

# Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangs- entwicklung an Brücken

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 111

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a bold, green, lowercase sans-serif font. The letters are closely spaced and have a slight shadow effect, giving it a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

# Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangs- entwicklung an Brücken

von

Stephan Müller

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie  
Abteilung Baustoffe und Betonbau

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 111

**bast**

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

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und 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 FE 15.0489/2009/HRB:**  
Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken

### Fachbetreuung:

Ralph Holst

### 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- 136-3

Bergisch Gladbach, Dezember 2014

## Kurzfassung – Abstract

### **Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken**

Ein Großteil der Brückenbauwerke in Deutschland hat in Anbetracht der üblichen Nutzungsdauer von 100 Jahren über die Hälfte dieser Zeitspanne überschritten. Zur Wahrung der Sicherheit müssen sämtliche Brückenbauwerke in festgelegten Intervallen geprüft werden. Hierbei wird der IST-Zustand ausgewertet und entsprechend RI-EBW-PRÜF beurteilt, um eine optimale Instandhaltungsstrategie ausarbeiten zu können. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Modelle der Schadensumfangsentwicklung von häufigen Schäden an Brücken zu erarbeiten und ein Prognoseverfahren für die Zustandsentwicklung von Brückenbauwerken zu konzipieren und damit die statische Bewertung nach RI-EBW-PRÜF um die dynamischen Schädigungsmodelle zu erweitern. Dafür ist es notwendig, die Änderung der Daten aus den Bauwerksprüfungen, die dem Algorithmus zur Berechnung der Zustandsbewertung zu Grunde gelegt werden, mit den Modellen der Schadensumfangsentwicklung für künftige Zeitpunkte vorher zu bestimmen. Hierfür werden Ingenieurmodelle und probabilistische Modelle gewählt: Die S-Shape-Funktionen und Markov-Ketten bzw. -Prozesse, welche anhand von Realdaten und durch Berechnung mit Schädigungsmodellen validiert werden, erweisen sich hierfür als äußerst produktiv. Für beide Modelle werden grundlegende Untersuchungen durchgeführt und gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen den Modellen besteht. Es offenbart sich, dass S-Shape-Funktionen das Potential haben als erste Einschätzung für die Zustandsentwicklung einer Brücke herangezogen zu werden. Zur Anwendung der Markov-Ketten werden Daten aus SIB-Bauwerke aus Nordrhein-Westfalen und Thüringen ausgewertet. Da das zur Verfügung gestellte Datenfeld zu gering ist, werden Optimierungsverfahren und Möglichkeiten geprüft, den Bestand künstlich zu erweitern. Darauf aufbauend kann gezeigt werden, dass eine Optimierung des Verfahrens unter Berücksichtigung kürzerer Prüfintervalle möglich ist. Das Konzept für ein Modell der Schadensumfangentwicklung ist damit komplett.

### **Designing models to determine the development of the extent of damages to bridges**

Most bridge constructions in Germany have reached more than half of their usual service life of 100 years. To guarantee safety, all bridge constructions have to be inspected at defined intervals. During these inspections, current conditions are assessed according to RI-EBW-PRÜF in order to develop an optimum maintenance and repair strategy. The research project is aimed at designing models for the development of the extent of frequent damages of bridges and at establishing a method for the prognosis of the development of the condition of bridge constructions and, hence, at extending the assessment according to RI-EBW-PRÜF by dynamic damage models. For this purpose, it is required to determine in advance future variations of the data of construction inspections, which are used for the algorithm computing the assessment with the help of models for the development of the extent of damage. Engineering models and probabilistic models are selected. The S-shape functions and Markov chains or processes validated with real data and calculations based on damage models are found to be highly useful for this purpose. For both models, basic studies are performed and the relationship between them is established. The S-shape functions turn out to be useful for a first estimation of the development of the condition of a bridge. For the application of Markov chains, data from the SIB-Bauwerke program from North Rhine-Westphalia and Thuringia are evaluated. As the data supplied are not sufficient, optimization methods and possibilities of artificially extending the data inventory are considered. It is shown that the method can be optimized for shorter inspection intervals. This completes the concept for a model of the development of the extent of damage.



## Inhalt

|          |   |    |          |  |    |
|----------|---|----|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....                                   | 7  | <b>5</b> | <b>Entwicklung einer Konzeption zur Prognose der Schadensumfangsentwicklung</b> .....              | 20 |
| <b>2</b> | <b>Brückenbestand in Deutschland</b> . . . . .            | 8  | 5.1      | Vorüberlegungen .....  | 20 |
| 2.1      | Brückenbestand und Altersverteilung .....                 | 8  | 5.2      | Auswertung der Daten von SIB-Bauwerke NRW .....  | 21 |
| 2.2      | Zustand der Brückenbauwerke .....                         | 9  | 5.3      | Auswertung der Daten von SIB-Bauwerke NRW und TH .....   | 22 |
| <b>3</b> | <b>Zustandsbewertung von Brücken in Deutschland</b> ..... | 9  | 5.4      | Untersuchung der S-Shape-Funktionen .....  | 23 |
| 3.1      | Grundlagen .....  | 9  | 5.4.1    | Vorüberlegung .....  | 23 |
| 3.2      | Zustandsbewertung von Brückenbauwerken .....              | 10 | 5.4.2    | Berechnung der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion .....  | 23 |
| 3.3      | Zustandsbewertung von Einzelschäden .....                 | 11 | 5.4.3    | Umrechnung der Schädigungsprozesse in Substanzkennzahlen .....                                     | 24 |
| <b>4</b> | <b>Schäden an Brücken und Schädigungsmodelle</b> .....    | 11 | 5.4.4    | Parameterstudie zur chloridinduzierten Bewehrungskorrosion .....                                   | 24 |
| 4.1      | Grundlage .....   | 11 | 5.4.5    | Ergebnisse der einfachen Parameterstudie .....   | 24 |
| 4.1.1    | Schäden an Brücken .....                                  | 11 | 5.4.6    | Verfeinerung der Parameterstudie .....   | 25 |
| 4.1.2    | Vorschäden älterer Brücken .....                          | 14 | 5.4.7    | Ergebnisse der verfeinerten Parameterstudie .....  | 27 |
| 4.2      | Schädigungsmodelle .....                                  | 15 | 5.4.8    | Interpretation der Ergebnisse und Ausblick .....   | 28 |
| 4.3      | Modelle auf Ebene des Einzelschadens .....                | 16 | 5.5      | Anwendung der Markov-Ketten .....  | 31 |
| 4.3.1    | Depassivierung des Betonstahls .....                      | 16 | 5.5.1    | Anwendung bezogen auf SIB-Bauwerke .....   | 31 |
| 4.3.2    | Depassivierung infolge Chlorideindringung .....           | 16 | 5.5.2    | Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten für den neuen Zustandsraum der Daten NRW und TH ..... | 31 |
| 4.3.3    | Depassivierung infolge Karbonatisierung .....             | 16 | 5.5.3    | Begrenzung des Zustandsraums .....   | 34 |
| 4.3.4    | Korrosion der Bewehrung .....                             | 16 | 5.5.4    | Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten für den neuen Zustandsraum der Daten NRW und TH ..... | 34 |
| 4.3.5    | Unberücksichtigte Modelle .....                           | 17 |          |  |    |
| 4.4      | Modelle auf Ebene des Gesamttragwerks .....               | 17 |          |  |    |
| 4.4.1    | S-Shape-Funktionen .....                                  | 17 |          |  |    |
| 4.4.2    | Markov-Ketten .....                                       | 18 |          |  |    |
| 4.5      | Beurteilung der Modelle .....                             | 19 |          |  |    |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.5.5    | Optimierung der Übergangswahrscheinlichkeiten . . . . .                              | 35        |
| <b>6</b> | <b>Künstliche Erweiterung des Datenbestands aus SIB-Bauwerke . . . . .</b>           | <b>39</b> |
| 6.1      | Rückrechnung auf Grundlage der S-Shape-Funktion. . . . .                             | 39        |
| 6.2      | Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten für die erweiterte Datenbasis . . . . . | 40        |
| 6.3      | Beurteilung des Rückrechnungsverfahrens. . . . .                                     | 43        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>  | <b>44</b> |
| <b>8</b> | <b>Literatur . . . . .</b>   | <b>46</b> |

