestimmen und eine Positionsänderung erkennen. Als Nachteile bei der Verwendung der Tachymeter werden die Empfindlichkeit gegenüber atmosphärischen Einflüssen sowie die umständliche bzw. aufwändige Positionierung der Geräte bei Brückenbauwerken angeführt [ScBr13]. Neben Tachymetern existieren weitere Geräte zur Messung von Setzungen, wie Laser-Entfernungsmesser oder Extensometer [ScKK13].

### 6.2.7 Lagerschäden

Die Beurteilung der Funktionstüchtigkeit von Lagern, sowie die Erkennung von Lagerschäden und Verschleißerscheinungen können mithilfe von Kraftmessungen, Horizontal- und Vertikalverschiebungen sowie Neigungen im Bereich der Lager erfolgen.

Zur Ermittlung vertikaler Lagerkräfte eignen sich insbesondere Kraftmessdosen oder die Überwachung des Öldrucks im Inneren des entsprechenden Lagers. Die Überwachung von Lagerverschiebungen kann beispielsweise mit handelsüblichen Wegaufnehmern erfolgen. Weitere Sensoren zur Aufnahme von Verschiebungen sind bereits im Kapitel 6.2.5 aufgeführt. Für die Ermittlung von Lagerverdrehungen stehen unterschiedliche Neigungssensoren, wie Schwingsaitenneigungsmesser, elektronische Neigungsmesser, Servo-Neigungsmesser oder spezielle faseroptische Messaufnehmer zur Verfügung (vgl. Kapitel 6.2.2).

### 6.2.8 Schäden an der Ausrüstung

#### Belag und Abdichtung

Die Funktionsfähigkeit des Belags oder der Abdichtung kann mithilfe von Feuchtemessungen im angrenzenden Bereich überprüft werden. Der Feuchtegehalt kann mittels entsprechender Feuchte-sensoren, beispielsweise Multiringelektroden oder faseroptischen Sensoren (vgl. Kapitel 6.1.2) bestimmt werden. Eine weitere Entwicklung auf der Basis faseroptischer Sensoren stellen textilbasierte



Sensorsysteme zur flächigen Feuchteüberwachung horizontaler Bauteile dar [ScKK13].

### Fahrbahnübergangskonstruktion

Parameter zur Bewertung der Fahrbahnübergangskonstruktion sind maßgeblich auftretende Horizontalbewegungen (Verschiebungen) und Verdrehungen sowie Undichtigkeiten. Sensoren zur Ermittlung von Verschiebungen und Verdrehungen sind bereits in den vorhergehenden Kapiteln aufgeführt. Zur Bestimmung von Undichtigkeiten eignen sich dieselben Methoden und Sensoren, die bereits im Abschnitt „Belag und Abdichtung“ aufgeführt sind.

Neben den Messungen zur Beurteilung der eigentlichen Fahrbahnübergangskonstruktion ist die Er-

mittlung von überfahrenden Fahrzeugen und deren Gewichten an der Übergangskonstruktion, gerade im Hinblick auf globale Überwachungskonzepte von besonderem Interesse. Entsprechende Sensoren und Konzepte sind im Kapitel 6.1.1 (Verkehrsbeanspruchung) aufgeführt.

### 6.3 Übersicht der relevanten Parameter und Sensoren

Tabelle 7 fasst die in den vorhergehenden Kapiteln dargestellten relevanten Parameter, die entsprechenden Sensoren zur Erfassung dieser Parameter am Bauteil, sowie Vor- und Nachteile der jeweiligen Sensoren zusammen.

Parameter		Sensoren	Vorteile	Nachteile	
Verkehr	direkt bzw. lokal (WIM)	Plattensensoren	größere Genauigkeit als Streifensensoren	deutlich teurer als Streifensensoren, Beeinflussung durch dynamische Effekte	
		Streifensensoren		Beeinflussung durch dynamische Effekte und Temperatureinflüsse	
	indirekt bzw. global (B-WIM)	Dehnmessstreifen	s. Dehnung/Spannung	s. Dehnung/Spannung	
		Wegaufnehmer	s. Verformung/Verschiebung	s. Verformung/Verschiebung	
Temperatur		Thermoelement	robust, kostengünstig, keine externe Stromquelle, schnelle Reaktion	begrenzte Sensitivität	
		Widerstandsthermometer	robust, niedriger Strombedarf (Pt-Elemente), genauer als Thermoelemente	relativ teuer, lange Reaktionszeiten, Stromquelle erforderlich	
		Schwingsaitenaufnehmer	s. Dehnung/Spannung	s. Dehnung/Spannung	
		Faseroptische Sensoren (FOS)	s. Verformung/Verschiebung	s. Verformung/Verschiebung	
Feuchte	Luftfeuchte	Impedanzsensoren	ausreichend genau	Taupunktbeständigkeit und Alterung beeinflussen Genauigkeit	
		kapazitive Sensoren	ausreichend genau	Taupunktbeständigkeit und Alterung beeinflussen Genauigkeit	
	Materialfeuchte	Faseroptische Sensoren (FOS)	kostengünstig, unempfindlich gegenüber Strahlung, robust gegenüber extremer Witterung und aggressiver Umgebungen	Sensoren relativ kostengünstig aber Messsystem teuer	
		Multiringelektrode	nachträglicher Einbau möglich	hohe Anforderungen an Ausführung	
		Indirekte Messmethoden			
		kapazitive Verfahren			
		Leitfähigkeitsverfahren	auch im überhygroskopischen Bereich einsetzbar	beeinflusst von Temperatur, Salzgehalt und Karbonatisierung	
		Luftausgleichsverfahren		keine Rückschlüsse im überhygroskopischen Bereich möglich	
Chlorid	Chloridsensoren (Silberdrähte)	nachträglicher Einbau möglich	hohe Anforderungen an Ausführung		

Tab. 7: Übersicht relevanter Parameter und Sensoren

Parameter	Sensoren	Vorteile	Nachteile	
pH-Wert (CO <sub>2</sub> )	Spektrophotometer, der Indikatorfarbstofffärbung erkennt und umrechnet	Kosten relativ gering	Langzeitstabilität umstritten, Einsatzmöglichkeiten stark eingeschränkt	
	Modifikation von Mangandioxidelektrode	noch nicht ausreichend erprobt		
	an faseroptische Sensoren angebundene Spektrophotometer bzw. Fluorometer	s. Verformung/Verschiebung	s. Verformung/Verschiebung	
Rissentwicklung/ Rissöffnung	(spezielle) Riss-DMS	Genauigkeit i.d.R. sehr gut	Riss-DMS wird bei Rissöffnung zerstört	
	Wegsensoren	kontinuierliche Erfassung		
	Schallemissionsanalyse			
	faseroptische Sensoren (FOS)	s. Verformung/Verschiebung	s. Verformung/Verschiebung	
	Wegaufnehmer	s. Verformung/Verschiebung	s. Verformung/Verschiebung	
Korrosion(-gefahr und -prozess)	Anodenleiter/-Korrosionsuhr	Bestimmung von Korrosionsgeschwindigkeiten möglich	nachträglicher Einbau nicht möglich, Positionierung muss bei der Planung festgelegt werden	
	Bohrkern-anode	Expansionsring-Anode	Einsatz an Bestandsbauwerken möglich	Bohrung erforderlich, hohe Präzision bei der Installation erforderlich, für horizontale Bauteile nur bedingt geeignet
		Nagel-sensoren	Einsatz an Bestandsbauwerken möglich	mehrere Bohrungen erforderlich
	Drahtkorrosionssensor	s. Materialfeuchte	s. Materialfeuchte	
	Multiringelektrode	s. Materialfeuchte	s. Materialfeuchte	
	Potenzialfeldmessung		keine Einstufung fester Grenzwerte möglich, keine Aussage über Zustand der Bewehrung	
	galvanostatische Pulsmessung	Bewehrungszustand kann beurteilt werden	zeitintensiv	
Dehnung/Spannung	Dehnmessstreifen	kostengünstig, kann nachträglich appliziert werden	anfällig gegenüber elektromagnetischen Einflüssen, empfindlich gegenüber Feuchtigkeit, Klebstoffe und DMS altern, rel. hoher Strombedarf	
	Schwingsaitenaufnehmer	gutes Langzeitmessverhalten, hohe Genauigkeit	nicht für Dehnungen infolge dynamischer Einflüsse geeignet, relativ hoher Strombedarf	
	Faseroptische Sensoren (Faser-Bragg-Gitter)	strahlungs- und korrosionsunempfindlich, hohe Reichweite, gutes Langzeitverhalten, schnelle Reaktionszeiten	Sensoren relativ kostengünstig aber Messsystem teuer, z. T. Temperaturempfindlich	
	magnetoelastische Spannungssensoren			
	Photogrammetrie		ungenau bei großen Bauwerke (Brücken)	

Tab. 7: Fortsetzung

Parameter	Sensoren	Vorteile	Nachteile
Verformung/Verschiebung	Wegaufnehmer	gutes Langzeitverhalten, für dynamische Messungen einsetzbar, gute Auflösung, geringe Temperaturempfindlichkeit	relativ teuer, Installation z. T. problematisch
	Laserwegsensoren		relativ hoher Strombedarf
	Schwingsaitenaufnehmer	s. Dehnung/Spannung	s. Dehnung/Spannung
	Schlauchwaagensysteme	höhere Robustheit bei modernen Systemen	nur für geringdynamische Messungen geeignet
	faseroptische Sensoren	s. Dehnung/Spannung	s. Dehnung/Spannung
	Laser-Vibrometer		
	Tachymeter		empfindlich gegenüber atmosphärischen Einflüssen
Neigung	Servoklinometer	für schnell auftretende Neigungsänderungen geeignet, hohe Genauigkeit	
	MEMS-Sensoren	s. Beschleunigung/Vibration (Schwingung)	ungenauer als Servoklinometer
	Schwingsaitenaufnehmer	geeignet für Langzeitmessungen	nicht für schnell auftretende Neigungsänderungen geeignet
	faseroptische Sensoren (SOFO-Sensoren)	s. Verformung/Verschiebung	
Beschleunigung/ Vibration (Schwingung)	Piezosensoren	robust, temperaturunempfindlich, gute Genauigkeit, großer Frequenzbereich, keine externe Energieversorgung erforderlich	
	kapazitive Beschleunigungssensoren	speziell für niedrigfrequente Schwingungen geeignet	
	Servo-Beschleunigungssensoren	siehe Servoklinometer	siehe Servoklinometer
	Laser-Doppler-Vibrometer	hohe Genauigkeit, z. T. berührungslose Untersuchung mehrerer Punkte ohne Neuausrichtung möglich	teuer
	MEMS-Sensoren	kostengünstig, sehr stromsparend, geringe Abmessungen	
	Laserinterferometer	direkte Messung bzw. Aufzeichnung von Weg-Zeit-Diagrammen	

Tab. 7: Fortsetzung

## 7 Messdatenerfassung

Zur Zusammenführung der Messdaten einzelner Sensoren, sowie zur Aufbereitung der Messdaten für die weitere Informationsgewinnung ist ein Datenerfassungssystem erforderlich. Ein solches System besteht aus einer Übertragungseinheit (drahtgebunden oder drahtlos) zur Übermittlung der (digi-

tal) Signale an einen Zentralrechner und einer geeigneten Energieversorgung (siehe Kapitel 7.1). Da bei der Bauwerksüberwachung häufig verschiedene Arten von Sensoren eingesetzt werden, ist die Konfiguration des Datenerfassungssystems vorrangig von den Signalarten, die von den Sensoren ausgehen (Unterscheidung zwischen elektrischen und faseroptischen Sensoren) abhängig [ScKK13].

Darüber hinaus wird bei der Datenerfassung zwischen zeitdiskreten und ereignisbasierten Konzepten unterschieden (siehe Kapitel 7.2).

## 7.1 Datenübertragung

Die Übertragung der Messdaten, sowie der Zusammenschluss einzelner Sensoren zu einem Netzwerk können entweder drahtgebunden oder drahtlos erfolgen.

### 7.1.1 Drahtgebundene Systeme

Bei drahtgebundenen Systemen wird die Datenübertragung zwischen der Sensorik und dem Datenerfassungssystem mit herkömmlichen Kupferleitungen gewährleistet. Der Vorteil drahtgebundener Systeme besteht in der Möglichkeit, große Datenmengen in kurzer Zeit zu übertragen und gleichzeitig die Stromversorgung der Sensoren sicherzustellen. Nachteile ergeben sich jedoch aufgrund der hohen Anschaffungskosten sowie der zeit- und kostenintensiven Verlegearbeiten der Leitungen. Darüber hinaus sind Kupferkabel anfällig gegenüber Störeinflüssen und können daher zu unerwünschten Störsignalen (Rauschen) führen.

Für den Datentransfer drahtgebundener Systeme kommen im Wesentlichen entweder Stern-Topologien oder Bus-Topologien zum Einsatz. Bei der Stern-Topologie werden alle Sensoren einzeln an das zentrale Datenerfassungssystem angeschlossen, sodass eine große Menge an Kabeln erforderlich wird. Jedoch ermöglicht diese Anordnung hohe Datenübertragungsraten und eine zeitsynchrone Datenerfassung. Bei der Bus-Topologie werden die Sensoren auf mehrere einzelne Datenerfassungseinheiten aufgeteilt. Die einzelnen Einheiten werden dabei über eine zentrale Leitung (Bus) miteinander verbunden. Dadurch kann die Anzahl an erforderlichen Kabeln im Vergleich zur Stern-Topologie i. d. R. deutlich verringert werden. Jedoch ergeben sich bei dieser Anordnung Nachteile bezüglich der Bandbreite sowie der zeitlichen Synchronisation der einzelnen Erfassungseinheiten.

### 7.1.2 Drahtlose Systeme

Bei drahtlosen Systemen erfolgt die Datenübertragung von der Sensorik zu einem Zentralrechner über drahtlose Sensorknoten, sog. Motes. Die Kommunikation basiert dabei auf gängigen Funkübertra-

gungsstandards, wie beispielsweise WLAN, Bluetooth oder ZigBee [ScKK13]. Aufgrund des Entfalls der Kabel, sind drahtlose Systeme deutlich günstiger als drahtgebundene Systeme und können mit vergleichsweise geringem Aufwand am Bauwerk installiert werden. Jedoch entfällt mit den Kabeln auch die Möglichkeit einer direkten Stromversorgung der Sensoren und der Sensorknoten. Daher kommen alternative Energiequellen wie Industriebatterien, wieder aufladbare Akkus in Verbindung mit geeigneten Ladeelektroniken wie z. B. Energy Harvesting (siehe Kapitel 7.1.3) oder Kondensatoren zum Einsatz. Aufgrund der insgesamt jedoch beschränkt zur Verfügung stehenden Energie autarker Systeme müssen Kompromisse zwischen der Funktionalität der Messeinheiten und dem Energieverbrauch eingegangen werden. Derzeit sind bereits hinsichtlich des Stromverbrauchs optimierte Sensoren (MEMS-Sensoren) für verschiedene Anwendungsfälle (z. B. Temperatur-, Feuchtemessungen) verfügbar, die aufgrund ihrer geringen Größe in die Motes integriert werden können und zudem sehr kostengünstig sind. Da in der Regel jedoch die Funkübertragung und nicht die Datenerfassung den höchsten Stromverbrauch aufweist, ist eine möglichst minierte Funkkommunikation anzustreben [GrKr06]. Durch effiziente Datenanalysen und -reduktionen, die bereits auf dem Mote realisiert werden, ist es möglich, die Funkkommunikation zu optimieren.

Für den Aufbau von Sensornetzen kommen Stern-Topologien oder Multihop-Topologien zum Einsatz [ScKK13]. Bei der Stern-Topologie werden die Daten aller Sensoren zu einem zentralen Sensor bzw. Mote gesendet. Im Gegensatz zur Stern-Topologie, die sich vornehmlich für kleine Sensornetze mit kurzen Übertragungsdistanzen eignet, können bei der Multihop-Topologie Daten über größere Distanzen bei ausgedehnten Sensornetzen übertragen werden. Dazu werden die Daten über jeweils benachbarte Knoten bis zum Zielknoten weitergesendet. Der Vorteil dieser Topologie besteht in dem geringeren Stromverbrauch, ist jedoch mit höheren Anforderungen an die Programmierung und Konfiguration des Sensornetzes verbunden [KrGr10].

### 7.1.3 Energieversorgung

Eine zuverlässige Stromversorgung ist die Voraussetzung für die Messung, Vorverarbeitung, Speicherung und Übertragung von Daten, insbesondere beim Einsatz eines drahtlosen Überwachungskonzeptes an Brückenbauwerken. Aufgrund der be-

grenzten Lebensdauer von Batterien, stellt die Methode des Energy Harvesting (wörtlich: Energie-Ernten) eine Alternative für den Einsatz bei Langzeitüberwachungen von Bauwerken dar ([ScKK13], [EbFr12]). Mit Energy Harvesting wird allgemein die Gewinnung elektrischer Energie aus dem Umfeld elektronischer Geräte für deren Betrieb bezeichnet. Die vorhandene Umweltenergie, z. B. in Form von Licht, Temperatur, Druckgradienten oder Bewegungsenergie, wird in elektrische Energie umgewandelt. Für den Einsatz an Brückenbauwerken eignen sich besonders Bewegungsenergieumwandler, welche die durch Verkehrslasten ausgelösten Schwingungen in elektrische Energie umwandeln. Gleichzeitig kann die Schwingung der Brücke als Messgröße für die globale Bauwerksüberwachung (Strukturüberwachung) genutzt werden. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde z. B. der Einsatz piezoelektrischer Bewegungswandler erarbeitet und an einer Brücke erfolgreich getestet (siehe [EbFr11]). Dabei war die gewonnene elektrische Energie ausreichend, um die Sensorknoten zur Messung des dynamischen Bauwerkverhaltens zu betreiben. Da der größte Energiebedarf jedoch von der Funkübertragung der Daten zu einem Zentralrechner ausgeht, muss die Datenerfassungseinheit derzeit noch mit anderen Energiequellen, wie z. B. mit Photovoltaik oder Windrädern, versorgt werden. Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf ergibt sich somit zum einen bei der Effizienz bzw. Energiebereitstellung der Energy Harvesting Komponenten und zum anderen besteht das Ziel darin, den Energiebedarf der Funkübertragungseinheit und der Sensoren zu reduzieren.