## 1 Einleitung

Ein Großteil der Brückenbauwerke in Deutschland wurde nach dem zweiten Weltkrieg im Zuge des Wiederaufbaus und den darauffolgenden drei Jahrzehnten erbaut. Demzufolge sind diese Brücken zwischen 30 und 60 Jahren alt. Wenn man von der üblichen Nutzungsdauer von Brückenbauwerken von 100 Jahren ausgeht, wird ersichtlich, dass einige Brücken über die Hälfte ihrer Nutzungsdauer überschritten haben und viele diese Zeitmarke bald erreichen werden.

Während ihrer Nutzungsdauer sind sämtliche Brücken der Umwelt und dem Verkehr ausgesetzt. Aggressive Umweltbedingungen stellen für Brückenbauwerke sämtlicher Bauweisen große Probleme dar. Auch das seit 1950 stark ansteigende Verkehrsaufkommen und die Zulassung längerer und höher belastbarer Nutzfahrzeuge können gravierende Auswirkung auf die Bauwerke haben. Es ist offensichtlich, dass ohne Inspektionen, Wartungen und Instandsetzungen eine Mehrzahl der Brücken in absehbarer Zeit einen Zustand erreicht, in welchem die Gebrauchstauglichkeit und die Tragsicherheit nicht mehr gegeben sind.

Zur Wahrung der Sicherheit müssen sämtliche Brückenbauwerke Prüfungen in festgelegten Intervallen unterzogen werden. Hierbei wird handnah das gesamte Bauwerk untersucht und sämtliche Schädigungen werden dokumentiert, ausgewertet und beurteilt, um eine optimale Instandhaltungsstrategie auf Netzebene ausarbeiten zu können.

Eine solche Strategie kann z. B. auf Grundlage der Prognose von baustoffspezifischen Schädigungen und deren zeitlichen Umfangsentwicklung erfolgen. Das Ziel ist es dann eine Grenzschädigung zu definieren und deren künftiges Eintreten unter zu Hilfenahme von Schädigungsmodellen und auf Grundlage der Auswertungen von Brückenprüfungen vorherzubestimmen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Modelle der Schadensumfangsentwicklung von häufigen Schäden an Brückenbauwerken zu erarbeiten und auf deren Grundlage ein Prognoseverfahren für die Zustandsentwicklung von Brückenbauwerken zu konzipieren. Es sollen charakteristische Einflussgrößen dieser Modelle herausgearbeitet werden, die die Situation des jeweiligen Bauteils möglichst genau beschreiben. Auf Grundlage dieser Modelle soll die Zustandsbewertung nach RI-EBW-PRÜF um die Möglichkeit erweitert werden, eine Aussage über die Zustandsentwicklung einer Brücke treffen zu können.

Aus dem Forschungsvorhaben soll somit eine Methodik entwickelt werden, welche letzten Endes eine bessere Budgetierung der Unterhaltung und Sanierung des Brücken-Portfolios aus SIB-Bauwerke ermöglicht. Auf Grundlage einer prognostizierten Zustandsbewertung kann der Handlungsbedarf bezüglich Sanierungsmaßnahmen besser eingeschätzt werden. Zum Beispiel kann abgeschätzt werden wann ein Brückenbauwerk ohne Sanierungsmaßnahmen nicht mehr ausreichend sicher ist. Danach kann entschieden werden, ob Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen oder auf eine bestimmte Dauer zurückgestellt werden. Bei Rückstel-

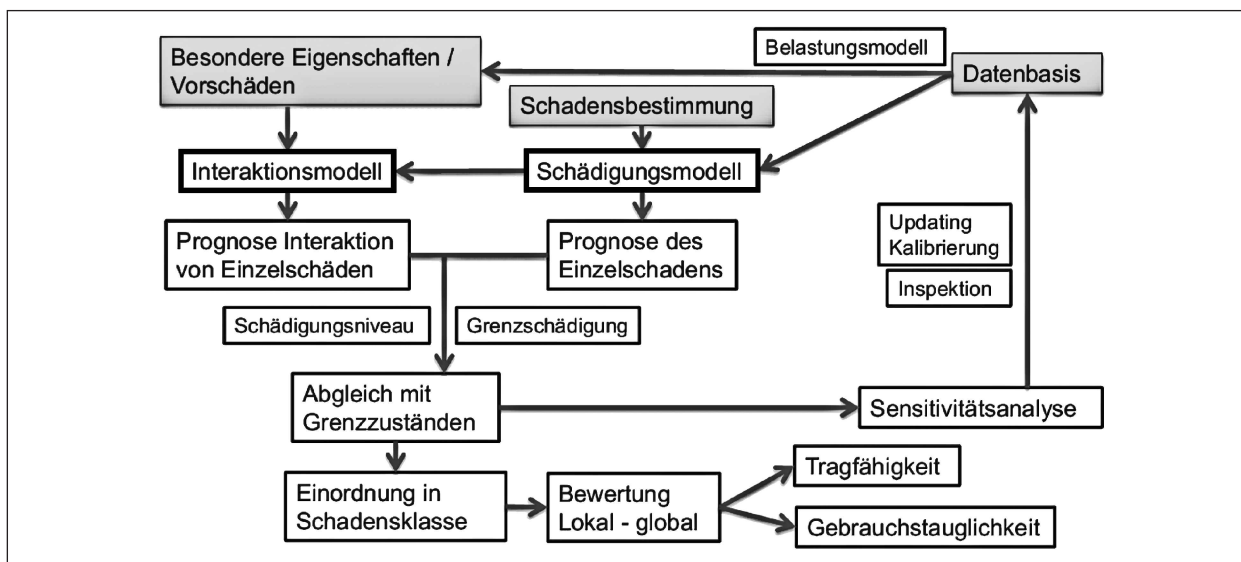


Bild 1: Methodik der Bauwerksbewertung



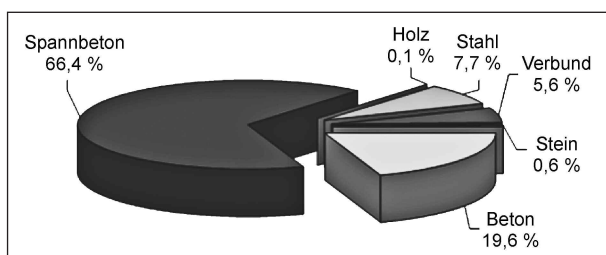
lung können die Gelder für anderweitige Maßnahmen eingesetzt werden. Andererseits könnte es mit der Ausarbeitung der Konzeption in ein ausgereiftes Prognoseverfahren fortan die Möglichkeit bestehen, durch die Variation der Eingangsparameter in die Modelle der Schadensumfangsentwicklungen und deren Kombination die Hauptschäden herauszufiltern, um damit eine gezielte, auf das Bauwerk abgestimmte Sanierungsmaßnahme auszuarbeiten.

Ausgang für ein solches Verfahren ist wie bereits vorgestellt eine Zustandsbewertung der Brückentragwerke. Das prinzipielle Vorgehen einer Zustandsbewertung ist in Bild 1 dargestellt. Kernpunkte der dort aufgeführten Bauwerksbewertung, welche innerhalb dieses Projekts untersucht und ausgearbeitet werden, sind Schadensbestimmung, Datenbasis, Schädigungsmodelle, die Prognose des Einzelschadens, Abgleich mit Grenzzuständen und die Einordnung in Schadensklassen. Die verbleibenden Schwerpunkte sind in anschließender Forschungsarbeit in das entwickelte Verfahren zu integrieren. Die Schritte des Abgleichs eines vorgefundenen Schadens mit Grenzschäden, dessen Einordnung in Schadensklassen und die Bewertung sind bereits aufgestellt worden und in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

## 2 Brückenbestand in Deutschland

### 2.1 Brückenbestand und Altersverteilung

Im Jahre 2011 wurde der Gesamtbestand der Straßenbrücken in Deutschland auf ca. 120.000 Bauwerke geschätzt [NAUMANN, 2011]. Davon werden 38.800 Brückenbauwerke als Baulast dem Bund zugeordnet (Stand 2010) [BMVBS, 2011]. Bild 2 zeigt die Verteilung der Brückenfläche nach



**Bild 2:** Brückenfläche nach Bauweisen bzw. Hauptbaustoff; Brücken im Zuge von BAB und Bundesstraßen (Stand 2007) [KASCHNER, R. et al., 2009]

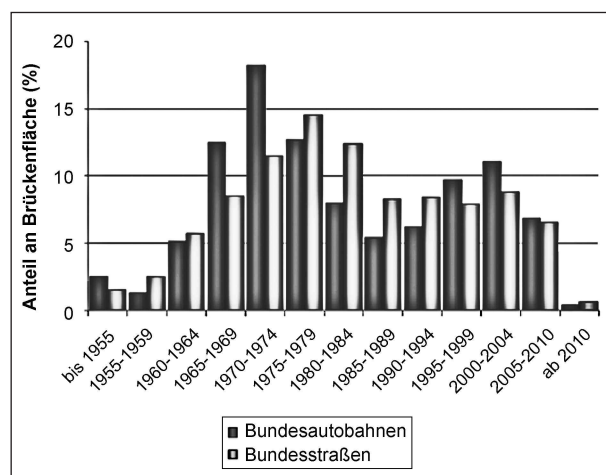
Bauweisen von den dem Bund zugeordneten Brücken.

Mit 86 % des Gesamtbestands nimmt die Massivbauweise den Großteil der Brücken ein. Stahl- und Verbundbrücken mit 7,7 % und 5,6 % sind dagegen wesentlich weniger vorhanden. Einen nahezu vernachlässigbaren Anteil stellen Stein- und Holzbrücke mit 0,6 % und 0,1 % dar.

Die Altersverteilung nach der Brückenfläche aller Brücken des Bundes ist in Bild 3 dargestellt. Aus Bild 3 kann sehr gut entnommen werden, dass bis 1960 nur knapp 5 % der Brückenfläche der Bundesautobahnen und Bundesstraßen erbaut worden war. In den 1960er Jahren und Anfang der 70er Jahre erlebte Deutschland einen enormen wirtschaftlichen Aufschwung, der sich auch in einer Aufbauphase der Verkehrsinfrastruktur bemerkbar machte: Im Zeitraum 1960-1979 wurden fast die Hälfte der Brückenfläche der Bundesautobahnen und 40 % der Brückenfläche der Bundesstraßen errichtet, wobei ab 1974 für Bundesautobahnen und ab 1979 für Bundesstraßen wieder negative Entwicklung der Neubauten einsetzen.

Mit der Wiedervereinigung im Jahre 1990 bestand in den neuen Bundesländern ein hoher Modernisierungs- und Nachholbedarf der Verkehrsinfrastruktur, dem in den Jahren 1990 bis 2010 nachgekommen wurde. Hier entstanden ca. ein Viertel der Brückenfläche der Bundesautobahnen und ca. 30 % der Brückenfläche der Bundesstraßen.

Entsprechend sind ein Großteil der Brücken, die dem Bund unterstellt sind, zwischen 10 und 40 Jahre alt und ein nicht zu vernachlässigbarer Anteil älter als 40 Jahre.



**Bild 3:** Altersstruktur nach Brückenfläche (Stand 2011) [COLDITZ, B., 2012]

## 2.2 Zustand der Brückenbauwerke

Aus Kapitel 2.1 geht hervor, dass einige Brücken die Hälfte ihrer geplanten Lebensdauer von ca. 100 Jahren erreicht bzw. diese Zeitspanne bald überdauert haben. Die Zeit hinterlässt an den Bauwerken Spuren, was sich in Verschleiß und Schäden äußert. In Deutschland sind, um die Sicherheit der Brücken zu garantieren, Brückenprüfungen durchzuführen, die in einer Zustandsbewertung des Bauwerks (Note zwischen 1,0 bis 4,0) resultiert. Genauere Informationen zu dieser Thematik sind in Kapitel 3 zu finden. Die Zustandsverteilung der Brückenfläche der Brücken, die dem Bund zugeordnet werden, ist in den Bildern 4 und 5 dargestellt.