## 7.2 Messwerterfassung und Sensorplatzierung

Das Monitoring von Bauwerken bzw. Brücken beinhaltet eine kontinuierliche Erfassung und Auswertung relevanter Messwerte über einen längeren Zeitraum. Eine grundlegende Anforderung an die Messwerterfassung besteht darin, die Zeitabstände zwischen den einzelnen Messungen zu optimieren, um den Aufwand für die Datenauswertung und -speicherung sowie den Stromverbrauch der Messungen zu minimieren. Bei der Erfassung von Messdaten zu bestimmten Zeitpunkten wird grundlegend zwischen einer zeitdiskreten und einer ereignisbasierten Überwachungsmethode unterschieden. Bei der zeitdiskreten Messdatenerfassung werden die zeitlichen Abstände zwischen einzelnen Messintervallen, sowie die Messdauer innerhalb der festge-

legten Intervalle bereits im Vorfeld definiert. Der Ansatz eignet sich vorrangig zur Überwachung sich langsam ändernder Parameter, wie z. B. Korrosion, Feuchte oder Temperatur. Beispielsweise verändern sich die korrosionsrelevanten Parameter aufgrund der Diffusionsbarriere der Betondeckung eher langsam. Somit ist eine Datenerfassung im Allgemeinen einmal pro Woche ausreichend; lediglich zu Beginn der Messungen können kürzere Zeitintervalle sinnvoll sein [BuEB06]. Um den Aufwand und den Energiebedarf für die Messdatenerfassung, -speicherung und -übertragung gering zu halten, sind die Messintervalle zu optimieren. Neben den Messintervallen (Messraten) sind die jeweiligen Messbereiche und Messgenauigkeiten (Sensitivitäten) wesentliche Merkmale im Hinblick auf die Messwerterfassung. Eine generelle Festlegung dieser Merkmale ist dabei u. a. aufgrund der individuellen Randbedingungen des Bauwerks, dem Ziel der Überwachung (Genauigkeit der Ergebnisse), der eingesetzten Messtechnik sowie den zur Verfügung stehenden Mitteln nur eingeschränkt möglich. Tabelle 8 beinhaltet Beispiele für Genauigkeits- und Häufigkeitsbereiche der Messdatenerfassung auf der Grundlage von in der Literatur enthaltenen Daten (u. a. [KrGr10], [VeWe08], [ZiWG09], [Retz07], [BoBe03], [LiGH09], [GeÖP08], [RePK08], [Luba09], [Penk04], [Wong04], [Flüc97], [SoDS06], [HoBB08], [BuEB06], [Aube06], [LaBe06]) sowie eigenen Untersuchungen. Wie bereits angemerkt, muss die konkrete Festlegung der Genauigkeits- und Häufigkeitsbereiche der Messdatenerfassung individuell für jede zu überwachende Brücken in Abhängigkeit der Randbedingungen der Brücke sowie den zu erfassenden Einwirkungen und Schäden erfolgen.

Ein Nachteil der zeitdiskreten Methode ist jedoch, dass keine Messwerte bei plötzlich eintretenden Ereignissen aufgenommen werden, die außerhalb der zuvor definierten Messintervalle liegen.

Bei der ereignisbasierten Messdatenerfassung hingegen wird die Messung erst durch das Auftreten eines bestimmten Ereignisses (Triggersignals) aktiviert. Insbesondere temporäre Ereignisse, wie beispielsweise die Überfahrt eines schweren Fahrzeugs, können als Triggersignal definiert werden. Darüber hinaus kann auch die Veränderung der Systemstruktur selbst, wie beispielsweise die Schädigung von Strukturteilen ein Triggersignal darstellen (siehe auch Tabelle 9). Die Voraussetzung zur Erfassung der definierten Ereignisse ist jedoch die Ausstattung der Brücken mit entsprechend permanent messenden Sensoren [KrGr10].



Parameter (Messwert)		Messintervall	Messbereich	Messgenauigkeit
Verkehrslast	Fahrzeuggewicht	siehe „Dehnungen infolge Verkehr“		
Temperatur		0,01 bis 12 Stunden	[°C] (-20 bis +40 °C)	0,1 bis 0,5 °C
Windgeschwindigkeit		1 bis 2,5 Hz	[m/s] 1 bis 40 m/s	0,1 bis 1 m/s
Feuchte	rel. Luftfeuchtigkeit	0,01 bis 12 Stunden	[% r.F.] (15 bis 100% r.F.)	1 bis 5 %
Korrosion (Einleitungsphase)	Bauteilfeuchte (Wassergehalt)	Tage bis Monate	[M.-%] (0 bis 100 M.-%)	1 bis 5 %
	Chloridkonzentration	Tage bis Monate	[mol/l] (0 bis 1,5 mol/l)	0,01 bis 0,05 mol/l
	pH-Wert (CO <sub>2</sub> )	Tage bis Monate	7-14	0,1 bis 0,5
Korrosion (Schädigungsphase)	Korrosionsstrom (Stromstärke)	Tage bis Monate	[µA] (0 bis 300 µA)	0,1 bis 1 µA
	Korrosionspotenzial (Spannung)	Tage bis Monate	[mV] (± 500 mV)	1 mV
	elektrischer Widerstand	Tage bis Monate	[Ω] (0 bis 500 Ω)	1 Ω
Rissentwicklung	infolge Verkehr	≥ 100 Hz	[µm] bis [cm]	0,001 bis 0,01 mm
	infolge Temperatur	0,01 bis 12 Stunden		
Dehnung	infolge Verkehr	≥ 100 Hz	[µm/m]	0,1 bis 1 µm/m
	infolge Temperatur	0,01 bis 12 Stunden		
Verformung/ Verschiebung	Durchbiegung	nach Bedarf	[mm] bis [cm]	0,01 bis 1 mm
	Baugrundsetzung		1 mm	
Neigung	infolge Verkehr	≥ 100 Hz	[°] (± 10°)	0,01°
	infolge Setzung	< 1 Hz		
Beschleunigung/ Schwingung		≥ 100 Hz (mind. 10-fache Eigenfrequenz)	[m/s <sup>2</sup> ] (0 bis 50 m/s <sup>2</sup> )	0,01 bis 0,1 m/s <sup>2</sup>

Tab. 8: Beispiele für Genauigkeits- und Häufigkeitsbereiche der Messdatenerfassung in Abhängigkeit des Messparameters

Untersuchungsparameter	Ursache (Ereignis)	Relevante Messwerte
Temperaturänderung	Klima	Temperatur
Feuchtigkeitsänderung	Klima	Feuchtigkeit
Spannstahlversagen Rissentwicklung z. B. in Beton Ermüdung von Stahlverbindungen	z. B. Korrosion, Temperatur, statische oder dynamische Lasten usw.	Schallemissionen Spannungen, Dehnungen oder Verschiebungen Dynamisches Verhalten (Eigenmodes, Dämpfung)
Maximale/mittlere/minimale absolute Dehnungen, Spannungen oder Verschiebungen	z. B. Klima, Lasten, Wind, usw.	Spannungen, Dehnungen oder Verschiebungen
Tragverhalten infolge dynamischer Beanspruchungen	z. B. besonderer Zug, Wind, Erdbeben, Schwerlastverkehr	Eigenmodes, Dämpfung, Dehnungen, Durchbiegungen
Tragverhalten infolge statischer Beanspruchungen	z. B. besondere Belastung	Spannungen, Dehnungen, Verschiebungen, Durchbiegungen
Struktur-/Bauteilversagen	Alle (z. B. Korrosion, Erdbeben, Materialermüdung, Unfälle)	Alle

Tab. 9: Exemplarische Details zur ereignisbasierten Messwerterfassung aus [KrGr10]

Unabhängig von den zuvor dargestellten Methoden zur Datenerfassung hängt die Forderung der Messgenauigkeit bzw. -empfindlichkeit zur Erfüllung der entsprechenden Aufgabe wesentlich von den zu messenden Größen und deren Sensitivität hinsichtlich der zu erkennenden Schädigungen ab [ScKK13]. Allerdings ist zu beachten, dass eine große Sensitivität hinsichtlich der Schadensidentifikation ebenso zu einer zunehmenden Empfindlichkeit hinsichtlich wechselnder Umwelt- und Betriebszustände führt. Dies ist bei der Informationsgewinnung zu berücksichtigen [WoFM07].

Für ein dauerhaftes Überwachungssystem sind, neben den Methoden zur Erfassung relevanter Parameter, die Optimierung der Anzahl von Sensoren sowie der Sensorplatzierung von großer Bedeutung. In Abhängigkeit des eingesetzten Überwachungssystems (lokale oder globale Bauwerksüberwachung) ergeben sich dafür unterschiedliche Anforderungen.

Bei einer globalen Überwachung zur Identifizierung von Schäden mit Auswirkungen auf die Steifigkeit des Gesamtsystems, sind die entsprechenden Parameter zur Erfassung von Tragwerksreaktionen (z. B. Dehnungen, Verformungen, Beschleunigungen) i. d. R. an mehreren Stellen des Bauwerks zu erfassen. Dabei wird die Anzahl zu verwendender Sensoren zumeist von wirtschaftlichen Kriterien (z. B. Kosten für den Sensor/das Überwachungssystem und den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln) bestimmt. Zur Ermittlung der relevanten Messorte, insbesondere bei großen bzw. komplexen Bauwerken, können automatisierte Verfahren zum Einsatz kommen, die entweder auf einem sequentiellen Vorgehen oder auf der Anwendung von Optimierungsalgorithmen basieren [vgl. ScKK13]. Die Identifikation von Strukturveränderungen auf der Basis globaler Steifigkeitsparameter ist derzeit Inhalt vieler Forschungstätigkeiten. Zur Messung des dynamischen Verhaltens eignen sich beispielsweise Untersuchungen der niederfrequenten Bauwerksschwingungen anhand eines FE-Modells.

Lokale Schäden haben hingegen (zunächst) keine Auswirkungen auf das globale Tragverhalten und können nur durch Messungen in unmittelbarer Umgebung des Schadens erkannt werden. Somit können riss- oder korrosionsgefährdete Bereiche (beispielsweise Koppelfugen oder Kappen) oder Bereiche, die offensichtlich starken Beanspruchungen unterliegen, mit entsprechender Sensorik gezielt

überwacht werden. Entsprechende Sensoren werden nur in den geschädigten Bereichen der Konstruktion erforderlich und müssen zur Überwachung des Schädigungsfortschritts individuell und aufgabenspezifisch an die zu überwachende Brückenstruktur angepasst werden. Die Identifizierung bzw. Festlegung der Messorte (Hot Spots) kann neben der Schadenserkenkung im Rahmen der visuellen Brückenprüfungen mit einer Schwachstellenanalyse für das vorhandene Bauwerk erfolgen (vgl. Kapitel 4.2).

Zur Erfassung des globalen Tragverhaltens über einen längeren Zeitraum erscheint es nach [EbFr12] zunächst nicht (wirtschaftlich) erfolgversprechend zu sein, Brücken vollumfassend mit Sensorik auszustatten. Besonders bei neueren mängelfrei errichteten Brücken, die nach aktuellem Stand der Technik ausgeführt wurden, ist die Zeitspanne bis zum Eintritt relevanter Schäden i. d. R. so groß, dass der Zusatznutzen im Vergleich zu den ohnehin stattfindenden Brückenprüfungen, auch im Hinblick auf den finanziellen Mehraufwand, kaum darstellbar ist [EbFr12]. Dabei bleibt jedoch zum einen unberücksichtigt, dass an einer mit Sensorik ausgestatteten Brücke mögliche Extremereignisse erfasst werden können und im Anschluss das Tragverhalten der Brücke auf Grundlage der aufgezeichneten Messwerte bewertet werden kann. Zum anderen lassen sich mithilfe entsprechender Sensoren bereits Schäden im Hinblick auf die Standsicherheit erkennen, die sich (noch) nicht auf das Gesamttragverhalten auswirken. Darüber hinaus kann es ebenso zielführend sein, Brücken dauerhaft an maßgebenden Stellen („hot spots“) mit Sensoren auszustatten, um Schäden im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit, aus denen standsicherheitsrelevante Schäden resultieren können, zu erfassen.

## 8 Handbuch zur Darstellung von Schädigungspotenzialen

Die Ergebnisse der Bewertung von schädigungsrelevanten Einwirkungen und Konstruktionen sowie die Ermittlung relevanter Parameter und Sensoren zur Erfassung dieser Parameter am Bauwerk werden zusammenfassend in Form eines Handbuchs dargestellt. Dazu werden die Brücken in unterschiedliche Gruppen zusammengefasst. In Absprache mit der BAST wurden zur Kategorisierung die folgenden Unterscheidungsmerkmale definiert:

- Bauwerksart (Hohlkasten-, Plattenbalken-, Plattenbrücken, sonstige Brücken),
- Baujahr (< 1967, 1968-1979, 1980-2002, ≥ 2003),
- Baustoff (Stahlbeton, Spannbeton),
- statisches System in Brückenlängsrichtung (Einfeld-, Mehrfeldsystem).

Aufgrund dieser Einteilung ergeben sich durch die Kombination der einzelnen Merkmale insgesamt 64 verschiedene Bauwerksgruppen. Es wurde daraufhin eine Darstellungsform erarbeitet, die es ermöglicht, alle relevanten Informationen für jede Bauwerksgruppe tabellarisch auf einer Seite (DIN A4, Querformat) darzustellen. Das Handbuch ist dem Bericht als zusätzliche Anlage beigefügt.

Neben den zur Fertigstellung der Brücke gültigen Regelwerken werden die für die jeweilige Bauwerksgruppe relevanten Einwirkungen und Bauteile bzw. Konstruktionen aufgeführt. Ausgehend von den Ergebnissen der Bewertung des Schädigungspotenzials werden diese sowohl für die Einwirkungsseite als auch für die Widerstandsseite dargestellt. Den relevanten Größen werden die entsprechenden Parameter (Messgrößen) zugeordnet. Darüber hinaus wird eine Auswahl geeigneter Sensoren zur Erfassung der jeweiligen Parameter am Bauteil angegeben. Wie bereits im Kapitel 4.1 beschrieben, wurde die Auswertung der Schädigungspotenziale maßgeblich auf Grundlage der Ergebnisse der tatsächlich aufgetretenen Schäden (Datenbank der BAST) unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Literatur vorgenommen. Daher ist zur Einordnung des Schädigungspotenzials der jeweiligen Bauwerksgruppe zusätzlich die Anzahl von Brücken aus der Datenbank in jeder Bauwerksgruppe angegeben. Ergänzend zu den 64 Bauwerksgruppen werden auf der letzten Handbuchseite relevante Parameter sowie Sensoren zur Erfassung dieser Parameter für neu zu errichtende Brückenbauwerke (Neubau) zusammengestellt.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Bericht enthält die Beurteilung schädigungsrelevanter Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Betonbrücken im Rahmen des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“

der BAST. Dazu sollen innovative Systeme zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung von Brücken in Echtzeit auf der Grundlage direkt am Bauwerk erfasster Parameter, entwickelt werden. Die Erfassung relevanter Einwirkungen und Widerstandsveränderungen (Schäden bzw. Schadensfortschritte) soll dabei maßgeblich durch den Einsatz drahtloser Sensoren und drahtloser Sensornetze erfolgen.

Die Grundlage zur Beurteilung von Schädigungspotenzialen bildet die Auswertung tatsächlich aufgetretener Schäden an Stahlbeton- und Spannbetonbrücken. Insgesamt wurden dazu über 100.000 Schäden an ca. 3.475 Brücken aus der Datenbank des Programmsystems SIB-Bauwerke, die von der BAST zur Verfügung gestellt wurde, aufbereitet und untersucht. Die Verteilung der untersuchten Brücken hinsichtlich der Merkmale Altersstruktur, Brückenlänge, Brückenklasse, Zustandsnote, Bauwerksart, usw. spiegelt dabei weitestgehend die Verteilung des Gesamtbrückenbestandes im Zuge der Bundesfernstraßen wider. Zur Identifikation häufiger Schäden und relevanter Bauwerke wurden die Schadensdaten für unterschiedliche Merkmale ausgewertet und die Ergebnisse für die einzelnen Bauteilgruppen (Überbau, Unterbau, Lager und Ausrüstung) zusammengefasst. Zur weiteren Bewertung des Schadensausmaßes wurden darüber hinaus die Bewertungszahlen nach RI-EBW-PRÜF für die einzelnen Merkmale Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit ausgewertet.

Im Anschluss wurden mögliche Schadensursachen an Massivbrücken systematisch aufbereitet. Die Bewertung von Schadensursachen erfordert detaillierte Kenntnisse über die chronologische Entwicklung von Vorschriften und Normen für den Bau von Brücken aus Stahlbeton und Spannbeton, die anhand folgender Parameter zusammengefasst wurden:

- Einwirkungen aus Verkehr,
- Koppelfugen,
- Spannungsrisskorrosion (SpRK),
- Schubtragfähigkeit,
- Temperatur,
- Mindestbewehrung/Rissbreitenbegrenzung,
- Dauerhaftigkeit/Chloride.

Neben der Aufbereitung der chronologischen Entwicklung wurden Schäden infolge Planungs- und

Entwurfsfehlern, sowie Ausführungsfehlern aufbereitet und (relevante) Einwirkungen für Brücken explizit dargestellt.

Den Schwerpunkt des Berichts bilden die Darstellung und Bewertung von Schädigungspotenzialen, sowohl für die Widerstandsseite (Bauteile/Konstruktion), als auch für die Einwirkungsseite (relevante Einwirkungen). Die Bewertung von Bauteilen und Konstruktionen (Widerstandsseite) erfolgt dabei maßgeblich auf Grundlage der Auswertungen tatsächlich aufgetretener Schäden. Relevante Bauteile wurden im Hinblick auf die Standsicherheit sowie Dauerhaftigkeit getrennt für die einzelnen Bauteilgruppen bewertet. Darüber hinaus erfolgte eine explizite Auswertung von Schäden an Brücken mit einem Baubeginn ab 2003 mit dem Ziel, Hinweise für mögliche Schäden und gefährdete Bauwerksbereiche neuer Brücken zu identifizieren. Die Beurteilung der Einwirkungsseite hingegen erfolgte auf der Grundlage bestehender Erkenntnisse aus der Literatur sowie eigener weitergehender Untersuchungen. Zu den relevanten Einwirkungen, die im Rahmen des Projektes untersucht wurden, zählen:

- Verkehrsbeanspruchungen,
- Temperatur,
- Umgebungsbedingungen (z. B. CO<sub>2</sub>),
- Frost-/Frost-Tausalz-Angriff,
- Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR),
- Spannungsrissskorrosion (SpRK),
- Feuchte.

Die Beurteilung des Schädigungspotenzials von Verkehrslasten erfolgte dabei maßgeblich auf Grundlage des Schwerverkehrseinflusses. U. a. wurden dazu die von der BAST zur Verfügung gestellten Verkehrszahlen von Brücken in Form der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV-Zahlen) ausgewertet und im Hinblick auf die Merkmale Standsicherheit und Verkehrssicherheit bewertet. Darüber hinaus wurden die möglichen Auswirkungen zukünftiger Verkehrsentwicklungen (z. B. Giga-Liner) dargestellt.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden geeignete Schädigungsmodelle zur Beschreibung relevanter Schädigungsprozesse bei Brücken aus Stahl- und Spannbeton dargestellt und die modellspezifischen Parameter der einzelnen Modelle detailliert aufbereitet. Dabei wurde aufgezeigt, welche Parameter mit entsprechenden Sensoren am Bauteil erfassbar

sind und für welche Parameter weitergehende Untersuchungen erforderlich werden.

Die Aufbereitung relevanter Parameter zur Erfassung von Einwirkungen und Schäden an Brückenbauwerken bildet einen weiteren Schwerpunkt des Projektes. Neben der Beschreibung relevanter Parameter werden geeignete Sensoren zur Erfassung der Parameter am Bauteil aufbereitet. Dabei werden neben elektrischen und kapazitiven Sensoren sowie geodätischen Messverfahren insbesondere faseroptische Sensoren dargestellt und abschließend in Form einer Tabelle unter Angabe von Vor- und Nachteilen zusammengefasst.

Darüber hinaus wurden die Grundlagen eines Datenerfassungssystems, sowie die Möglichkeiten der zeitdiskreten und ereignisbasierten Messdatenerfassung und der drahtgebundenen und drahtlosen Datenübertragung dargestellt. Im Hinblick auf die Energieversorgung von drahtlosen Sensoren bzw. Sensornetzen wird die Methode des Energy Harvesting vorgestellt. Abschließend werden geeignete Messintervalle für die Erfassung einzelner Parameter aufgezeigt und die Möglichkeiten und das grundlegende Vorgehen der Sensorplatzierung bei globaler und lokaler Bauwerksüberwachung aufgezeigt.

Die Zusammenstellung der Ergebnisse aus der Bewertung von schädigungsrelevanten Einwirkungen und Konstruktionen sowie der Ermittlung relevanter Parameter und Sensoren zur Erfassung dieser Parameter am Bauteil erfolgte abschließend in Form eines Handbuchs für definierte Bauwerksgruppen.

Die Darstellung von Parametern und Sensoren belegt, dass bereits eine Vielzahl von Sensoren zur Erfassung der relevanten Parameter zur Verfügung steht. Jedoch ist bei einigen Sensoren bzw. Systemen die Eignung im Praxiseinsatz an Brücken und insbesondere die Eignung bei einem Langzeitmonitoring noch nicht ausreichend belegt. Insgesamt besteht der zukünftige Forschungsbedarf somit weniger in der Entwicklung neuer Messsysteme, sondern in der Weiterentwicklung bestehender Systeme insbesondere im Bereich des Messaufwands, der Datenübertragung und -auswertung sowie der Energieversorgung drahtloser Systeme.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich darüber hinaus bei der Weiterentwicklung bestehender Sensoren im Hinblick auf die Anwendbarkeit bei Bestandsbrücken, sowie der Anpassung vorhandener Schädigungsmodelle, mit dem Ziel die Modelle



maßgeblich auf der Grundlage von am Bauteil messbaren Parametern zu beschreiben.

Darüber hinaus sollte aufbauend auf dem Handbuch zur Darstellung der Schädigungspotenziale eine weitergehende Typisierung von Brücken zur Schadenserkenkung mit geeigneten Überwachungsansätzen und Sensoren erfolgen. Das Ziel wäre es, explizite Empfehlungen auszusprechen, welche Parameter an bestimmten Brückentypen erfasst werden müssen und welche Sensoren dabei vorzugsweise zum Einsatz kommen. Darüber hinaus sollte erarbeitet werden, zu welchem Zeitpunkt (Neubauphase, oder erst bei Auftreten eines Schadens) diese Sensoren am Bauteil appliziert werden müssen.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich insbesondere im Bereich der ganzheitlichen Schadenserfassung auf Grundlage eines globalen Überwachungssystems. Ein globaler Ansatz bietet den Vorteil, dass potenzielle Schwachstellen nicht im Vorfeld bekannt sein müssen sondern durch Auswertung der Tragwerksreaktionen erkannt und charakterisiert werden können. Dabei müssen Brücken nicht vollumfänglich mit Sensorik ausgestattet werden, so dass die Kosten für ein Überwachungssystem vergleichsweise gering sind. Darüber hinaus ergeben sich bei der Analyse der Tragwerksreaktionen weiterführende Erkenntnisse insbesondere in Bezug auf die Verkehrslastermittlung (z. B. überladenen Lkw, Sondertransporte, usw.).

## 10 Literatur

- [AkCG03] AKTAN, A. E., CATBAS, F. N., GRIMMELSMANN, K. A., PERVIZPOUR, M.: Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges. Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute. Philadelphia, USA, 2003
- [ASCE11] ASCE SEI Committee on Structural Identification of Constructed Systems: Structural Identification (St-Id) of Constructed Facilities – Approaches, Methods and Technologies for Effective Practice of St-Id. State-of-the-Art Report, 2011
- [Aube06] AUBERG, R.: Zerstörungsfreie Bauwerksdiagnostik – Anwendung und Grenzen bei Betonbauwerken. Beton- und Stahlbetonbau (101), Heft 8, 2006
- [BaKH11] BAKHRAMOV, O., KAPS, C., HÖHN, P., HOHLE, I.: Prototypische Anwendung von lichtoptischen Feuchtsensoren. BFT, 2011
- [BaMP11] BAUER, T., MÜLLER, M., PATZ, R., SCHWARZ, J., VIET TUE, N., WILHELM, T.: Zur Schadensverteilung des durch Spannungsrisskorrosion geschädigten vergüteten Spannstahls bei Brückenbauwerken. Bautechnik Heft 3, 2011
- [BASt85] Bundesanstalt für Straßenwesen: Risse in Spannbetonüberbauten. Bergisch Gladbach, 1985
- [BASt98] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Abteilung Brücken- und Ingenieurbau: Handlungsanweisung zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit vorgespannter Bewehrung von älteren Spannbetonbrückenüberbauten. Ausgabe 1998
- [BMDG10] BetonMarketing Deutschland GmbH: Alkali-Kieselsäure-Reaktion – Erfahrungen aus der Praxis und aktuelle Regelwerke. Verlag Bau+Technik, Erkrath, 2010
- [BMV82] Bundesministerium für Verkehr – Abteilung Straßenbau: Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken. Dortmund 1982
- [BMV94] Bundesministerium für Verkehr – Abteilung Straßenbau: Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken. Dortmund 1994
- [BMVBS] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- [BMVBS06] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bericht über die Qualität, Dauerhaftigkeit und Sicherheit von Spannbetonbrücken. Berlin, 2006
- [BMVBS07] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025. Kurzfassung des Forschungsberichtes FE-Nr. 96.0857/2005, München/Freiburg, 2007
- [BMVBS09] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung älterer Brückenbauwerke, die mit vergütetem, spannungsrisskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden. Berlin, 2009



- [BMVBS11] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Ausgabe 05/2011
- [BoBe03] BOLLE, G., BERNDT, R.-D.: Innovatives Informationsmanagement bei Monitoring-Untersuchungen. In: Beiträge zur Fachtagung Sonderkapitel aus dem Brücken- und Ingenieurbau an 21./22. Oktober 2003, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2003, S. 87-91
- [Bram10] BRAML, T.: Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf Grundlage der Ergebnisse von Überprüfungen am Bauwerk. Dissertation am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München, 2010
- [BrKB11] BRAML, T., KEUSER, M., BERGMEISTER, K.: Entwicklung eines baupraktischen Näherungsverfahrens zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse von Bauwerksprüfungen. Beton- und Stahlbetonbau Heft 3, 2011
- [BrKe09] BRAML, T., KEUSER, M.: Beurteilung der Tragfähigkeit von geschädigten Stahlbetonbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse einer Bauwerksprüfung. Beton- und Stahlbetonbau Heft 5, 2009
- [BuBr11] BUSCHMEYER, W., BRAASCH, T.: Verstärken von Betonbrücken – Einbinden von Einwirkung und Widerstand im Expertensystem XPS Modul III. Ingenieurgesellschaft für Bautechnik und Betonbau GbR, Essen, 2011
- [Bude06] BUDELMANN, H.: Monitoring von Betonbauwerken: Sensoren, Methoden, Erfahrungen. In: Sicherheitsgewinn durch Monitoring? – Zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Grübl. Freunde des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt e. V. Darmstadt, 2006
- [Bude10] BUDELMANN, H.: Neue Mess- und Monitoringverfahren für Stahlbeton- und Spannbetonbauwerke. In: Abschluss-Symposium zum DFG Sonderforschungsbereich 477, Technische Universität Braunschweig, 2010
- [BuEB06] BURKERT, A., EICH, G., BÄßLER, R., ISECKE, B.: Corrosion Monitoring im Bauwesen. In: Sicherheitsgewinn durch Monitoring? – Zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Grübl. Freunde des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt e. V. Darmstadt, 2006
- [BuLu06] BUSCHMEYER, W., LUBASCH, P.: Temperaturbeanspruchungen von Straßenbrücken aus Beton. Bauingenieur Band 81, April 2006
- [Bund11] Deutscher Bundestag: Zustand von Brücken im Zuge von Bundesfernstraßen in Deutschland. Drucksache 17/5325, 2011
- [Bund96] Deutscher Bundestag: Zweiter Bericht über Schäden an Bauwerken der Bundesverkehrswege. Drucksache 13/3970, 1996
- [BuSL09] BUSCHMEYER, W., SCHNELLENBACH-HELD, M., LUBASCH, P.: Schwerlastverkehr auf Bundesfernstraßen – Erfassung, Erhaltungsbedarf für Brücken. In: KASCHNER, R.: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen. Bundesanstalt für Straßenwesen Heft B 68, 2009
- [DaSS08] DAUBERSCHMIDT, C., SODEIKAT, C., SCHIEßL, P., GEHLEN, C.: Monitoring von Verkehrsbauten – Kontinuierliche Zustandserfassung. Tiefbau Heft 3, 2008
- [DGZfP90] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung: Merkblatt für Bewehrungsnachweis und Überdeckungsmessungen bei Stahl- und Spannbeton. Merkblatt B02, Berlin, 1990
- [Dura00] DuraCrete: Probabilistik Performance based Durability Design on Concrete Structures. DuraCrete Final Technical Report, The European Union – Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R17, 2000
- [EbFr11] EBERT, C., FRIEDMANN, H.: Piezogenerator zur Versorgung eines Sensornetzwerks für Structural Health Monitoring für Brücken und anderen Strukturen. In Forschung & Technologie, Plus 2/2011, S. 424-432
- [EbFr12] EBERT, C., FRIEDMANN, H.: Brückenüberwachung zur Lebensdaueroptimierung – technische Voraussetzungen und messtechnische Umsetzung. Messtechnik im Bauwesen, 2012
- [EmHe09] EMPELMANN, M., HEUMANN, G.: Qualitätsmerkmale lebensdauerorientierter Brückenbauwerke. Bauingenieur Band 84, Oktober 2009

- [Fehl12] FEHLMANN, P.: Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken. Dissertation am Institut für Bau- statik und Konstruktion, ETH Zürich, 2012
- [FiMe11] FINGERLOOS, F., MEIER, A.: Dauerhaf- tigkeit von Betonbauteilen und Fundamenten unter durchlässigem Fahrbelag. Beton- und Stahlbetonbau Heft 106, 2011
- [Fing08] FINGERLOOS, F.: Historische technische Regelwerke für den Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. Ernst & Sohn, 2008
- [Floh99] FLOHRER, C.: Messung der Betonde- ckung und Ortung der Bewehrung. In: DGZFP- Berichtsband 66, Vortrag 4, Fachtagung Bau- werksdiagnose – Praktische Anwendung Zerstö- rungsfreier Prüfungen, DGZfP, München, 1999
- [Flüc97] FLÜCKIGER, D.: Chloridsensoren: Be- stimmung der korrosionsauslösenden Chloride im Beton. Schweizer Ingenieur und Architekt Vol. 115, 1997
- [FrBK11] FREUNDT, U., BÖNING, S., KASCHNER, R.: Straßenbrücken zwischen aktuellem und zu- künftigem Verkehr – Straßenverkehrslasten nach DIN EN 1991-2/NA. Beton- und Stahlbe- tonbau Heft 106, Ernst & Sohn, 2011
- [FrKV13] FREUNDT, U., KÖNKE, C., VOGT, R., BÖNING, S., BEINERSDORF, H.: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädi- gungszustandes von Brückenbauwerken. 2. Zwischenbericht zum BAST-Projekt FE 15.532/ 2011/HRB, Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt, Weimar, 2013
- [FrHB07] FRIEDRICH, B., HOFFMANN, S., BRÄCKELMANN, F.: Auswertung des nieder- sächsischen Modellversuchs zum Einsatz von „GigaLinern“. Schlussbericht, Institut für Ver- kehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Leibniz Universität Hannover, 2007
- [Gehl00] GEHLEN, C.: Probabilistische Lebens- dauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Deut- scher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 510, Berlin, 2000
- [Geiß09] GEIßLER, K.: Auswirkungen der Zulas- sung von 60-t-Lkw auf Brückenbauwerke im Zuge der Bundesfernstraßen. In: KASCHNER, R.: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen. Bundesan- stalt für Straßenwesen Heft B 68, 2009
- [GeKo83] GEYMAYER, H.: Auffinden und Bewerten von Schäden an Massivbrücken. Institut für Werkstoffkunde, Festigkeitslehre und Material- prüfung; Institut für Stahlbeton- und Massivbau, TU Graz, 1983
- [GeÖP08] GEIER, R., ÖSTERREICHER, M., PIRCHER, M.: Langzeitmessungen an einer Eisenbahnbrücke. Beton- und Stahlbetonbau (103), Heft 6, 2008
- [GrHL07] GRÜNBERG, J., HANSEN, M., LIEBIG, J. P.: Ermüdungsbeanspruchungen von Beton- brücken unter zunehmendem Schwerverkehr. Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 9, Ernst & Sohn, 2007
- [Glln07] GLISIC, B., INAUDI, D.: Fibre Optic Methods for structural Health Monitoring. Wiley-Interscience, 2007
- [GrDS06] GRAUBNER, C.-A., DUDA, H., SPENGLER, M.: Messverfahren und deren praktische Anwendung. In: Sicherheitsgewinn durch Monitoring? – Zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Grübl. Freunde des Instituts für Massivbau der Technischen Univer- sität Darmstadt e. V., Darmstadt, 2006
- [GrKr06] GROßE, C., KRÜGER, M.: Drahtlose Sen- sortechnik für die Dauerüberwachung von Bau- werken. In: Sicherheitsgewinn durch Monito- ring? – Zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Grübl. Freunde des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darm- stadt e. V., Darmstadt, 2006
- [GrTu12] GROßWIG, S., TUSCHE, J.: Messtechnik in Fahrbahnübergängen für Brücken. GESO GmbH Jena + RW Solinger Hütte, Präsentation zum BAST-Forschungskolloquium „Straße im 21. Jahrhundert“, Bergisch-Gladbach, 2012
- [Gulv00] GUSIA, P. J., GROßMANN, F., IVÁNYI, G., BUSCHMEYER, W., WINTER, H.-G.: Aus- führungsqualität von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken an Bundesfernstraßen – Erfas- sung und Auswertung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 795, Bundes- ministerium für Verkehr, Bundesanstalt für Stra- ßenwesen, Institut für Massivbau Universität GH Essen, 2000

- [Haar02] HAARDT, P.: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2002
- [Haar99] HAARDT, P.: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken. Bundesanstalt für Straßenwesen Heft B 22, 1999
- [Haar03] HAARDT, P.: Entwicklung eines Bauwerk-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2. Bundesanstalt für Straßenwesen Heft B 43, 2003
- [Haar10] HAARDT, P.: Vom schadensbasierten zum zuverlässigkeitsbasierten Erhaltungsmanagement für Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen. In: Abschluss-Symposium zum DFG-Sonderforschungsbereich 477, Technische Universität Braunschweig, 2010
- [Have00] HAVERESCH, K.-H.: Verstärkung älterer Spannbetonbrücken mit Koppelfugenrissen. Beton- und Stahlbetonbau 95, Heft 8, 2000
- [Hede05] HEDELER, D.: Prognoseverfahren zur Bestimmung der Restlebensdauer vorgeschädigter Stahlbetonbrücken. Hochschule Anhalt, 2005
- [HoBB08] HOLST, A., BRUDER, S., BUDELMANN, H.: Drahtsensoren für das Korrosionsmonitoring von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig – Materialprüfanstalt (MPA) für das Bauwesen. Braunschweig, 2008
- [Hols06] HOLST, R.: Entwicklung eines Bauwerk-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 3. Bundesanstalt für Straßenwesen Heft B 50, 2006
- [Hols10] HOLST, A.: Korrosionsmonitoring, Bruchortung und Spannkraftmessung an Stahlzuggliedern. In: Abschluss-Symposium zum DFG-Sonderforschungsbereich 477, Technische Universität Braunschweig, 2010
- [IcMR07] ICKERT, L., MATTHES, U., ROMMERSKIRSCHEN, S., WEYAND, E., SCHLESINGER, M., LIMBERS, J.: Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007
- [IsMM95] ISECKE, B., MENZEL, K., MIETZ, J., NÜRNBERGER, U.: Gefährdung älterer Spannbetonbauwerke durch Spannungsrissskorrosion. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 5, 1995
- [IvBu01] IVÁNYI, G., BUSCHMEYER, W.: Arbeitsfugen mit Spanngliedkoppelungen – Teil 1: Beurteilung des Erhaltungszustandes. Institut für Massivbau, Universität Essen, 2001
- [IvBu02] IVÁNYI, G., BUSCHMEYER, W.: Arbeitsfugen mit Spanngliedkopplungen – Teil 2: Objektbezogene Schadensanalyse, Instandsetzungsbedarf. Institut für Massivbau, Universität Essen, 2002
- [KeOR11] KEIL, A., ORLOWSKY, J., RAUPACH, M.: Einsatz eines mobilen NMR-Sensors als zerstörungsfreies Messsystem in der Bauwerkserhaltung. Bautechnik Heft 88, 2011
- [Keus07] KEUSER, M.: Einwirkungen auf Brücken. In: Handbuch Brücken – Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten. MEHLHORN (Hrsg.), Springer Verlag, Heidelberg, 2007
- [KoJo10] KOWALSKY, W., JOHANNES, H.-H.: Faseroptische Sensoren für die Bauwerksüberwachung. In: Abschluss-Symposium zum DFG Sonderforschungsbereich 477, Technische Universität Braunschweig, 2010
- [KöMa90] KÖNIG, G., MAURER, R.: Sicherheit von Spannbetonbrücken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 590, Bundesministerium für Verkehr, 1990
- [KömZ86] KÖNIG, G., MAURER, R., ZICHNER, T.: Spannbeton: Bewehrung im Brückenbau. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, 1986
- [Krät04] KRÄTZIG, W. B.: Schädigung, Dauerhaftigkeit und Lebensdauer von Tragwerken. Der Prüferingenieur Heft Oktober, 2004
- [KrMP03a] KRÄTZIG, W. B., MONTA, U., PETRYNA, Y. S.: Schädigung, Dauerhaftigkeit und (Rest-)Nutzungsdauer von Tragwerken. Bauingenieur Band 78, 2003
- [KrGr10] KRÜGER, M., GROßE, C.: Einsatz von Sensorik an Brückenbauwerken. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 88.0001/2009. Universität Stuttgart, TTI GmbH Stuttgart, Transfer- und Gründerunternehmung Smartmote, 2010