Aus den Darstellungen wird deutlich, dass ernsthafter Handlungsbedarf besteht: Zum einen ist der Trend ersichtlich, dass sich der Allgemeinzustand

der Brücken verschlechtert, sodass der Anteil der Brückenfläche mit der Bewertung „sehr gut“ (1,0) abnimmt und die Brückenfläche mit „ausreichend“ und „ungenügend“ (2,5-4,0) zunimmt und zum anderen, dass ein wesentlicher Anteil der Brückenfläche mit der Note 3,0 und schlechter bewertet wurde.

## 3 Zustandsbewertung von Brücken in Deutschland

### 3.1 Grundlagen

In der Bundesrepublik Deutschland ist mit der Einführung der DIN 1076: „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen; Überwachung und Prüfung“ im Jahre 1930 der Grundstein für eine regelmäßige Prüfung von Brückenbauwerken geschaf-

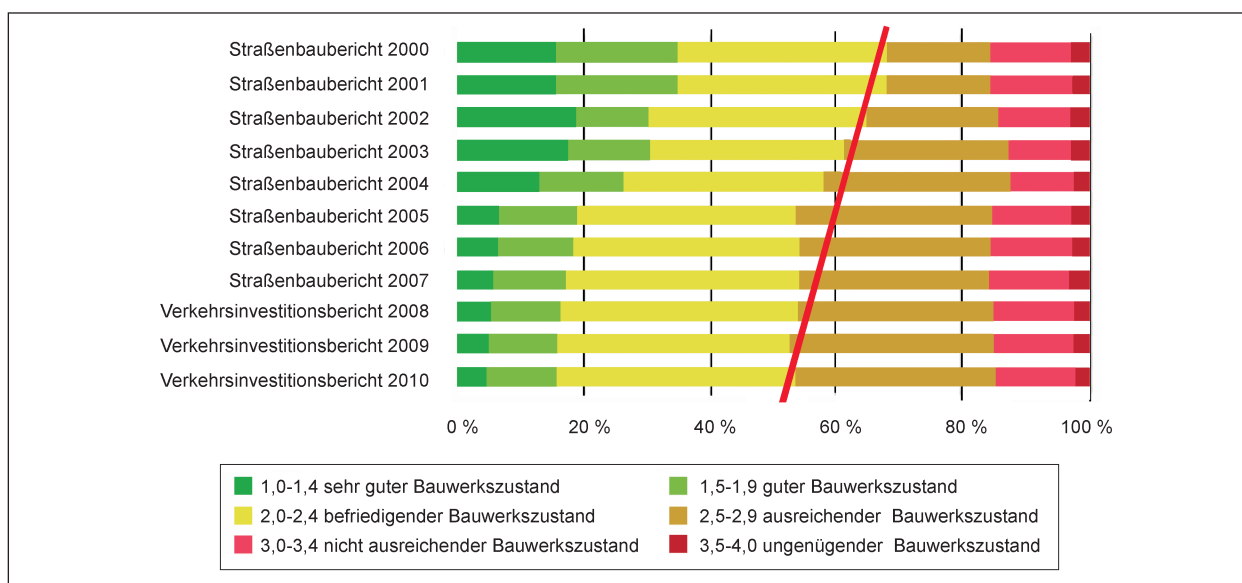


Bild 4: Brücken der Bundesfernstraßen, Zustandsnoten nach Brückenfläche (Stand 2010) [COLDITZ, B., 2012]

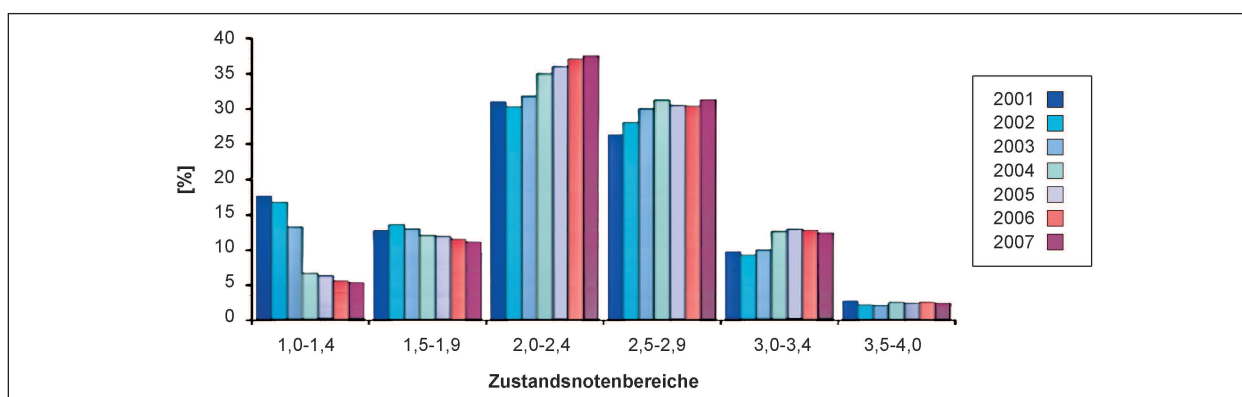


Bild 5: Zustandsnoten nach Brückenfläche (Stand 2007) [KASCHNER, R, et al., 2009]

fen worden. Nach der aktuellsten Ausgabe sind Prüfungen in festen Intervallen festgelegt: Dreimal jährlich sind laufende Beobachtungen (LB) und einmal jährlich Besichtigungen (B) durchzuführen. Die einfache Prüfung (EP) soll dagegen alle drei Jahre erfolgen, wobei sich diese auf ohne Zuhilfenahme von Rüstungen begehbare Bereiche beschränkt. Eine handnahe Sichtprüfung hat unter Zuhilfenahme technischer Hilfsmittel in der Hauptprüfung (HP) alle sechs Jahre zu erfolgen. Im Falle von außergewöhnlichen Ereignissen (z. B. Verkehrsanprall) werden zusätzlich Sonderprüfungen angeordnet. Die Prüfungen werden zusammen mit den wichtigsten Daten des Bauwerks in einem Bauwerksbuch eingetragen. Das Ergebnis einer Brückenprüfung ist eine Bewertung des Ist-Zustands eines Brückenbauwerks.

Seit Inkrafttreten der Regelungen für Brückenprüfungen, war es auch stets das Ziel, eine einheitliche Prüfung, Auswertung und deren Protokollierung für ganz Deutschland festzulegen. Dieses Ziel wurde 1998 mit der Einführung der RI-EBW-PRÜF „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076“ und des Programmsystems SIB-BAUWERKE, welches zudem die Betrachtung des Zustands auf Netzebene ermöglichen soll, geschaffen.

### 3.2 Zustandsbewertung von Brückenbauwerken

Die Zustandsbewertung von Brückenbauwerken erfolgt durch die Einordnung des Ist-Zustands des Gesamtbauwerks in eine Notenskala von 1,0-4,0 nach dem Algorithmus in [HAARDT, P., 1999]. Die Note des Gesamtbauwerks ergibt sich aus Einzelnoten, welche in den Kategorien Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) und Dauerhaftigkeit (D) vergeben werden. Bild 6 zeigt den Bewertungsschlüssel für die Umrechnung der Einzelnoten in eine Gesamtnote für den Fall, dass die Dauerhaftigkeit mit  $D = 2,0$  bewertet ist. Unter dieser Voraussetzung können sich bei Variation der Standsicherheit und Verkehrssicherheit von 0,0 bis 4,0 die tabellierten Zustandsnoten ergeben.

Die endgültige Notenfindung ist auf verschiedene Ebenen unterteilt. Der erste Schritt ist die Bewertung auf Bauteilebene. Hierbei legt der Brückenprüfer eine Zustandsbewertung anhand von unterschiedlichen Einzelschäden fest. Anhand des

|   |   | D = 2 |     |     |     |     |
|---|---|-------|-----|-----|-----|-----|
| S | 4 | 4,0   | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
|   | 3 | 3,2   | 3,4 | 3,6 | 3,8 | 4,0 |
|   | 2 | 2,3   | 2,5 | 2,6 | 2,9 | 4,0 |
|   | 1 | 2,2   | 2,3 | 2,4 | 2,8 | 4,0 |
|   | 0 | 2,0   | 2,1 | 2,2 | 2,7 | 4,0 |
|   |   |       | 0   | 1   | 2   | 3   |
|   |   | V     |     |     |     |     |

**Bild 6:** Bewertungsschlüssel für die Zustandsnote (ZN) bei variabler Benotung der Kategorien S und V unter Voraussetzung  $D = 2$  [HAARDT, P.]

Schadensbeispielkatalogs [RI-EBW-PRÜF] kann sich der Prüfer für die Einordnung eines jeden Schadens in die Skala von 1 bis 4 (ganzzahlige Note; s. Bild 6) für die Bereiche Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit orientieren. Aus der Bewertung resultiert auf Grundlage des Algorithmus in [HAARDT, P., 1999] die sog. Basiszustandszahl (BZZ) für jeden Einzelschaden. Die Note der Bauteilgruppe ergibt sich nach dem Maximumprinzip aus den BZZen der Einzelschäden unter Berücksichtigung von Zu- und Abschlägen. Letztere ergeben sich durch die Auswertung der Prüfung der Einzelschäden nach dem Schadensumfang U in „klein“, „mittel“ und „groß“. Dadurch wird die Zustandsnote der Bauteilgruppe um 0,1 erhöht (U = „groß“), um 0,1 verringert (U = „klein“) oder beibehalten (U = „mittel“). Zudem wird in Abhängigkeit von der Schadensanzahl des maßgebenden Schadens zusätzlich eine Notenänderung in Form einer Erhöhung von 0,1, wenn der Schaden öfter als 15mal auftritt, eine Erniedrigung der Bauteilgruppennote um 0,1, wenn der Schaden weniger als 5mal aufgenommen wird und ein Bestehenlassen der Note im Fall, dass der maßgebende Schaden 5 bis 15 mal in der Bauteilgruppe vertreten ist. Die Zustandsnote des gesamten Bauwerks resultiert wiederum aus dem Maximum der Zustandsnoten der Bauteilgruppen. Auch bei dieser Notenvergabe werden Zu- und Abschläge berücksichtigt, wenn weniger als 25 % (-0,1), 25 % bis 50 % ( $\pm 0,0$ ) oder mehr als 50 % der Bauteilgruppen beschädigt sind. Insgesamt erfolgen demnach durch den Brückenprüfer nur Bewertungen der Einzelschäden, wobei er sich an den Vorschlägen des Schadensbeispielkatalogs orientieren kann. Darauf aufbauend ergibt sich EDV-gestützt eine Gesamtnote der Bauteilgruppe bzw. des Gesamtbauwerks.

| V = 0 |     |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| S     | 4   | 3   | 2   | 1   | 0   |
|       | 4   | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| 3     | 3,0 | 3,3 | 3,2 | 3,3 | 4,0 |
| 2     | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,8 | 4,0 |
| 1     | 1,2 | 1,5 | 2,2 | 2,7 | 4,0 |
| 0     | 1,0 | 1,1 | 2,0 | 2,5 | 4,0 |
|       | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   |
|       | D   |     |     |     |     |

**Bild 7:** Bewertungsschlüssel für die Substanzkennzahl (SKZ), der V = 0 zugrunde liegt [HAARDT, P., 1999]

Bei der Auswertung der Zustandsbewertung ist zwischen der Zustandsnote (ZN) und der Substanzkennzahl (SKZ) zu unterscheiden. Während bei der Benotung mit der Zustandsnote sowohl die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit als auch die Verkehrssicherheit eingerechnet werden, ist in der Substanzkennzahl nur die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit berücksichtigt. Letztere gibt somit eine Kernaussage über die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit eines Brückentragwerks wider. In Bild 7 ist der Bewertungsschlüssel für die Substanzkennzahl bei variabler Beurteilung der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit zu finden.

### 3.3 Zustandsbewertung von Einzelschäden

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben wird, geht die Zustandsbewertung eines Brückenbauwerks mehr oder weniger auf einen maßgebenden Einzelschaden zurück. Dieser wird auf Bauteilebene handnah bewertet. Dazu kann sich der Prüfer auf den Schadensbeispielkatalog, welcher die Regelungen der RI-EBW-PRÜF ergänzt, orientieren. Der Bauwerkprüfer hat zu überprüfen, ob der jeweilige Schaden dieser Standardbewertung entspricht oder nicht und soll gegebenenfalls davon abweichen. Der Vorschlag entbindet den Prüfer somit nicht von der Verantwortung einer eigenständigen Bewertung. In Tabelle 1 ist ein Auszug aus dem Schadensbeispielkatalog für die Bauteilgruppe Überbau aus Spann- und Stahlbeton für Schäden infolge Tausalz aufgeführt. Die Schädigung wird als Eindringung von Chloriden in den Beton definiert und einzelne Eindringtiefen in Abhängigkeit von der Betondeckung als Grenzschädigungen festgelegt.

| Schadensbeschreibung                               | S | D | SKZ |
|--|---|---|-----|
| Chlorideindringtiefe beträgt 1/3 der Betondeckung  | 0 | 1 | 1,1 |
| Chlorideindringtiefe beträgt 2/3 der Betondeckung  | 0 | 2 | 2,0 |
| Chlorideindringtiefe reicht an Tragbewehrung heran | 0 | 3 | 2,5 |

**Tab. 1:** Auszug aus dem Schadensbeispielkatalog; Chlorideindringung [RI-EBW-PRÜF]

Wird die Chlorideindringtiefe in der sechsjährigen Hauptprüfung gemessen und es ergibt sich z. B. eine Tiefe von ca. 2/3 der Betondeckung, wird dem Prüfer nahegelegt diesen Schaden mit mindestens den Noten 0 für die Standsicherheit, 0 für die Verkehrssicherheit und 2 für die Dauerhaftigkeit zu bewerten. Durch Verwendung des Bewertungsschlüssels (Bild 6) erfolgt die Umrechnung der Noten der einzelnen Kategorien in die Basiszustandsnote BZZ = 2,0 für den Einzelschaden.