- [Krug07] KRUG, F.: Messen mit faseroptischen Sensoren – Faseroptische Messtechnik eröffnet neue Horizonte. *Elektrotechnik*, Heft 23, 2007
- [LaBe06] LANGE, J., BENNING, W.: Verfahren zur Rissanalyse bei Betonbauteilen. DGZfP-Berichtsband 100, Poster 13. Fachtagung Bauwerksdiagnose, Praktische Anwendung Zerstörungsfreier Prüfungen, 23.-24.02.2006, Berlin
- [LiGH09] LIEBIG, J. P., GRÜNBERG, J., HANSEN, M.: Monitoring von Spannbetonbrücken – Auswirkungen zunehmenden Schwerverkehrs. *Beton- und Stahlbetonbau* (104), Heft 6, 2009
- [LiGP11] LIEBIG, J. P., GRÜNBERG, J., PAFFENHOLZ, J.-A., VENNEGEERTS, H.: Taktile und laserbasierte Messverfahren für die messtechnische Überwachung einer Autobahnbrücke. *Bau-technik* Heft 88, 2011
- [Ling10] LINGEMANN, J.: Zum Ankündigungsverhalten von älteren Brückenbauwerken bei Spannstahlausfällen infolge Spannungsrissskorrosion. Dissertation am Lehrstuhl für Massivbau, TU München, 02/2010
- [LiZE10] LINGEMANN, J., ZILCH, K., EHMANN, R., MARZAHN, G., KRÜGER, D.: Die neue Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung des Ankündigungsverhaltens von älteren Brückenbauwerken mit spannungsrissskorrosionsempfindlichem Spannstahl. *Bauingenieur* Band 85, Juli/August 2010
- [Luba09] LUBASCH, P.: Identifikation von Verkehrslasten unter Einsatz von Methoden des Soft Computing. Schriftenreihe aus dem Institut für Massivbau, Heft 4, Universität Duisburg-Essen, 2009
- [Lück04] LÜCKEN, T.: Zur Schadensanalyse von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken mit Fuzzy-Expertensystemen. Institut für Stahlbeton- und Spannbetonbau, Ruhr-Universität Bochum, 2004
- [MaBä07] MAURER R., BÄÄTJER G.: Sicherheit von Spannbetonbrücken – Entwicklung von Konstruktions- und Bemessungsgrundsätzen in Deutschland. *Bauingenieur* Band 82, 2007
- [Marz12] MARZAHN, G.: Nachrechnung von Straßenbrücken – Nachrechnungsrichtlinie des BMVBS. In Seminarumdruck: 8. Symposium Verstärken von Brücken- und Hochbauten, Technische Akademie Wuppertal, November 2012
- [MoDe12] MOOR, G., DELLA CÀ, D.: Nutzerorientierte Bauwerksüberwachung. 22. Dresdner Brückenbausymposium, 2012
- [Model06] Model Code for Service Life Design. *fib bulletin* 34, International Federation for Structural Concrete (fib), 2006
- [MoSc00] MOERSCH, J., SCHIEßL, P.: Untersuchungen zum Risskorrosionsverhalten von Spannstählen unter Betriebsbedingungen. In: ELIGHAUSEN, R., KORDINA, K., SCHIEßL, P.: *Bewehrte Betonbauteile unter Betriebsbedingungen*. DFG-Forschungsbericht, Weinheim, 2000
- [MüvN11] MÜLLER H. S., VOGEL, M., NEUMANN, T.: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse. Bundesanstalt für Straßenwesen Heft B 81, 2011
- [NaHa03] NAUMANN, J., HAHN, S.: *Das Management der Straßenerhaltung in Deutschland*. Straße und Autobahn Heft März, 2003
- [Naum09] NAUMANN, J.: *Brücken und Schwerverkehr – eine Bestandsaufnahme*. 19. Dresdner Brückenbausymposium, 2009
- [Naum10] NAUMANN, J.: *Brücken und Schwerverkehr – Strategie zur Ertüchtigung des Brückenbestandes in Bundesfernstraßen*; *Bauingenieur*, Heft 5, 2010
- [NaYo93] NATKE H. G., YAO, J. T. P.: *Detection and Location of Damage Causing Non-linear System Behaviour. Safety Evaluation Based on Identification Approaches Related to Time Variant and Nonlinear Structures*, Lambrecht 1992
- [NoBA03] NOVAK, B., BROSGE, S., ANANIEV, S., MEISS, K., WAGNER, R., WEIßBACH, M.: *Weiterentwicklung des Modellansatzes der Schadensprognosen und Wirkung der Erhaltungsmaßnahmen im BMS*. Schlussbericht zum FE-Projekt 15.383/2003/HRB der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2003
- [NoBR02] NOVAK, B., BROSGE, S., REICHERT, F.: *Weiterentwicklung von Verhaltensmodellen im Rahmen des BMS*. Schlussbericht zum FE-Projekt 15.370/2002/HRB der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2002



- [NüBe00] NÜRNBERGER, U., BEUL, W.: Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion von zugschwellenbeanspruchten Spannstählen. In: ELIGHAUSEN, R., KORDINA, K., SCHIEßL, P.: Bewehrte Betonbauteile unter Betriebsbedingungen. DFG-Forschungsbericht, Weinheim, 2000
- [Oert01] OERTEL, S.: Typisierung von Schadensbildern im Kontext mit den Ergebnissen der Zustandserfassung und -bewertung auf Bundesfernstraßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 801, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, 2001
- [PaFT07] PARK, G., FARRAR, C. R., TODD, M. D., HODGKISS, W., ROSING, T.: Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Networks. Los Alamos National Laboratory, 2007
- [Penk04] PENKA, E.: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von Koppelfugenquerschnitten bestehender Spannbetonbrücken durch Langzeitmessungen. Dissertation am Lehrstuhl für Massivbau, TU München, 2004
- [PiLM09] PIRCHER, M., LECHNER, B., MARIANI, O., KAMMERSBERGER, A.: Schädigung schlaff bewehrter Betonbrücke durch Verkehrsbelastungen. Beton- und Stahlbetonbau 104, Heft 3, 2009
- [PoFS08] POMMERENING, D., FREITAG, N., STADLER, A.: Untersuchung zu wirtschaftlichen Erhaltungsstrategien im Rahmen der Nutzungsdauer von Bauwerken. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (Heft 1008), Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2008
- [RaKo12] RAUPACH, M., KOSALLA M.: Dauerhaftigkeitskonzept für die längste Meeresbrücke der Welt. Beton, Jg.: 62 Nr.1/2, 2012
- [RePK08] REITERER, M., PRAXMARER, L., KAMMERSBERGER, A.: Maintenance und Monitoring – Dauermonitoring zur Optimierung der Nutzungsdauer einer Brücke. Beton- und Stahlbetonbau (103), Heft 2, 2008
- [Retz07] RETZE, U.: Beispielhafte Untersuchung zum Einsatz von Monitoringmethoden an einer Brücke. Universität der Bundeswehr München, 2007
- [SaVe96] SARJA, A., VESIKARI, E.: Durability design of concrete structures. RILEM Report of TC 130-CSL, RILEM Report Series 14, E&FN Spon, 1996
- [Sche00] SCHEER, J.: Versagen von Bauwerken Band 1: Brücken. Hannover/Braunschweig, Ernst & Sohn, 2000
- [Schi76] SCHIEßL, P.: Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 255, Berlin, 1976
- [Schn08] SCHNETGÖKE, R.: Zuverlässigkeitsorientierte Systembewertung von Massivbauwerken als Grundlage für die Bauwerksüberwachung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 2008
- [Schu10] SCHUSTER, K.: Systemidentifikation und Bauwerksüberwachung mit piezokeramischen Aktuatoren. TU Braunschweig, 2010
- [ScBr13] SCHNELLENBACH-HELD, M., BRYLKA, A.: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton. 1. Zwischenbericht zum BAST-Projekt FE 15.0534/2011/LRB, Institut für Massivbau, Universität Duisburg-Essen, 2013, (unveröffentlicht)
- [ScKK13] SCHNELLENBACH-HELD, M., KARZEWSKI, B., KÜHN, O.: Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke. Entwurf zum Schlussbericht zum BAST-Projekt FE 15.0509/2011/GRB, Institut für Massivbau, Universität Duisburg-Essen, 2013, (unveröffentlicht)
- [ScMa07] SCHIEßL, P., MAYER, T.: Lebensdauer-managementsystem – Teilprojekt A2. Schlussberichte zur ersten Phase des DAFStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“, DAFStb-Heft 572, 2007
- [ScPS10] SCHNELLENBACH-HELD, M., PEETERS, M., SCHERBAUM, F.: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärkung von Betonbrücken im Bestand. Bundesanstalt für Straßenwesen Heft B 75, 2010



- [ScWi11] SCHNELLENBACH-HELD, M., WINTER, H.-G.: Erfassung der Ausführungsqualität von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken an Bundesfernstraßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 1058, Bundesministerium für Verkehr, 2011
- [Senso12] Internetseite Sortotec GmbH. <http://www.sortotec.de>
- [SoDS06] SODEIKAT, C., DAUBERSCHMIDT, C., SCHIEßL, P., GEHLEN, C., KAPTEINA, G.: Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken für Public Private Partnership Projekte – Dauerhaftigkeit sichtbar gemacht. Beton- und Stahlbetonbau (101), Heft 12, 2006
- [StBW09] STRAUSS, A., BERGMEISTER, K., WENDNER, R., HOFFMANN, S.: System- und Schadensidentifikation von Betontragstrukturen. Betonkalender, 2009
- [StSM09] STEMPNIEWSKI, L., SIEGEL, S., MÖLLER, J., KIEFER, D.: Verfahren zur Prüfung des Zustands von externen Spanngliedern und Schrägseilen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 1025, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn, 2009
- [Stew08] STEWERING, U.: Schädigungsanalyse für Tragwerke anhand ihrer modalen Systemeigenschaften. Institut für Stahlbeton- und Spannbetonbau, Ruhr-Universität Bochum, 2008
- [Stof00] STOFFEL, P.: Zur Beurteilung der Trag-sicherheit bestehender Stahlbetonbauten. Institut für Baustatik und Konstruktion – Technische Hochschule Zürich, 2000
- [StWi95] STARK, J., WICHT, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Schriftenreihe 100, Weimar, 1995
- [VDZ02] Verein Deutscher Zementwerke e. V.: Zement Taschenbuch 2002 (50. Auflage), Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2002
- [VeWe08] VEIT-EGERER, R., WENZEL, H.: Ermittlung der Tragfähigkeit und insbesondere der Belastbarkeit einer Spannbeton-Straßenbrücke mittels Dynamischem Bauwerksmonitoring. Beton- und Stahlbetonbau (103), Heft 6, 2008
- [Webe12] WEBER, M.: Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer – Theorie und Anwendung. Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e. K., 2012
- [WeSG10] WENDNER, R., STRAUSS, A., GUGGENBERGER, T., BERGMEISTER, K., PEPLÝ, B.: Ansatz zur Beurteilung von chlorid-belasteten Stahlbetonbauwerken mit Bewertung der Restlebensdauer. Beton- und Stahlbetonbau Heft 12, 2010
- [WiKW99] WIESE, S., KOWALSKY, W., WICHERN, J., GRAHN, W.: Neuartige faseroptische Feuchtesensoren zur zerstörungsfreien Langzeitüberwachung von Betonbauwerken. In: DGZFP-Berichtsband 69, Vortrag M4, Feuchtetag '99, Umwelt • Meßverfahren • Anwendung, Berlin, 1999
- [Wong04] WONG, K.-Y.: Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges. Structural Control Health Monitoring. 11: S. 91-124, John Wiley & Sons, 2004
- [WoFM07] WORDEN, K., FARRAR, R. C., MANSON, G., PARK, G.: The Fundamental Axioms of Structure Health Monitoring. In: Proceedings of The Royal Society A, Vol. 463, 2007
- [ZiLi09] ZILCH, K., LINGEMANN, J.: Probabilistischer Ansatz zur Auswertung der Einflüsse von Spanngliedbrüchen infolge von Spannungsrissskorrosion. Munich Brodge Assesment Conference (MBAC), Universität der Bundeswehr München, 2009
- [ZiSD11] ZILCH, K., STRAUB, D., DIER, F., FISCHER, J.: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung. Bundesanstalt für Straßenwesen Heft B 85, 2011
- [ZiWe07] ZILCH, K., WEIHER, H.: Sicherheit von Spannbetonbrücken – Zustand von Großbrücken im Zuge von Bundesfernstraßen. Bauingenieur Band 82, 2007
- [ZiWG09] ZILCH, K., WEIHER, H., GLÄSER, C.: Monitoring im Betonbau. In: Beton Kalender 2009: Konstruktiver Hochbau, Ernst & Sohn, Berlin, 2009

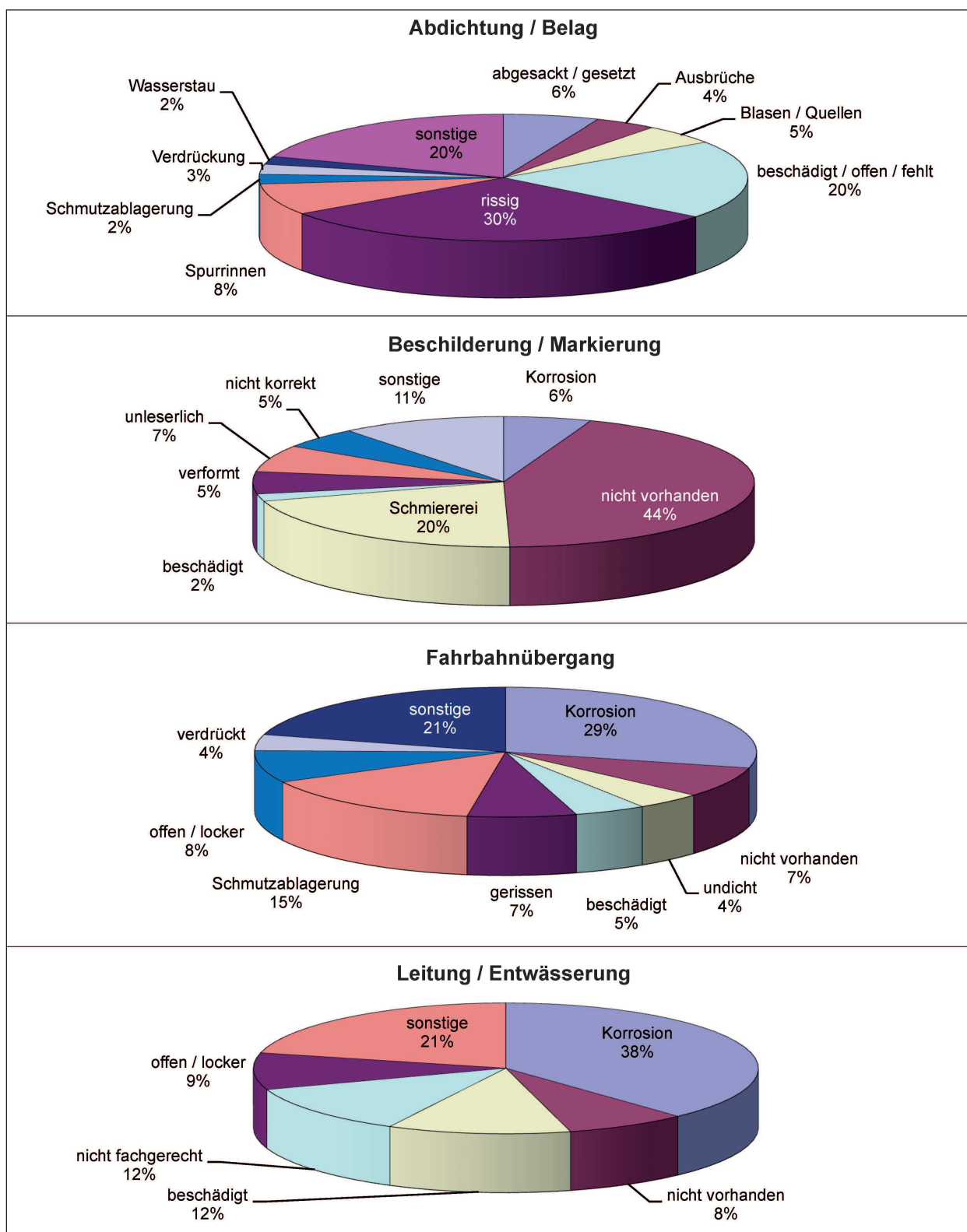


## 11 Anhang

### 11.1 Schadensauswertung

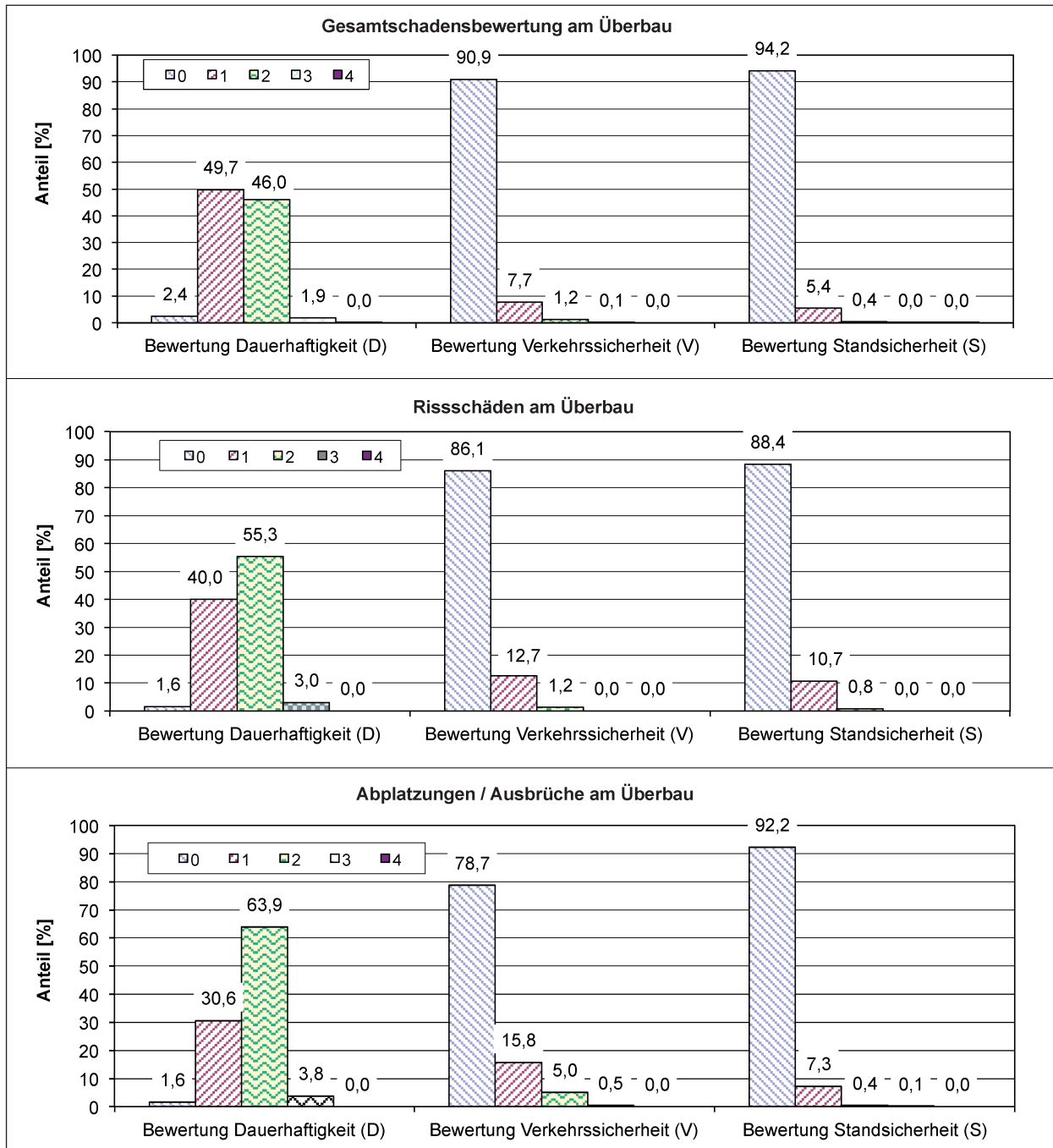
#### 11.1.1 Diagramme der Untersuchungsgrundlage