## 4 Schäden an Brücken und Schädigungsmodelle

### 4.1 Grundlage

Um die Schadensumfangsentwicklung von Brücken in Modellen zu beschreiben, ist eine Zusammenstellung aller möglichen Schadensarten und -ursachen Grundvoraussetzung.

Aus Kapitel 2 geht hervor, dass in Deutschland viele unterschiedliche Arten von Überbauten existieren, die sich durch ihre Werkstoffe voneinander abgrenzen. Dadurch sind zwischen bauwerks- und werkstoffspezifischen Schädigungen zu unterscheiden. Im Weiteren wird eine Auflistung von häufigen Schäden an Brücken zusammengestellt. Auf die detaillierten Schädigungsmechanismen wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

#### 4.1.1 Schäden an Brücken

Einige Schadensmechanismen sind für sämtliche Brückenbauwerke im gleichen Maße vorhanden. Diese, von der Bauweise unabhängigen Schäden, sind die Abnutzung von Verschleißteilen (z. B. Übergangskonstruktion, Schutzeinrichtung), Durchfeuchtungen infolge undichter Fahrbahnübergangskonstruktionen oder Entwässerungseinrichtungen, Setzungen im Baugrund an den Brückenlagern und

Korrosionsschäden an den Schutzeinrichtungen und Lagern. Nicht eindeutig zu einem Brückentyp zuordenbar sind Fehlstellen in Anstrichen und Überzügen, die als Ausgangspunkt von Korrosionserscheinungen und Abblätterungen an Schutzeinrichtungen dienen. Eine sehr allgemeine Schädigungsart, welche auf alle Brücken zutrifft ist die Alterung, die nur schwer greifbar zu machen ist, da sie zum einen als chemische Alterung (d. h. die Gefügeänderung infolge Umwelteinwirkungen), zum anderen aber auch als Verschleiß verstanden wird.

Im Fall von Gewässer überspannenden Tragwerken können Abrasionseffekte an umspülten Fundamenten und Stützen eintreten; zudem sind in diesen Fällen stets mit Erosionserscheinungen zu rechnen, wie Auskolkungen und Auswaschungen im flussabwärtigen Bereich.

Ein großes Feld sind außerdem Schäden an Brückenlagern (Kontaktpunkt zwischen Über- und Unterbau), auf die im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht weiter eingegangen werden soll.

Ein spezieller Brückentyp sind Schrägseil- und Hängebrücken, deren Überbau aus unterschiedlichen Werkstoffen erbaut sein kann. Dennoch können allgemeine Schäden für die Seile und Abhänger aufgeführt werden. Eine große Problematik ist die Korrosion der Stahlseile und Spannglieder. Gerade an den Verankerungs- und Umlenkstellen treten große mechanische Einwirkungen auf, die in Verbindung mit elektrochemischer Korrosion zu Reibkorrosion führen. Aber auch auf der freien Seil- oder Spanngliedlänge können durch Abplatzungen der Beschichtungssysteme, Versprödung und Alterung der meist aus Polyethylen (PE) bestehenden Hüllrohren und Klebebänder (unbeständig gegenüber Temperatur und Sonneneinstrahlung) oder Risse im zementösen Füllgut korrosionsfördernde Medien an das eigentliche Seil/Spannglied gelangen und dort zu Korrosion in Form von elektrochemischer Korrosion, Ermüdungsrissskorrosion und Wasserstoffversprödung führen. Auf rein mechanischer Ebene sind Schrägseile und Abhänger dynamischen Lasten nicht nur durch den fließenden Verkehr unterworfen, sondern auch in großem Maße durch die Wind- und Temperatureinwirkungen. Daher ist diese Bauteilgruppe stark ermüdungsgefährdet, wodurch eine ständige Gefahr von Drahtbrüchen besteht [HUNKELER, F. et al., 2005].

Nachfolgend werden baustoffspezifische Schädigungen von Bauwerken behandelt. Dabei wird der

Reihenfolge nach entsprechend dem steigenden Anteil am bundesweiten Bestand auf die Baustofftypen eingegangen.

Holzbrücken sind maßgeblich von ihrer organischen Beschaffenheit beeinflusst. Oft wird umgangssprachlich die Formulierung benutzt, dass „Holz arbeitet“. Dies trifft auch auf Holzbrücken zu und beschreibt sehr gut deren Baustoffverhalten. Dieses ist sehr stark von den Umweltbedingungen beeinflusst; vor allem von der Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Holz schwindet und quillt in großem Maße, wodurch sich Risse im Bauteil einstellen können. Thermische Risse können zudem durch Frost-Tauwechsel entstehen. Neben seiner Neigung zur Rissbildung, ist Holz im gleichen Maße anfällig auf korrosive Einwirkungen. Holzkorrosion (auch Mazeration) kann entsprechend ihrer Ursache in eine biologische (z. B. infolge von Pilzen und Insekten) oder eine witterungsbedingte (z. B. durch ultraviolette Strahlung) Gefügezerstörung unterteilt werden [FINGER; A.; MEILI; M., 2002], [GEROLD, M., 2001].

Abseits der umweltbedingten Einwirkungen und der damit einhergehenden Wechselwirkungen, ist Holz ein natürlich gewachsener Baustoff, der stark inhomogen und anisotrop ist. In vielen Fällen können Schäden an Holzbauteilen auf örtliche Überlastung an Fehlstellen und auf Ausführungsfehler zurückgeführt werden.

Steinbrücken können eine Vielzahl an Schäden aufweisen. Dies ist auch auf die unterschiedliche Verwendung von Gesteins- und Mörtelarten zurückzuführen, die verschiedene Wechselwirkungen mit der Umwelt eingehen. Generell kann man folgende Schäden in Mauerwerken angeben: Im Fugenmaterial sind Verwitterungseffekte (chemisch, biologisch, mechanisch und physikalisch) und Risse (Längs-, Stirnring-, Rückenfugen-, Quer- und Schrägrisse) bekannt. Die Steine neigen je nach Umweltbedingungen zu Abplatzungen und Schalenbildung, Ausblühungen und Krustenbildung; Treibeffekte durch Salzeinwirkung sind ebenso keine Seltenheit. Risse im Fugenmaterial oder auch in Mauersteinen sind durch Überbeanspruchungen stets einzukalkulieren. Des weiteren können Schäden infolge Verformungen durch Kriechen und schwinden entstehen [PROSKE, D. et al., 2006].

Im Gegensatz zu Steinbrücken bilden Verbundbrücken einen weit aus größeren Anteil am Brückenbestand des Bundes. Im Allgemeinen werden

unter Verbundbrücken Tragwerke verstanden, deren Konstruktion aus Stahl- und Stahlbetonbauweise bestehen. Darüber hinaus gibt es auch Brückenbauwerke in Form von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, welche aber nur von untergeordneter Rolle sind und daher im Weiteren nicht betrachtet werden. Bauartspezifische Schwachpunkte dieses Brückentyps sind die Verbindungsstellen der beiden Ausgangsstoffe. Im Stahl-Stahlbeton-Verbundbau werden zur Schubübertragung zwischen Fahrbahnplatte (in Stahlbetonbauweise) und Hauptträger (Stahlbauweise) Kopfbolzendübel eingesetzt. Diese können zum einen durch unzureichende Bemessung oder durch Ermüdung geschädigt werden. Zudem können durch Dehnungsdifferenzen zwischen den Stahl- und Stahlbetonteilen infolge Kriechen und Schwinden große Zwangsbeanspruchungen in der Konstruktion entstehen, die zu Schädigungen führen. Weitere Schädigungsmechanismen die im Verbundbau zu erwarten sind, entsprechen denen der einzelnen Bauweisen (Stahl-/Stahlbetonbauweise) und werden im Folgenden betrachtet.

Den nächst größeren Anteil des bundesweiten Bestands an Brückenbauwerken bilden Stahlbrücken. Im Vergleich zur Massivbauweise können mit dem wesentlich höher festen Stahl filigranere Konstruktionen errichtet werden, wodurch aber die Gefahr von örtlichen Überbelastungen einzelner Bauteile durch eine fortschreitende Ausnutzung steigt. Seit Bestehen der Bauweise ist die elektrochemische Korrosion eine andauernde Schwierigkeit: Korrosion von Metall tritt in unterschiedlichen Formen auf. Dazu zählt Bimetallkorrosion (auch als Kontaktkorrosion bekannt) Spalt-, Loch-, und Flächenkorrosion. Die genannten Korrosionserscheinungen können in Verbindung mit statisch mechanischen Einwirkungen zu Spannungsrisskorrosion und mit dynamisch mechanischen Lasten zu Schwingrisskorrosion führen. Eine sehr untergeordnete Rolle spielt die Biokorrosion, die aber der Vollständigkeit wegen zu beachten ist. Wirksame Maßnahmen zur Verhinderung von Korrosion sind Überzüge und Beschichtungssysteme. Im Fall von Beschädigungen der Überzüge oder Abplatzungen der Beschichtungen können sich mit der Zeit Korrosionsschäden aus den Fehlstellen entwickeln. Eine nicht weniger problematische Gegebenheit im Stahlbrückenbau ist das Thema Ermüdung. Vor allem Verbindungsstellen und Fügstellen lösen durch das Auftreten von Spannungsspitzen Gefahrstellen für Ermüdung aus. Des Weiteren können Schäden durch übermä-

ßige Verformungen oder Krieeffekte entstehen [HEMMERT-HALSWICK, 2004].

Der größte Anteil der deutschen Brücken ist in Stahl- und Spannbetonbauweise ausgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass Stahl- und Spannbeton eine Verbundbauweise ist, können nicht nur Schäden entsprechend der beiden Einzelwerkstoffe Stahl bzw. Spannstahl und Beton, sondern auch aufgrund der Verbundtragwirkung entstehen. Im Weiteren werden zuerst Schäden im Stahlbetonbrückenbau aufgeführt, die auch gleichermaßen auf den Spannbetonbrückenbau übertragen werden können. Anschließend werden Schäden, die speziell im Spannbetonbau zu finden sind erläutert.

Wie für alle Bauweisen ist auch im Stahlbetonbau Korrosion ein signifikanter Schädigungsmechanismus. Anders als andere Werkstoffe hat der Bewehrungsstahl im Beton einen natürlichen Korrosionsschutz. Der Beton bietet dem Bewehrungsstahl zum einen Schutz gegen die direkte Beaufschlagung von korrosionsfördernden Medien und zum anderen bildet sich durch das alkalische Milieu des Zementgels eine Passivschicht auf der Stahloberfläche. Damit nun Korrosion am Bewehrungsstahl entstehen kann, muss erstens die Betondeckung von entsprechenden Medien durchdrungen werden und zweitens deren Anwesenheit am Bewehrungsstahl die Alkalität des Betons herabsetzen, um die Depassivierung des Stahls einzuleiten. Solche Medien sind Chloride und Kohlendioxid. Diese können entweder durch chemische Reaktionen, übermäßige Rissbildung oder Betonabplatzungen an die Bewehrung herantreten. Häufige Frost-Tau-Wechsel unterstützen die Gefahr von Abplatzungen und die Zerstörung des Betongefüges, sodass die Porengröße vergrößert wird. Vor allem der Einsatz von Streusalz ist in diesem Zusammenhang von großer Bedeutung.

Bei dynamischer Belastung mit hohen Schwingbreiten sind sowohl Bewehrung als auch Beton ermüdungsgefährdet. Eine weitere Schädigung von Beton ist die Alkali-Kieselsäure-Reaktion, welche zu netzartigen Rissen und Gefügezerstörungen führt, die letztendlich zu Minderung der Tragfähigkeit führt. Im Weiteren können zu große Verformungen durch übermäßige Rissbildung und mechanischer Abrieb genannt werden [BERGMEISTER, K.; ULRICH, S., 2004], [KÜCHLER, M., 2013].

Im Spannbetonbrückenbau muss zusätzlich mit anderen Schädigungen gerechnet werden. Ähnlich wie bei Schrägseil- und Hängebrücken kann es zur

Ermüdung der Spannglieder, Spannungsriss- und Schwingrisskorrosion kommen. Darüber hinaus schlägt sich eine übermäßige Rissbildung stärker auf die Tragfähigkeit des Überbaus aus, als in der Stahlbetonbauweise. An den Umlenk- und Verankerungsstellen kann durch die hohe Querpressung der Spannglieder Reibkorrosion entstehen. Aber auch die metallischen Verankerungselemente sind korrosionsgefährdet. Dadurch kann es zu Drahtbrüchen oder sogar zum Ausfall ganzer Spannglieder kommen. Bilder 8 und 9 zeigen sehr anschaulich die Verteilung der maßgebenden Schäden an Spannbetonbrücken. Man erkennt deutlich, dass in den meisten Fällen Korrosionsschäden eintreten [BERGMEISTER, K.; ULRICH, S., 2004].