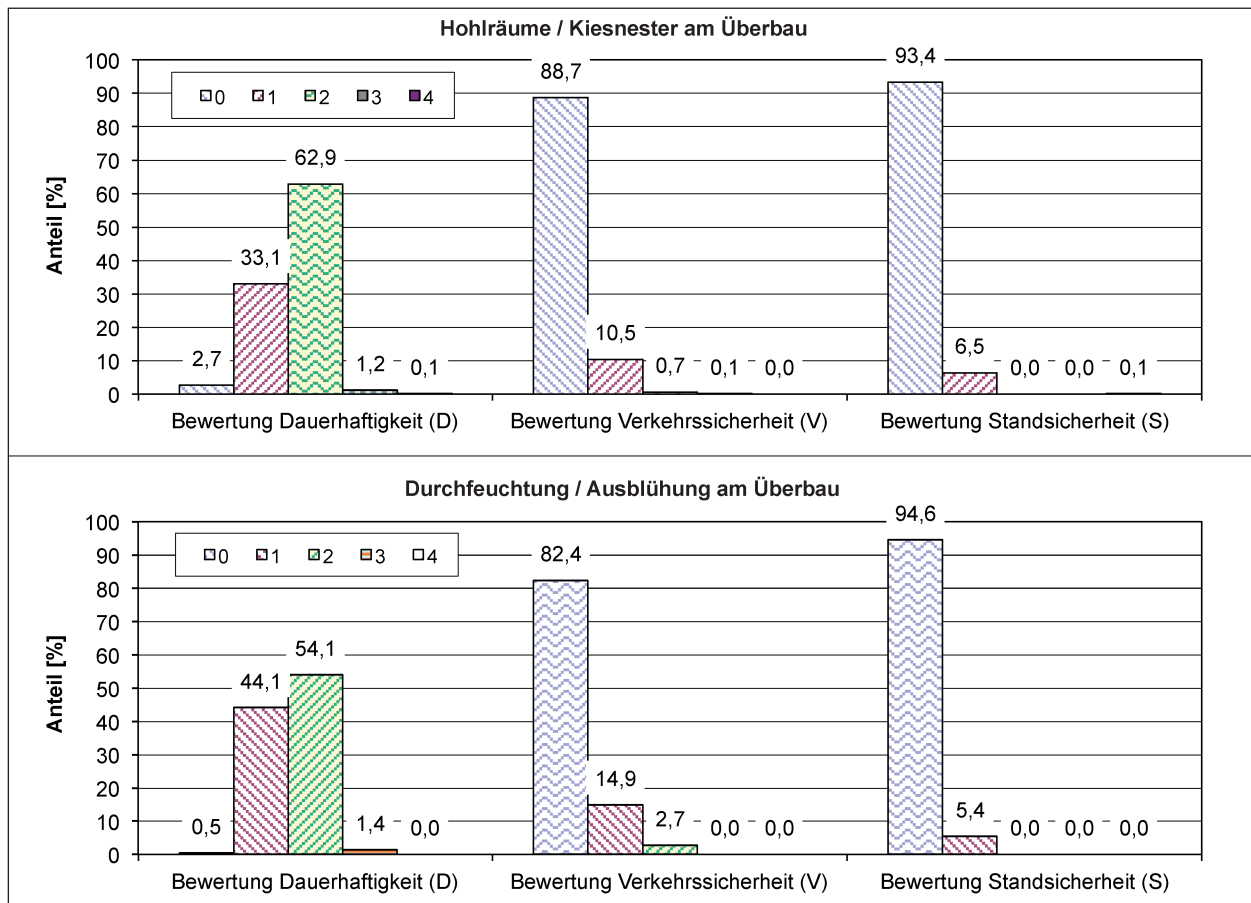
##### Brückenausrüstung:



11.1.2 Diagramme zur Schadensauswertung

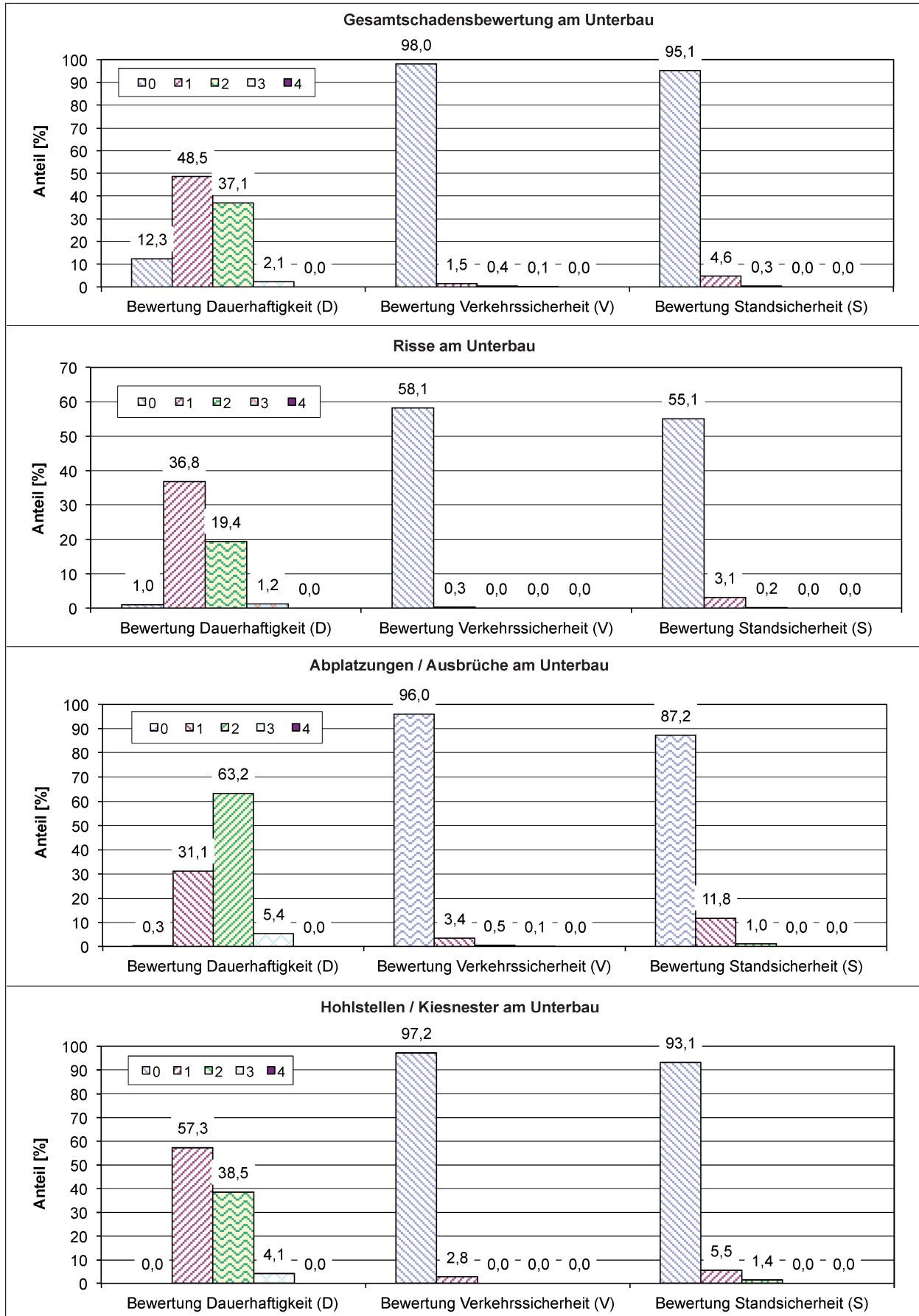
Schäden am Überbau:

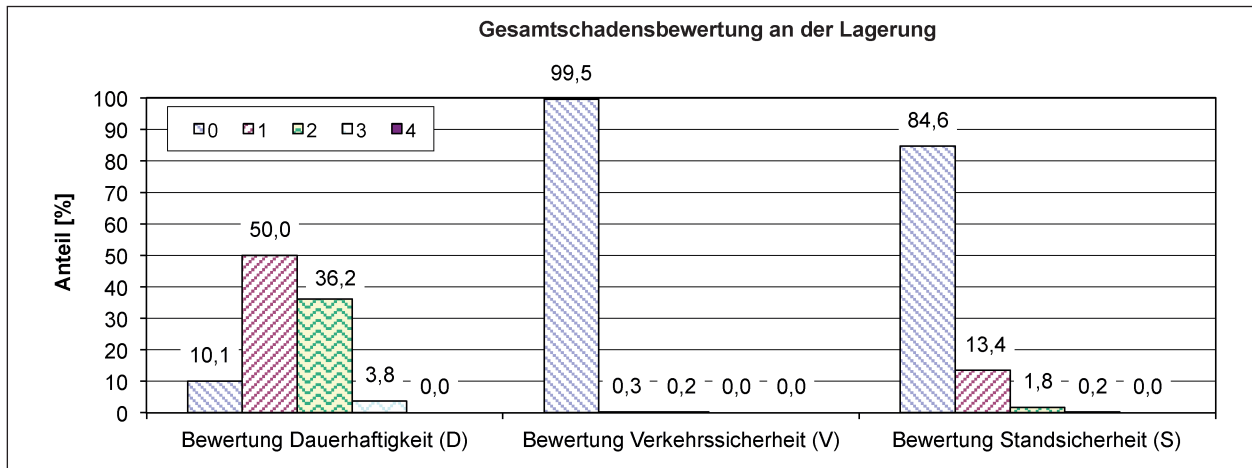




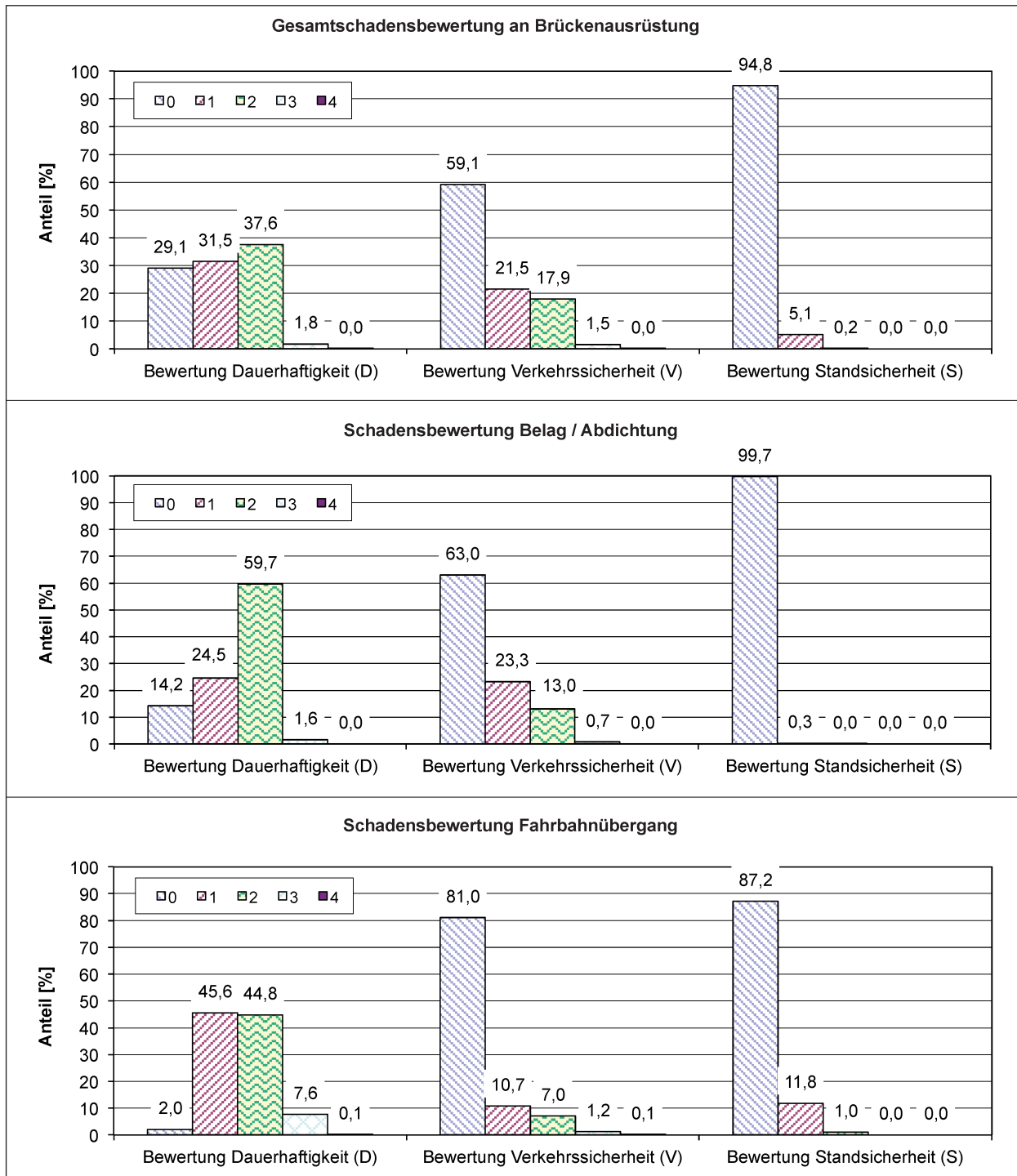


Schäden am Unterbau:



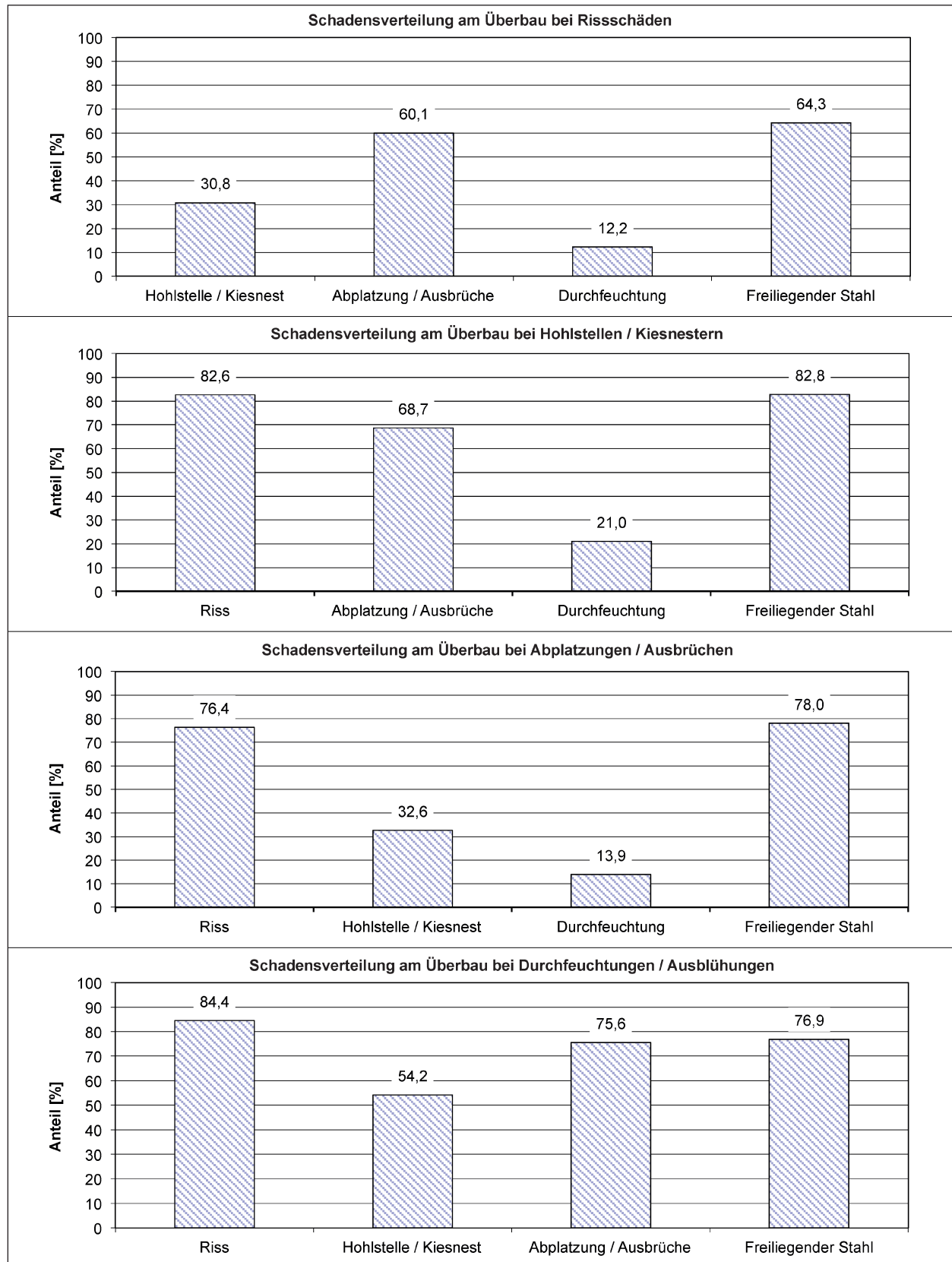
**Schäden an der Lagerung:**

Schäden an der Ausrüstung:

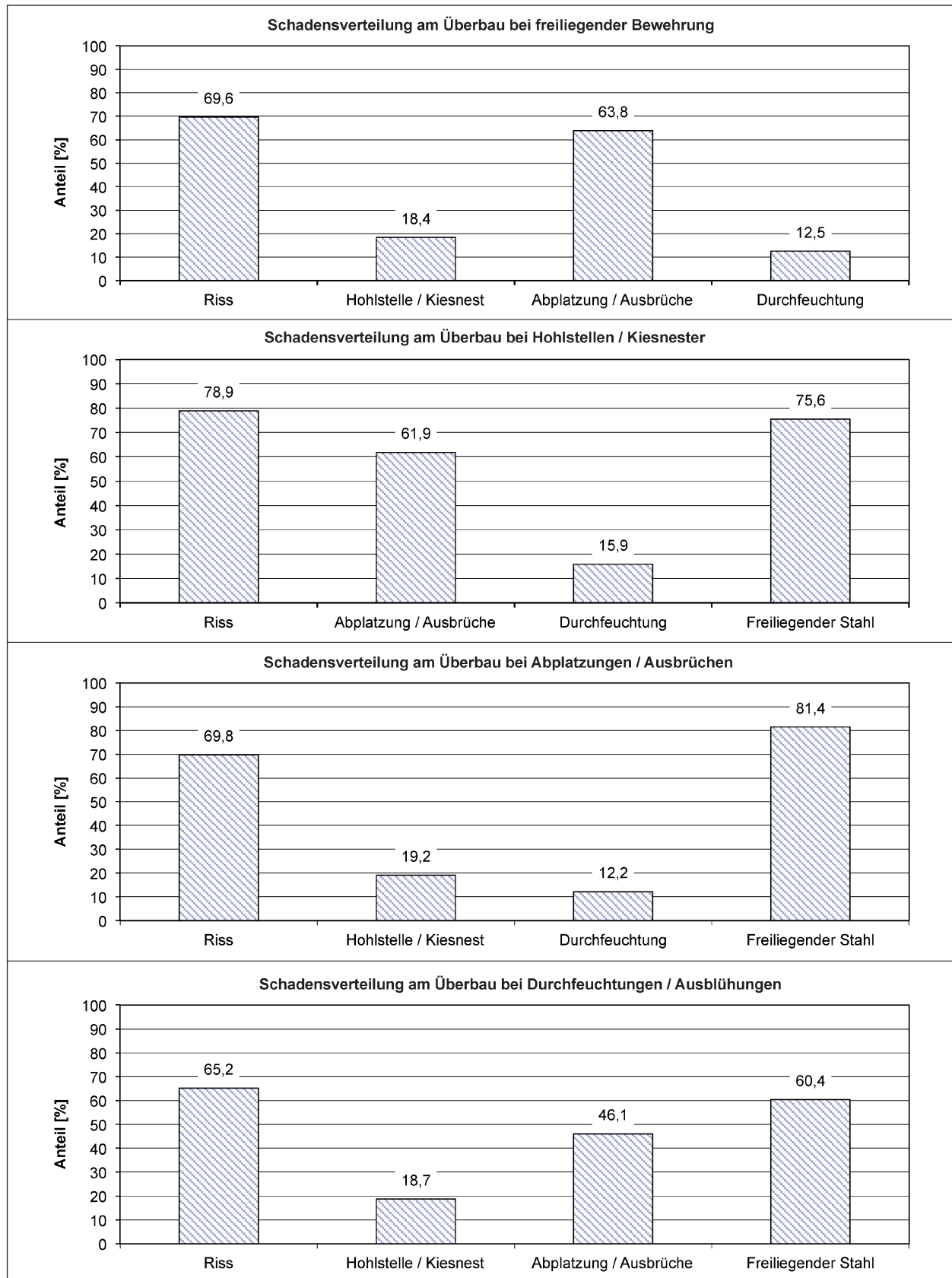


### 11.1.3 Diagramme zu gleichzeitig auftretenden Schäden

Überbau:



## Unterbau:





## 11.2 Auszug aus der Schadensdatenbank aus SIB-Bauwerke

Brückennummer	Bauwerksart	Konstruktion	Anzahl der Felder in Längs-richtung	Bauteilgruppe	Bauteil	Baustoff	Konstruktionsteil	Bauteilergänzung
1	Hohlkastenbrücke		1	Überbau	Kragarm	Spannbeton	Konstruktionsteil	Beton
4	Plattenbrücke	einsteigerig, Üb	1	Überbau	Platte	Beton/Stahlbeton	Konstruktionsteil	Beton
5	Plattenbalkenbrück	2-stegiger Platt	1	Überbau	Endquerträger	Spannbeton	Konstruktionsteil	Beton
7	Plattenbalkenbrück	Zweifeldrige Pl	2	Schutzeinrichtungen	---	Spannbeton	Einfache Distanzschutz	Bauteilergänzung
20	Balkenbrücke / Mittelträger / Tra		1	Unterbau	Flügel	Spannbeton	Konstruktionsteil	Verblendmauerwerk
33	Plattenbrücke	Einfeldrige Ma	1	Unterbau	Auflagerbank	Beton/Stahlbeton	Konstruktionsteil	Beton
55	Plattenbrücke	Einfeldbauwer	1	Kappe	Brücke	Spannbeton	senkrechte Fläche des	Beton
66	Plattenbalkenbrück	Einsteigerig, Pl	2	Unterbau	Auflagerbank	Spannbeton	Konstruktionsteil	Betonoberfläche
79	Plattenbrücke	mehrstegige H	1	Lager	Brücke	Beton/Stahlbeton	Konstruktionsteil	Bauteilergänzung
86	Gewölbe- bzw. Bogenbrücke		1	Überbau	Wandung	Beton/Stahlbeton	Rollenlager / Nadellager	Mauerwerksstein
153	Plattenbrücke		1	Unterbau	hintere Kammerwand	Spannbeton	Konstruktionsteil	Bauteilergänzung
203	Hohlkastenbrück	4 - feldrige Hol	4	Beläge	Brücke	Spannbeton	Entwässerungsrinne v	Gussasphalt
297	Plattenbalkenbrück	2-feld-Brücke;	2	Schutzeinrichtungen		Spannbeton	Füllstab des Geländers	Stahl / Metall
331	Plattenbrücke	Einfeld-Spannl	1	Unterbau	Widerlagerwand	Beton/Stahlbeton	Konstruktionsteil	Beton
387	Plattenbalkenbrück	3-stegiger Platt	1	Überbau	Platte	Beton/Stahlbeton	Konstruktionsteil	Bewehrung
418	Brücke als geschl	geschlossen	1	Unterbau	Auflagerbank	Beton/Stahlbeton	Konstruktionsteil	Betonoberfläche
434	Plattenbalkenbrücke, Trägerros		2	Fahrbahnübergang	Brücke	Spannbeton	Fahrbahnübergang aus	Fugenfüllung
448	Plattenbalkenbrück	dreistegiger Pl	1	Lager	Querträger	Spannbeton	Festhaltung	Bauteilergänzung
465	Balkenbrücke / M	3-stegiger Platt	2	Überbau		Spannbeton	Konstruktionsteil	Bewehrung
502	Plattenbalkenbrücke, Trägerros		2	Kappe		Spannbeton	Gesims	Betonoberfläche
509	Plattenbrücke		1	Beläge	Überbau	Spannbeton	Fahrbahnbelag	bituminöse Baustoffe
516	Balkenbrücke / M	zweistegiger o	2	Überbau	Überbau	Spannbeton	Konstruktionsteil	Betonoberfläche
527	Plattenbalkenbrück	zweistegiger P	2	Unterbau	Lagersockel	Spannbeton	Konstruktionsteil	Längsbewehrung
548	Plattenbalkenbrück	zweistegiger P	3	Überbau	Endquerträger	Spannbeton	Konstruktionsteil	Beton
585	Rahmenbrücke	Zweigelenkrah	1	Unterbau	Flügel	Beton/Stahlbeton	Konstruktionsteil	Beton
586	Hohlkastenbrück	1-stegiger Hof	4	Überbau	Fahrbahnplatte	Spannbeton	Konstruktionsteil	Bewehrung
606	Balkenbrücke / M	1-steg, Durchl	4	Unterbau	hintere Kammerwand	Spannbeton	Konstruktionsteil	Beton
618	Plattenbrücke	Spannbetonpl	3	Überbau	Hohlkörperplatte	Spannbeton	Konstruktionsteil	Beton
625	Plattenbalkenbrück	1-Feldspannb	1	Kappe		Spannbeton	Gesims	Bauteilergänzung
631	Plattenbrücke	1-steg, Spannl	2	Ausstattungen	Unterbau	Spannbeton	Beschichtungstreppe	Fugenflanke
636	Plattenbrücke	Einsteigerig, Sp	5	Überbau	Platte	Spannbeton	Konstruktionsteil	Bauteilergänzung
641	Plattenbalkenbrück	Plattenbalken	2	Beläge	Überbau	Spannbeton	Entwässerungsrinne v	Bauteilergänzung
644	Plattenbalkenbrück	3-Feldspannb	3	Kappe	Überbau	Spannbeton	Gesims	Raumfuge quer
653	Brücke als offener	offener Rahme	1	Überbau	Riegel als Platte	Beton/Stahlbeton	Konstruktionsteil	Bauteilergänzung
659	Plattenbalkenbrück	Verbundbrück	2	Überbau	Platte	Stahlverbund	Konstruktionsteil	Beton
664	Hohlkastenbrück	Spannbetonh	1	Ausstattungen	Widerlager	Spannbeton	Entwässerungsrinne al	Bauteilergänzung

## Fortsetzung der Tabelle:

Baujahr	Länge	Breite	Fläche	Stützweite	Tragfähigkeit	Schaden	Schadensbeispiel-ID	Schadensmenge allgemein
1962	38,43	6,00	231	38,43	DIN: 12	Ausblühung	002-09	bereichsweise
1961	12,31	15,00	185	12,31	DIN: 60	Abplatzung mit freiliegt	002-04	eine Stelle
1961	34,00	6,50	221	34,00	DIN: 12	Kiesnest / Grobkomste	002-01	eine Stelle
1964	47,86	21,20	1014	23,93 - 23,93	DIN: 60	Anrallschaden	232-11	eine Stelle
1964	35,40	14,00	496	35,40	DIN: 60	Schrägrisse	027-10	ein Stück
1962	10,55	15,00	158	10,55	DIN: 60	Längsrisse Rissbreite	025-03	ein Stück
1977	20,75	14,75	307	20,75	DIN: 60	Querrisse Rissbreite 0	230-02	mehrfach
1976	48,40	6,00	291	24,20 - 24,20	DIN: 30/30	Frostschaden	021-08	großflächig
1959	21,76	15,00	326	21,76	DIN: 60	Lage ist falsch	211-99	ein Stück
1959	5,30	15,00	80	1,29 - 1,29 - 1,29 - 1,29	DIN: 60	herausgebrochen	009-09	eine Stelle
1973	16,46	14,50	238	16,46	DIN: 60	feuchte Stelle	020-05	bereichsweise
1987	166,89	14,45	2411	35,00 - 46,99 - 49,90 - 35,00	DIN: 60/30	Formänderung durch E	243-01	mehrfach
1971	46,10	8,00	369	23,29 - 22,81	DIN: 16/16	verformt	231-99	vereinzelt
1966	25,56	18,50	473	25,56	DIN: 60	abgeplatzt	021-08	eine Stelle
1975	19,66	15,23	299	19,66	DIN: 60	freiliegt	002-02	ein Stück
1996	7,70	44,46	363	7,70	DIN: 60/30	Längsrisse Rissbreite	025-01	beginnend
1972	52,05	8,76	455	27,17 - 24,88	DIN: 30	fehlt	259-06	größtenteils
1968	23,70	15,83	375	23,70	DIN: 60	fehlt	213-01	vollständig
1971	49,60	14,00	694	24,74 - 24,74	DIN: 16/16	freiliegt	002-02	ein Stück
1969	50,80	14,25	724	25,40 - 25,40	DIN: 60	Querrisse Rissbreite <	230-02	mehrfach
1980	24,42	14,25	348	24,42	DIN: 60	gerissen	241-05	eine Stelle
1971	61,35	11,20	687	30,60 - 30,68	DIN: 60	abgeplatzt	002-02	vereinzelt
1969	38,50	6,00	231	19,25 - 19,25	DIN: 60	freiliegt	021-13	ein Stück
1991	71,42	13,75	982	21,98 - 27,47 - 21,97	DIN: 60/30	Längsrisse Rissbreite	006-01-01	ein Stück
1981	6,62	12,61	83	6,62	DIN: 60	Querriss mit Aussinter	025-02	ein Stück
1982	162,35	19,00	3085	35,00 - 45,46 - 43,93 - 37,96	DIN: 60	freiliegt	002-02	vereinzelt
1992	65,91	4,50	297	15,27 - 17,61 - 17,65 - 15,37	DIN: 30/30	Längsrisse Rissbreite	025-02	ein Stück
1971	81,30	23,45	1906	26,37 - 33,89 - 21,04	DIN: 60	Kiesnest mit freiliegt	002-02	eine Stelle
1972	29,92	14,75	441	29,92	DIN: 60	Abplatzung mit freiliegt	230-99	eine Stelle
1971	57,80	2,00	116	28,30 - 29,50	DIN G+R	Abplatzung mit freiliegt	253-99	ausgeprägt
1968	58,75	2,75	162	7,75 - 13,90 - 16,05 - 16,05 - 5,00	DIN G+R	Anrallschaden	001-05	eine Stelle
1996	49,82	15,50	772	24,91 - 24,91	DIN: 60/30	Hohlstelle	241-05	stellenweise
1974	118,40	14,45	1711	30,19 - 58,00 - 30,20	DIN: 60	durchdrückendes Was	230-03	eine Stelle
1997	11,72	21,03	246	11,72	DIN: 60/30	Anrallschaden	001-99	vereinzelt
1967	83,12	18,38	1528	36,00 - 47,12	DIN: 60	Querrisse Rissbreite 0	006-99-01	vereinzelt
1966	31,45	17,73	558	31,45	DIN: 60	verstopft	252-05	ein Stück

## Fortsetzung der Tabelle:

Schadensmenge Einheit	Schadensmenge Größe	Angabe ob Feld, Pfeiler oder Block betroffen ist	Ort des Schadens in Längsrichtung	Ort des Schadens in Querrichtung	Ort des Schadens in vertikaler Richtung	Zustandsnote	Schadensbewertung Dauerhaftigkeit	Schadensbewertung Verkehrs-sicherheit	Schadensbewertung Stand-sicherheit	Prüfjahr der letzten Änderung
---	---	---	---	---	linke und rechte Seite	2,2	1	0	0	2011
Fläche: xxx,xx m <sup>2</sup>	1	Widerlager vorn	---	rechts	---	2,5	2	0	1	2010
Fläche: xxx,xx m <sup>2</sup>	0,5	Widerlager vorn	---	links	---	2,7	2	0	1	2008
Länge: xxx,xxx m	8,000	Widerlager vorn	xxx,xx m vom Bauwerk	links	oben auf dem Bauwerk	2,0	1	1	0	2011
Länge: xxx,xxx m	6	Flügelwand hinten	---	links	---	2,2	1	0	0	2009
Länge: xxx,xxx m	1	Widerlager vorn	---	xxx,xx m vom li	---	2,2	1	0	0	2011
---	---	gesamtes Bauteil	---	---	linke Seite	1,8	1	0	0	2007
---	---	beide Widerlager	---	---	Oberseite	2,2	2	0	0	2005
---	---	Widerlager vorn	---	xxx-tes Bauteil	---	2,0	2	0	1	2007
---	---	Widerlager hinten	---	Mitte quer	oben	2,3	2	0	0	2010
---	---	beide Widerlager	---	---	---	1,8	2	0	0	2008
---	---	gesamtes Bauteil	---	Randstreifen	linke und rechte Seite	2,3	1	1	0	2011
Anzahl: xxx Stück	3	Flügelwand vorn	---	rechts	---	2,2	2	0	0	2006
Fläche: xxx,xx m <sup>2</sup>	0,50	Widerlager hinten	---	---	unten links	2,2	2	0	0	2008
Länge: xxx, x cm	10,0	Widerlager vorn	---	links	---	2,2	1	0	0	2011
Anzahl: xxx Stelle(n)	2	Widerlager hinten	---	---	senkrecht	2,2	0	0	0	2007
Anzahl: xxx Stück	3	beide Widerlager	---	---	---	2,0	2	0	0	2008
Anzahl: xxx Stück	2	beide Widerlager	---	---	---	2,7	1	0	1	2005
Länge: xxx, x cm	20,0	xxx-ter Pfeiler/Stütze	---	---	Unterseite	2,2	1	0	0	2008
---	---	---	---	---	linke und rechte Seite	2,0	1	0	0	2010
---	---	---	hinten am Bauwerk	links	---	2,5	2	0	0	2010
Anzahl: xxx Stelle(n)	2	xxx-ter Pfeiler/Stütze	---	xxx-tes Bauteil	Unterseite	2,2	1	0	0	2011
Länge: xxx, x cm	8,0	Widerlager hinten	---	xxx-tes Bauteil	Vorderseite	3,0	2	0	0	2011
---	---	Widerlager vorn	---	rechts	---	2,2	1	0	0	2009
Länge: xxx,xxx m	1,000	Flügelwand hinten	---	rechts	---	1,9	1	0	0	2009
Anzahl: xxx Stück	5	xxx-tes Feld	---	xxx-tes Bauteil	innen	2,7	1	0	0	2009
---	---	Widerlager vorn	---	---	---	1,2	1	0	0	2010
Durchmesser: xxx, x cm	10,0	xxx-ter Pfeiler/Stütze	---	links	Unterseite	2,5	2	0	0	2011
Volumen: xxx,xx l (dm <sup>3</sup> )	4,00	Widerlager vorn	---	links	---	2,8	2	0	0	2008
---	---	Widerlager vorn	---	---	oben	2,5	2	0	1	2008
---	---	xxx-tes Feld	Feldbereich	Seitenfläche re	Ecke Bodenplatte /	2,0	1	0	0	2011
Länge: xxx,xxx m	0,500	vor Widerlager hinten	---	beidseitig	---	2,4	2	0	0	2006
---	---	---	xxx,xx m vor Bauwerk	---	unten links	2,8	2	0	0	2008
Anzahl: xxx Stelle(n)	5	---	2. Endbereich	links	---	1,8	1	0	0	2008
Anzahl: xxx Stück	3	xxx-tes Feld	---	---	---	2,5	1	0	0	2011
---	---	beide Widerlager	---	quer durchgehe	---	3,5	2	0	0	2011



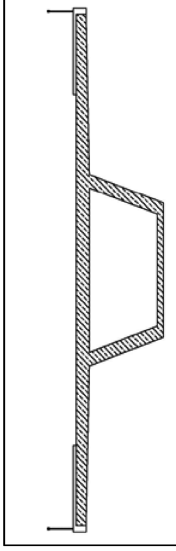
## 12 Anlage – Handbuch

<b>A 1</b>	<b>Hohlkastenbrücken</b> .....	<b>A 1</b>
A 1.1	< 1967 .....	A 1
A 1.2	1968 – 1979 .....	A 5
A 1.3	1980 – 2002 .....	A 9
A 1.4	≥ 2003 .....	A 13
<b>A 2</b>	<b>Plattenbalkenbrücken</b> .....	<b>A 17</b>
A 2.1	< 1967 .....	A 17
A 2.2	1968 – 1979 .....	A 21
A 2.3	1980 – 2002 .....	A 25
A 2.4	≥ 2003 .....	A 29
<b>A 3</b>	<b>Plattenbrücken</b> .....	<b>A 33</b>
A 3.1	< 1967 .....	A 33
A 3.2	1968 – 1979 .....	A 37
A 3.3	1980 – 2002 .....	A 41
A 3.4	≥ 2003 .....	A 45
<b>A 4</b>	<b>Sonstige Brücken</b> .....	<b>A 49</b>
A 4.1	< 1967 .....	A 49
A 4.2	1968 – 1979 .....	A 53
A 4.3	1980 – 2002 .....	A 57
A 4.4	≥ 2003 .....	A 61
<b>A 5</b>	<b>Neubau</b> .....	<b>A 65</b>



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **1**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

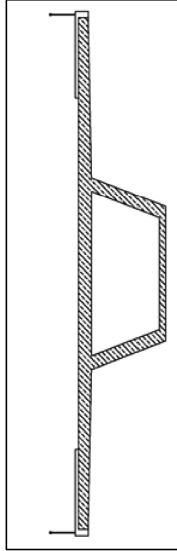
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)		
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Lager: Stahlkorrosion	Stahlkorrosion	Wirbelstromsensoren, Piezosensoren, elektrochemische Sensoren

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **0**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

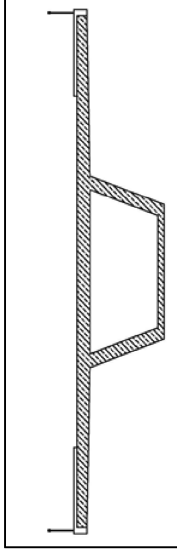
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)		
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Koppelfugenrisse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **18**



*Vorschriften*

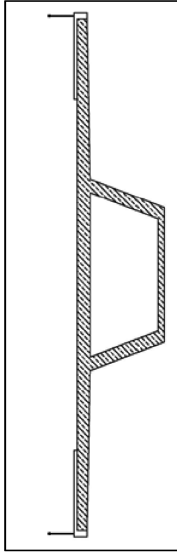
Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)		
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z. B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle		

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Hohlstellen in den Stegen mit internen Spanngliedern	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse in der Bodenplatte	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Lager: Stahlkorrosion	Stahlkorrosion	Wirbelstromsensoren, Piezosensoren, elektrochemische Sensoren
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilibasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)



Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **14**

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

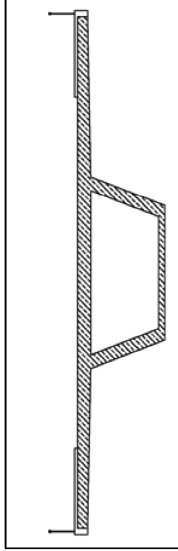
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Risse in der Bodenplatte	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Hohlstellen in den Stegen mit internen Spanngliedern	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Koppelfugenrisse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Kiesnester	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **1**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortlerlass 02.77
		DAF Sib-Rili (1972)

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

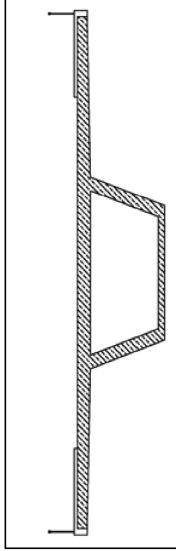
*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Unterbau: freiliegende Bewehrung (insbesondere am Widerlager)		



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **0**



Vorschriften

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortferlass 02.77
		DAfStb-R111 (1972)

Einwirkungsseite

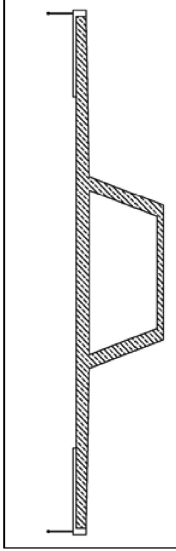
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

Widerstandsseite

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Unterbau: freiliegende Bewehrung (insbesondere am Widerlager)	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: 4



Vorschriften

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortlerlass 02.77
		DAfStb-R11i (1972)

Einwirkungsseite

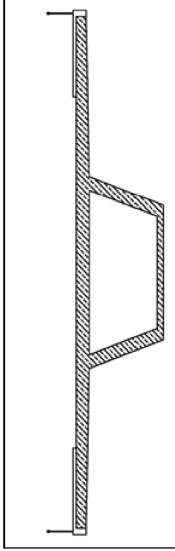
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

Widerstandsseite

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Risse in der Bodenplatte	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Hohlstellen in den Stegen mit internen Spanngliedern	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Unterbau: freiliegende Bewehrung (insbesondere am Widerlager)	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **36**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	Sofortierlass 02.77
		DAFstb-Rili (1972)

*Einwirkungsseite*

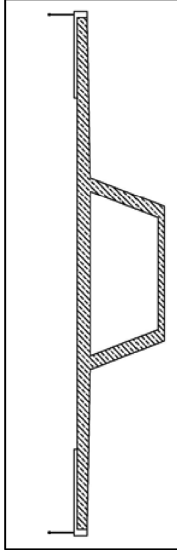
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Kiesnester		
Hohlstellen in den Stegen mit internen Spanngliedern	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse (insbesondere in der Bodenplatte)	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilibasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **0**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978),	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAFSib-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

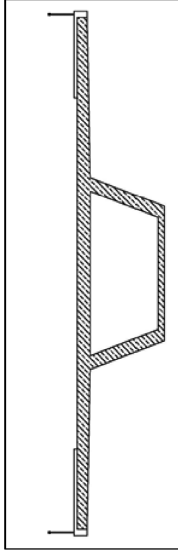
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **2**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAFStb-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

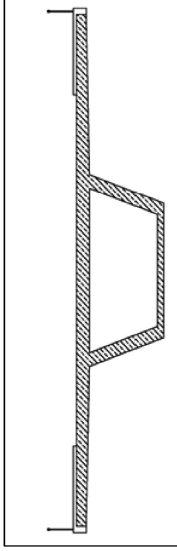
*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Unterbau: freiliegende Bewehrung (insbesondere am Widerlager)	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **1**



Vorschriften

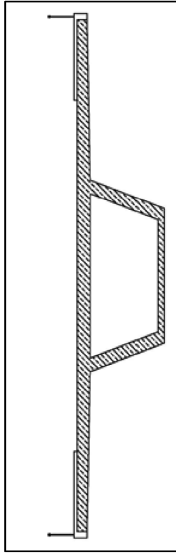
Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAFStb-Rili ('1985)

Einwirkungsseite

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

Widerstandsseite

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Hohlstellen in den Stegen mit internen Spanngliedern	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse in der Bodenplatte	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)



Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **21**

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAfStb-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

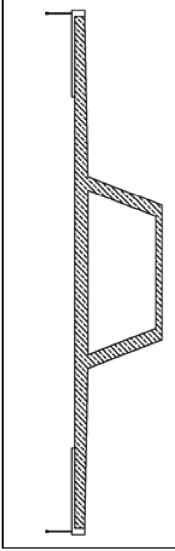
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982) Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Hohlstellen in den Stegen mit internen Spanngliedern	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse (insbesondere in der Bodenplatte)	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Risse		

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **0**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003, 2009)	DIN FB 102 (Bemessung; 2003, 2009)	RPS (2009)
DIN 1055 (Einwirkungen; 2003)		ZTV-ING
		ARS (22/2012)

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über LM1	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

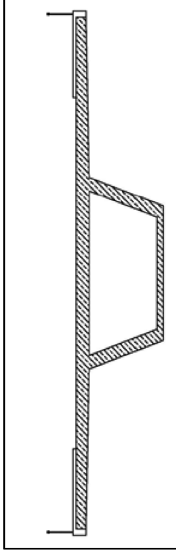
*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Spannbeton			
Einfeld			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **0**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003, 2009)	DIN FB 102 (Bemessung; 2003, 2009)	RPS (2009)
DIN 1055 (Einwirkungen; 2003)		ZTV-ING
		ARS (22/2012)

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über LM1	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

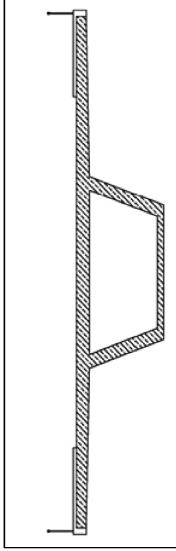
*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Hohlstellen in den Stegen mit internen Spanngliedern	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse in der Bodenplatte	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Spannbeton			
Einfeld			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: 1



Vorschriften

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003, 2009)	DIN FB 102 (Bemessung; 2003, 2009)	RPS (2009)
DIN 1055 (Einwirkungen; 2003)		ZTV-ING
		ARS (22/2012)

Einwirkungsseite

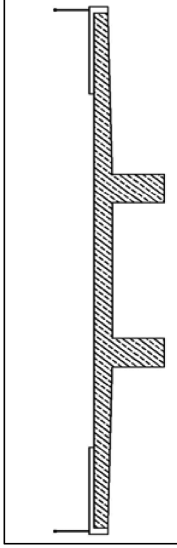
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über LM1	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

Widerstandsseite

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Hohlstellen in den Stegen mit internen Spanngliedern	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse in der Bodenplatte	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **3**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

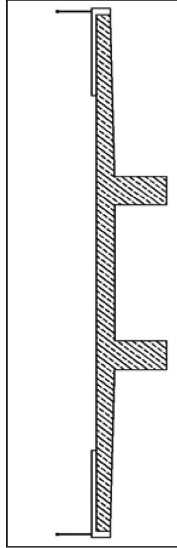
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)		
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement; Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Kiesnester, Hohlstellen	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Risse (besonders am Widerlager)		

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **2**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

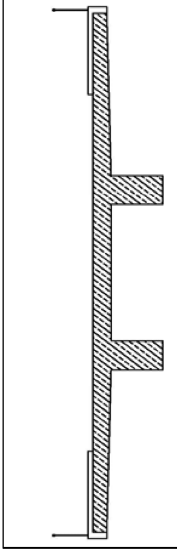
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)		
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Kiesnester	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Risse (besonders an Widerlagern und Koppelfugen)		

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **41**



*Vorschriften*

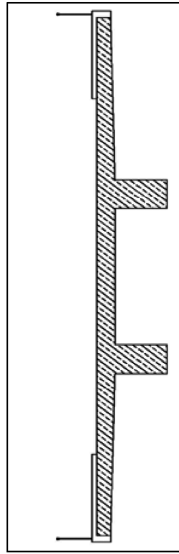
Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle		

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Unterbau: freiliegende Bewehrung	Feuchte	FOS, textilibasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)
Ausrüstung: Beläge gerissen		



Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **39**

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Verkehr: Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)		
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

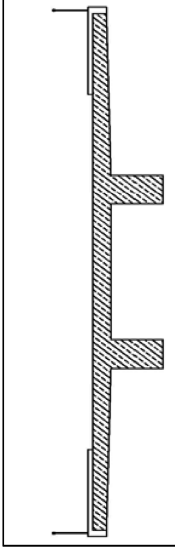
Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse (insbesondere an Koppelfugen)	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Ausrüstung: Beläge nicht haftend oder herausgedrückt	Feuchte	FOS, textilbasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003

Stahlbeton	Spannbeton
Einfeld	Mehrfeld

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **4**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortierlass 02.77
		DAfStb-Rili (1972)

*Einwirkungsseite*

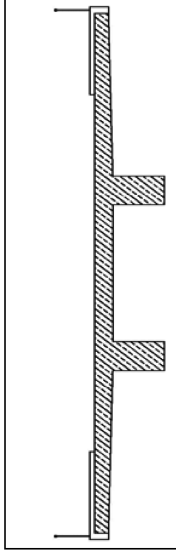
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Kiesnester, Hohlstellen	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Risse (insbesondere am Widerlager)		
Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton		Spannbeton	
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **9**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortlerlass 02.77
		DAfStb-Rili (1972)

*Einwirkungsseite*

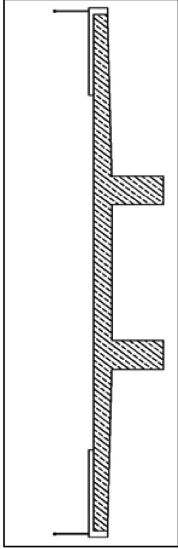
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Risse (insbesondere am Widerlager)		
freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **54**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortentwurf 02.77
		DAfStb-Rilii (1972)

*Einwirkungsseite*

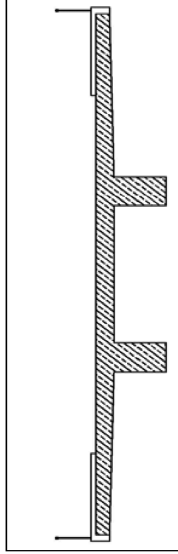
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilibasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **186**



Vorschriften

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortlerlass 02.77
		DAfStb-R111 (1972)

Einwirkungsseite

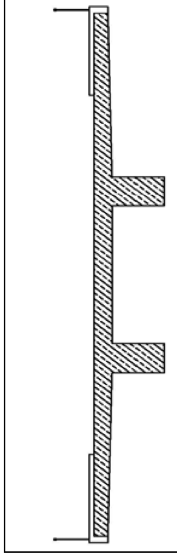
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

Widerstandsseite

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung freiliegende Hüllrohre	Korrosion	Anodenleiter, Multiringelektrode, Draht-Korr.-Sensor
Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Risse	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Lager: Stahlkorrosion	Stahlkorrosion	Wirbelstromsensoren, Piezosensoren, elektrochemische Sensoren
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilibasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **3**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978),	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAFStb-Rili ('1985)

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

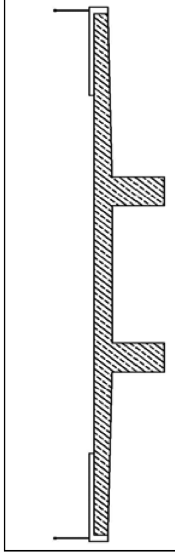
*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Kiesnester, Hohlstellen	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Risse (insbesondere am Widerlager)		



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton		Spannbeton	
Einfeld		Mehrfeld	

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **3**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAFS tb-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

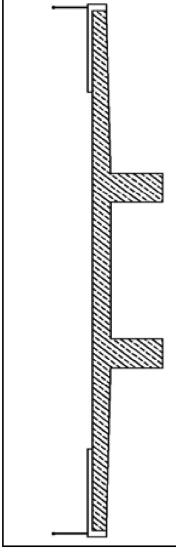
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Kiesnester, Hohlstellen	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Unterbau: Risse (insbesondere am Widerlager)	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **15**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAfStb-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

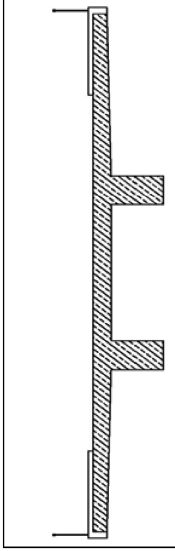
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Kiesnester, Hohlstellen	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilbasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Einfeld			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **53**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAfStb-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

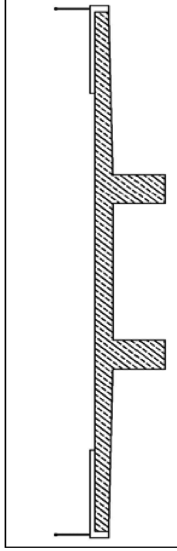
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Kiesnester, Hohlstellen	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **2**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003, 2009)	DIN FB 102 (Bemessung; 2003, 2009)	RPS (2009)
DIN 1055 (Einwirkungen; 2003)		ZTV-ING
		ARS (22/2012)

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über LM1	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

*Widerstandsseite*

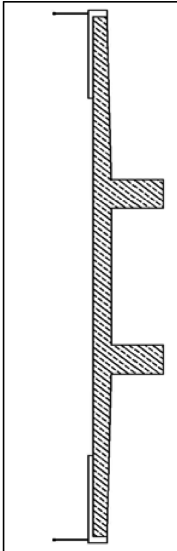
Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Kiesnester, Hohlstellen	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Risse		





Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **0**



Vorschriften

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003, 2009)	DIN FB 102 (Bemessung; 2003, 2009)	RPS (2009)
DIN 1055 (Einwirkungen; 2003)		ZTV-ING
		ARS (22/2012)

Einwirkungsseite

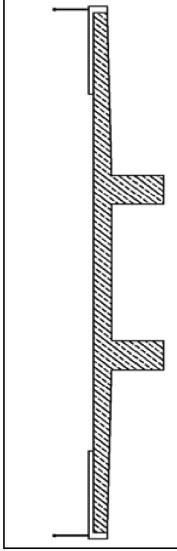
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über LM1	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

Widerstandsseite

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
keine auffälligen Schäden		

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
<b>Stahlbeton</b>			
Spannbeton			
<b>Einfeld</b>			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: 7



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003, 2009)	DIN FB 102 (Bemessung; 2003, 2009)	RPS (2009)
DIN 1055 (Einwirkungen; 2003)		ZTV-ING
		ARS (22/2012)

*Einwirkungsseite*

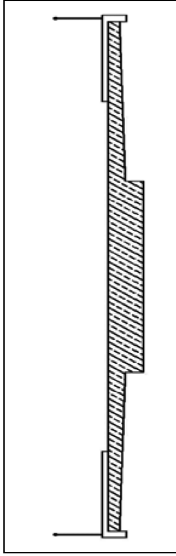
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über LM1	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Einfeld			
Spannbeton			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **64**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

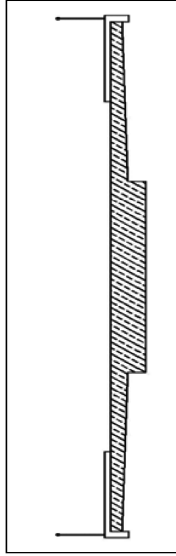
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)		
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Risse		
Unterbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **5**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

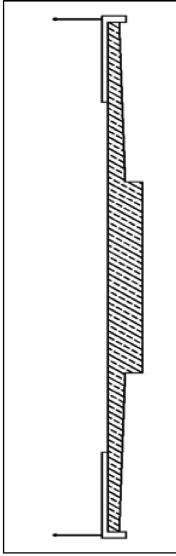
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967) Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Risse (insbesondere an Koppelfugen)	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
<b>Stahlbeton</b>			
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **29**



*Vorschriften*

<b>Einwirkungen</b>	<b>Bemessung / Ausführung</b>	<b>Besonderheiten</b>
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

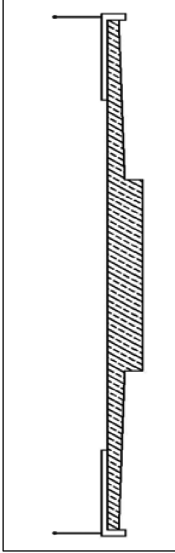
<b>Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967) Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

<b>Relevante Bauteile / Konstruktionen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung Kiesnester	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Betongefüge (Fehlstelle) Korrosion	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **6**



*Vorschriften*

<b>Einwirkungen</b>	<b>Bemessung / Ausführung</b>	<b>Besonderheiten</b>
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

<b>Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967) Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

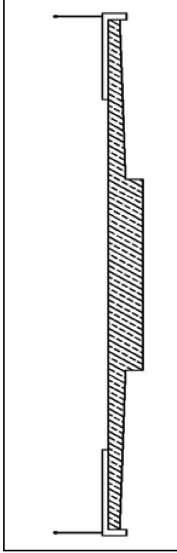
*Widerstandsseite*

<b>Relevante Bauteile / Konstruktionen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Überbau: Risse (insbesondere an Koppelfugen)	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **125**



*Vorschriften*

<b>Einwirkungen</b>	<b>Bemessung / Ausführung</b>	<b>Besonderheiten</b>
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortentlass 02.77
		DAStb-R111 (1972)

*Einwirkungsseite*

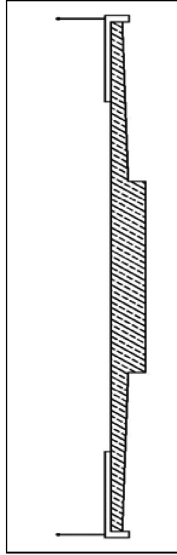
<b>Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (VIM), DMS und Wegaufnehmer (B-VIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

*Widerstandsseite*

<b>Relevante Bauteile / Konstruktionen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung		
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilbasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Einfeld			
Spannbeton			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **5**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortlerlass 02.77
		DAFStb-R111 (1972)

*Einwirkungsseite*

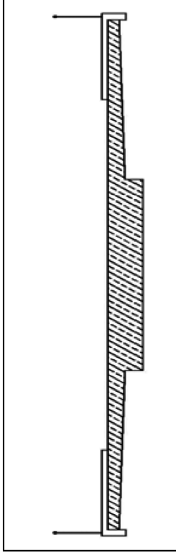
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Spannbeton			
Einfeld			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **72**



*Vorschriften*

<b>Einwirkungen</b>	<b>Bemessung / Ausführung</b>	<b>Besonderheiten</b>
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Soforterlass 02.77
		DAfStb-Rilii (1972)

*Einwirkungsseite*

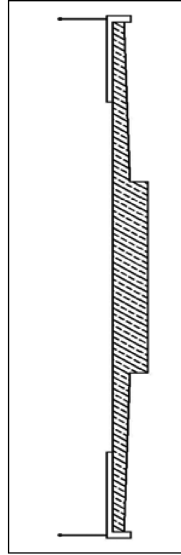
<b>Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

<b>Relevante Bauteile / Konstruktionen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Lager: Stahlkorrosion	Stahlkorrosion	Wirbelstromsensoren, Piezosensoren, elektrochemische Sensoren
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilibasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Spannbeton			
Einfeld			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **31**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Soforterlass 02.77
		DAfStb-Rili (1972)

*Einwirkungsseite*

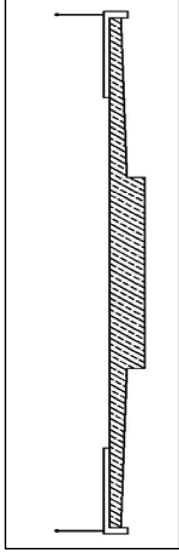
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Risse		

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton		Spannbeton	
Einfeld		Mehrfeld	

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **54**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978),	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAFStb-R111 (1985)

*Einwirkungsseite*

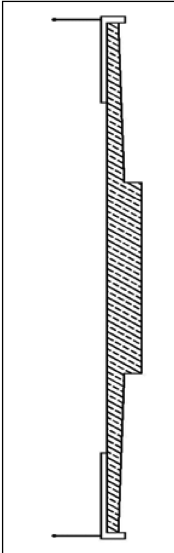
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilibasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
<b>Stahlbeton</b>			
Einfeld	Spannbeton		
	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **1**



*Vorschriften*

<b>Einwirkungen</b>	<b>Bemessung / Ausführung</b>	<b>Besonderheiten</b>
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAfStb-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

<b>Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

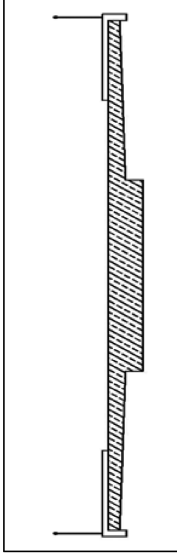
*Widerstandsseite*

<b>Relevante Bauteile / Konstruktionen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
keine auffälligen Schäden		



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **15**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAFStb-R11i ('1985)

*Einwirkungsseite*

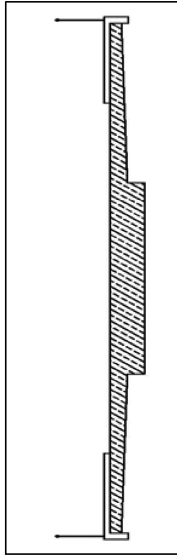
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **21**



*Vorschriften*

<b>Einwirkungen</b>	<b>Bemessung / Ausführung</b>	<b>Besonderheiten</b>
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAFStb-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

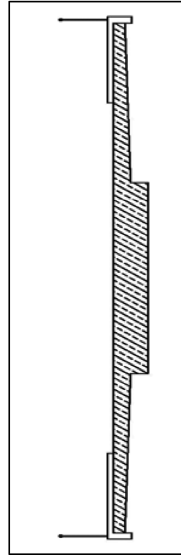
<b>Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

*Widerstandsseite*

<b>Relevante Bauteile / Konstruktionen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung		
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilibasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
<b>Stahlbeton</b>			
Spannbeton			
<b>Einfeld</b>			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **17**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003, 2009)	DIN FB 102 (Bemessung; 2003, 2009)	RPS (2009)
DIN 1055 (Einwirkungen; 2003)		ZTV-ING
		ARS (22/2012)

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über LM1	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

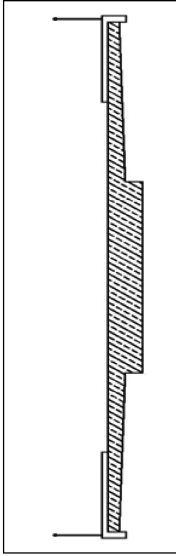
*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Einfeld			
Spannbeton			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **3**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003, 2009)	DIN FB 102 (Bemessung; 2003, 2009)	RPS (2009)
DIN 1055 (Einwirkungen; 2003)		ZTV-ING
		ARS (22/2012)

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über LM1	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

*Widerstandsseite*

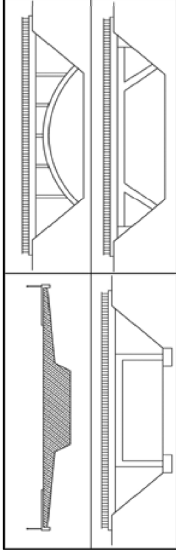
Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
keine auffälligen Schäden		





Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **45**



*Vorschriften*

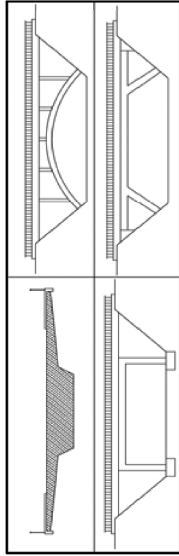
Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)		
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Abplatzungen, freiliegende Bewehrung		
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)



Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **8**

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
<b>Stahlbeton</b>			
Einfeld	Mehrfeld		

*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

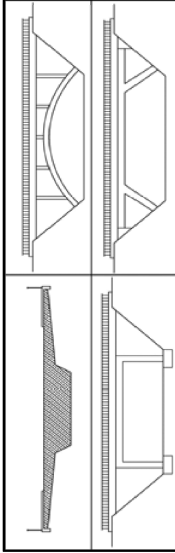
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967) Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Risse (insbesondere an Koppelfugen)	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **6**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

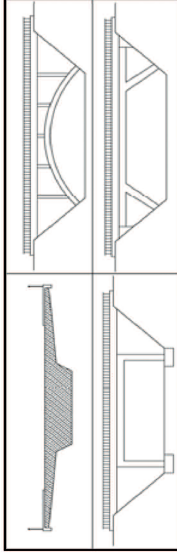
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)		
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung		

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **9**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1924, 1941, 1952, 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944, 1952, 1959)	
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963)	DIN 1075 (Konstruktion; 1930, 1955)	
	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1966)	

*Einwirkungsseite*

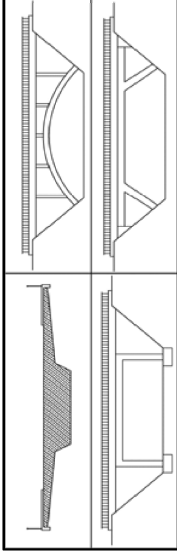
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 30 & 45 für Landstraßen (1952 – 1967)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60 für Autobahnen (1952 – 1967)		
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Risse (insbesondere an Koppelfugen)	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Einfeld			
Spannbeton			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: 37



Vorschriften

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortentlass 02.77
		DAFStb-R111 (1972)

Einwirkungsseite

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z.B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
Tausalze: bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren

Widerstandsseite

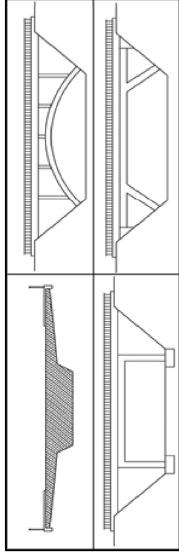
Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Abplatzungen, freiliegende Bewehrung		
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)







Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
<b>Stahlbeton</b>			
Spannbeton			
<b>Einfeld</b>			
Mehrfeld			



Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **47**

*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967)	DIN 1045 (Bemessung; 1944; 1972, 1975, 1978)	ZTV-K 76
DIN 1055 (Einwirkungen; 1963, 1977, 1978)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, 1969, 1973, 1979)	Sofortlerlass 02.77
		DAFStb-RlII (1972)

*Einwirkungsseite*

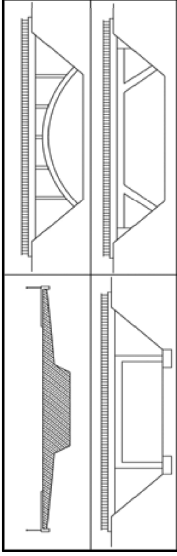
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Temperatur: linearer Temperaturgradient nicht berücksichtigt	Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer, FOS (Bauteiltemperatur)
Tausalze: unzureichende Verpressung von Hüllrohren bei zu geringer Betondeckung	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
Feuchte: bei schadhafter Abdichtung (z. B. Mastix auf Glasvlies)	Feuchte	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar
SpRK: Verwendung gefährdeter Spannstähle	-	im Bestand derzeit messtechnisch nicht erfassbar

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilibasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Einfeld			
Spannbeton			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **21**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978),	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAFStb-Rilii (1985)

*Einwirkungsseite*

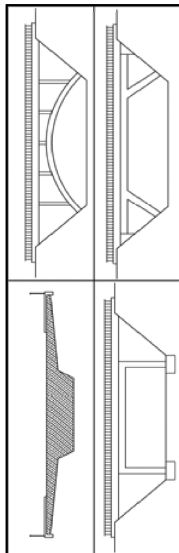
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
<b>Stahlbeton</b>			
Spannbeton			
<b>Einfeld</b>			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **5**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAfStb-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

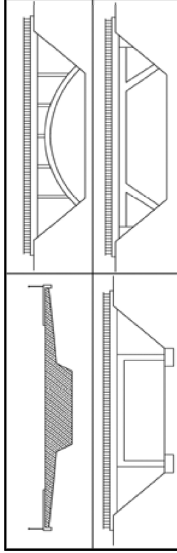
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982) Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
keine auffälligen Schäden		

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **3**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAFStb-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

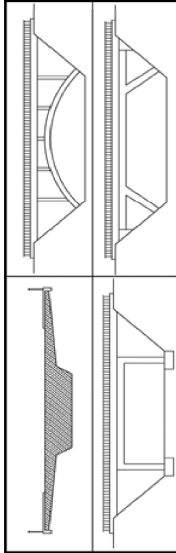
Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)

Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **52**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN 1072 (Lastannahmen; 1967, 1985)	DIN 1075 (Bemessung; 1973, 1981)	ARS (9/1982, 10/1990, 23/1995, 17/1999, 11/2003)
DIN 1055 (Einwirkungen; 1977, 1978)	DIN 1045 (Bemessung; 1978, 1988, 1989, 2001)	ZTV-K (80, 88, 96)
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003)	DIN 4227 (Spannbeton; 1953, '69, '73, '79, V '82)	DAfStb-Rili (1985)

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über BK 60 für Bundesfern-, Kreis- & Stadtstraßen (1980 - 1982)	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)
Lasten über BK 60/30 für Bundesfern-, Landes-, Kreis- & Stadtstraßen (1982 - 2003)		

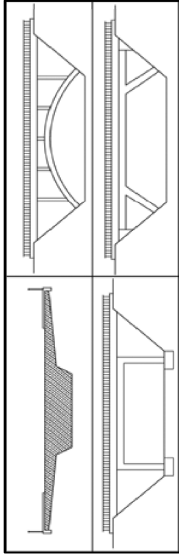
*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Hohlstellen, Kiesnester	Betongefüge (Fehlstelle)	im Bestand derzeit nicht erfassbar
Unterbau: Abplatzungen, freiliegende Bewehrung	Korrosion	Bohrkernanode, Drahtkorrosionssensor, Anodenleiter (Instandsetzung)
Ausrüstung: Beläge gerissen	Feuchte	FOS, textilibasierte Sensorsysteme (jeweils Instandsetzung)



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton	Spannbeton		
Einfeld	Mehrfeld		

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: **2**



*Vorschriften*

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003, 2009)	DIN FB 102 (Bemessung; 2003, 2009)	RPS (2009)
DIN 1055 (Einwirkungen; 2003)		ZTV-ING
		ARS (22/2012)

*Einwirkungsseite*

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über LM1	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

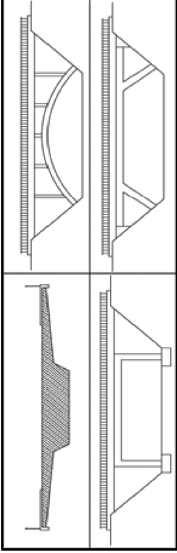
*Widerstandsseite*

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
Überbau: Risse	Rissbreite	Riss-DMS, Wegsensoren, Schallemissionsanalyse, FOS (Instandsetzung)



Hohlkasten	Plattenbalken	Platten	Sonstige
< 1967	1968 - 1979	1980 - 2002	≥ 2003
Stahlbeton			
Einfeld			
Mehrfeld			

Anzahl der Brücken dieser Gruppe in der Schadensdatenbank: 0



Vorschriften

Einwirkungen	Bemessung / Ausführung	Besonderheiten
DIN FB 101 (Einwirkungen; 2003, 2009)	DIN FB 102 (Bemessung; 2003, 2009)	RPS (2009)
DIN 1055 (Einwirkungen; 2003)		ZTV-ING
		ARS (22/2012)

Einwirkungsseite

Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen	Parameter	Sensoren
Verkehr: Lasten über LM1	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM)

Widerstandsseite

Relevante Bauteile / Konstruktionen	Parameter	Sensoren
keine auffälligen Schäden		



**Neubau**

*Einwirkungsseite*

<b>Relevante Einwirkungen / Beanspruchungen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Verkehr	Fahrzeuggewicht	Platten- und Streifensensoren (WIM), DMS und Wegaufnehmer (B-WIM), FOS (an Fahrbahnübergängen/Lagern)
	Geschwindigkeit	Induktionsschleifen, Leitpfosten-Zählgeräte, Computer Vision, Tracking
	Beschleunigung / Schwingung	Piezosensoren, kapazitive Beschleunigungssensoren, FOS
Temperatur	Temperatur	Thermoelemente, Widerstandsthermometer, FOS, Schwingssaitenaufnehmer
Feuchte	Luftfeuchte	Hygrometer
	Bauteilfeuchte	Multiringelektrode, FOS
Chloride	Chloridkonzentration	Chloridsensoren
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> -Gehalt in der Luft	CO <sub>2</sub> -Sensoren
	CO <sub>2</sub> -Gehalt im Beton	pH-Wert-Messung (Sensoren derzeit noch nicht ausreichend erprobt)

*Widerstandsseite*

<b>Relevante Schäden / Bauteile</b>	<b>Parameter</b>	<b>Sensoren</b>
Risse (globale Überwachung)	Dehnungen	DMS, FOS, Schwingssaitenaufnehmer, Servo-Neigungsmesser, SOFO-Sensoren, MEMS-Sensoren
	Neigungen	
Korrosion	Beschleunigung	Piezosensoren, Servo-Beschleunigungssensoren, MEMS-Sensoren
	Temperatur, Bauteilfeuchte, Chloride, CO <sub>2</sub>	siehe „Einwirkungsseite“
	Kurzschlussströme	Anodenleiter, Korrosionsuhr, Drahtsensor
	Korrosionspotenzial	interne Bezugselektrode (z.B. Manganoxidelektrode)
Spanngliedbrüche	indirekt (Riss- und Dehnungsänderungen)	DMS, FOS, Schallemissionsmethode
	direkt (Spannkraftmessung)	Kraftmessdose, magnetoelastische Messungen, Wirbelstrom-Multisensoren
Verformungen / Setzungen	Verschiebung	Wegaufnehmer, FOS, Schwingssaitenaufnehmer, GPS, Tachymeter
	Lagerkräfte	spezielle Kraftmessdosen
Lagerschäden	Verschiebungen	siehe „Verformungen / Setzungen“
	Verdrehungen	siehe „Neigungen“ bei „Risse“
Belag / Abdichtung	Feuchte	textilbasierte FOS (flächige Überwachung), weitere s. „Feuchte“

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

### 2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau

Krause, Rath, Sawade, Dumat

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 14,50

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2

Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung

Steinauer, Mayer, Kündig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 26,50

B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel

Sistenich

€ 14,50

### 2008

B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme

Schröder

€ 12,50

B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung – Bewehrung

Schröder

€ 13,50

B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten

Schröder, Staack

€ 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff

Eilers

€ 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau

Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 17,50

B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositions-kategorie XF4

Bramshuber, Spörel, Warkus

€ 12,50

### 2009

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte

Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 14,50

B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann,

Baltzer, Riepe, Kündig

€ 14,00

B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln

Blosfeld

€ 17,50

B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4

Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 29,50

B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln

Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger

€ 18,50

B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

Tauscher

€ 14,50

### 2010

B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau

Kuhlmann, Euler

€ 22,50

B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen

Weschpennig, Kropf, von Witzhausen

€ 13,50

B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln

Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 21,00

B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk

Müller

€ 14,00

B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand

Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum

€ 13,50

### 2011

B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems

Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller,

Steinauer, Scharnigg

€ 17,00

B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes

Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“

Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“

Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“

Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“

Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller,

Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier,

Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 29,50

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien

Kuhlmann, Günther, Krauss

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung

Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 15,50

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln

Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los

€ 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse

Müller, Vogel, Neumann

€ 14,50



- B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand  
Freundt, Böning € 16,00
- B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken  
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00
- B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)  
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00
- B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung  
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50
- B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton  
Nguyen, Freitag € 13,50

## 2012

- B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie  
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00
- B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen  
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50
- B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke  
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50
- B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard  
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

## 2013

- B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung  
Freundt, Böning € 15,00
- B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel  
Kaundinya € 14,00
- B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen  
Hegger, Reiß € 17,50
- B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis  
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen  
Tauscher € 17,00
- B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken  
Adam € 17,00
- B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen  
Freundt, Böning € 15,00

## 2014

- B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen  
Friedrich  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen  
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)  
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00
- B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem  
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50
- B 102: Adaptive „Tube-in-Tube“-Brücken  
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00
- B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken  
Briebrecher, Städing € 14,00
- B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse  
Borrmann, Fischer, Dori, Wild  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke  
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken  
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00
- B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel  
Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00
- B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken  
Neumann, Rauert € XX,XX
- B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken  
Hegger, Herbrand € XX,XX
- B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton  
Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7  
28195 Bremen  
Tel. (0421) 3 69 03-53  
Fax (0421) 3 69 03-48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.