Die Umfangsentwicklungen dieser Schäden sind komplexe Prozesse, die diversen Einflüssen unterstehen und zeitlichen Schwankungen unterliegen. Einige der Mechanismen sind bis heute noch nicht gänzlich verstanden. Daher existieren für eine Viel-

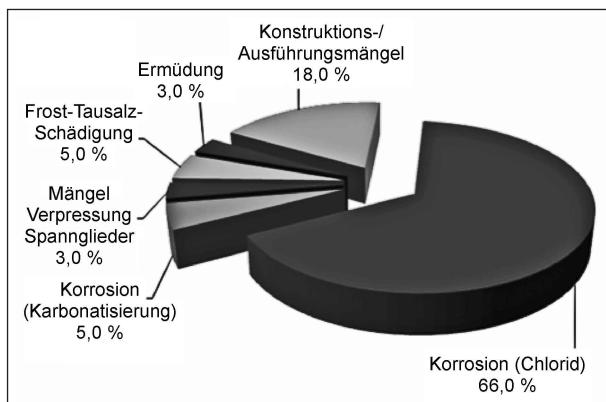
zahl der hier aufgeführten Schäden keine konkreten Modelle.

#### 4.1.2 Vorschäden älterer Brücken

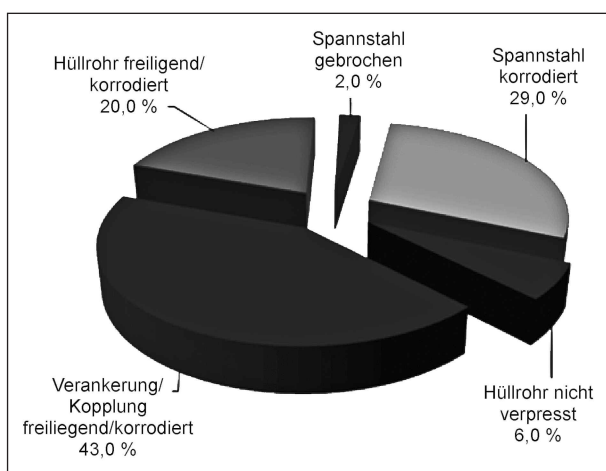
Die im vorherigen Kapitel genannten Schädigungen können allgemein für sämtliche Brücken der jeweiligen Baustoffarten genannt werden. Dennoch sind einige Schäden auf Grund von unterschiedlichen Ausgangsbedingungen an unterschiedlichen Brückenklassen mehr oder weniger oft vorzufinden, da jede Brücke ein Unikat darstellt und sich die Bemessungs- und Herstellungsmethoden mit der Zeit weiterentwickelten.

In Abhängigkeit vom Bauverfahren, der Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren (Einführung des Taktschiebeverfahrens), der Ausführungsqualität (Festlegung von Schalungsfristen und genaue Anordnung der Nachbehandlung) und dem Zeitpunkt der Bemessung können Randbedingungen oder sogar „Vorschädigungen“ geschaffen worden sein, die sich förderlich auf die einzelnen Schäden auswirken. Wie aus Kapitel 2 hervorgeht, stellen Brücken in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise die Mehrzahl am bundesweiten Bestand aller Brückenbauwerke. Daher wird thematisch nur auf diese Bauweise eingegangen.

Der Spannbeton ist eine noch sehr junge Bauweise, die sich im nachfolgenden Jahrzehnt nach dem 2. Weltkrieg entwickelt hat. Im Jahre 1935 wurde die erste Spannbetonbrücke in Deutschland errichtet. In den 60er und 70er Jahren wurde die Bauweise stetig weiterentwickelt und verbessert. Dennoch wurden gerade in den Anfangsjahren in der Bemessung Annahmen getroffen und in der Bauausführung Verfahren angewandt, die zwar dem damaligen Stand der Technik und damit auch entsprechenden Normen und Regelwerken entsprachen aber nach heutigen Erkenntnissen der Dauerhaftigkeit und Standsicherheit entgegenwirken. Gerade in der Frühphase wurden ungeeignete Baustoffe wie Tonerdschmelzzement als Verpressmaterial eingesetzt, der nur ein geringes gegen Korrosion schützendes alkalisches Milieu aufbauen konnte oder auch untaugliche Betonzusatzmittel, welche einen hohen Anteil an Alkalien aufweisen. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Verwendung von spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl zu nennen. Im Gegensatz zu dem kalt gezogenen Spannstahl ist der oft eingebaute, abgeschreckte und angelassene Spannstahl empfindlicher gegenüber Spannungsrisskorrosion.



**Bild 8:** Schadensursachen an Betonoberflächen der Brückenbauwerke im deutschen Autobahnnetz [SCHIEßL, P.; MAYER, T., 2007]



**Bild 9:** Verteilung der Schäden am Vorspannsystem [ZILCH, K.; MAURER, R.; WEIHER, H.; B ÄÄTJER, G., 2005]

Über die Jahrzehnte hinweg wurden die Bemessungsvorschriften an die Erkenntnisse aus der Praxis angepasst. Dadurch wurde die Art, Lage und Anordnung der Betonstahlbewehrung vor allem hinsichtlich der erforderlichen Betondeckung neu festgelegt. Auch die Ausbildung (zu geringer Bewehrungsgrad an schlaffer Bewehrung), Anordnung und Anzahl (Kopplungsgrad), sowie die Bemessung (z. B. Nichtberücksichtigung des Lastfalls  $\Delta T$ ) von Koppelfugen von Spanngliedern war auf Grund häufiger Schäden nicht mehr zeitgemäß. Weitere normative Änderungen waren die Einführung der Mindestlängsbewehrung und Mindestquerkraftbewehrung samt Konstruktionsregeln, das Verbot des Einbaus von Spanngliedern in die Stege von Hohlkastenquerschnitten, und Ergänzungen der Nachweisführung zur Rissbreitenbegrenzung; genauere Zusammenhänge werden auch in Kapitel 5.4.8, Tabelle 19 dargelegt.

Noch zu erwähnen sei an dieser Stelle, dass nicht nur Bemessungsfehler und Falschannahmen auf der Bauteilwiderstandsseite gemacht wurden. Parallel haben sich die Einwirkungen auf die Brücken stark verändert. Geringere Auswirkung hat bisher der erhöhte Ausstoß von  $\text{CO}_2$ -Emissionen; dagegen hinterlassen aber der Einsatz von Tausalz, dessen ungehemmtere Verwendung und die ständige Zunahme des Verkehrsaufkommens samt Zulassung längerer und belastbarer Nutzfahrzeuge zunehmend Folgen.

Von wesentlicher Bedeutung für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- bzw. Spannbetonbrücken ist die Ausführungsqualität. Mangelhaft verpresste Spannglieder, Kiesnester und Betonierfugen sind lokale Fehlstellen, die Korrosion begünstigen.

## 4.2 Schädigungsmodelle

Für eine Vielzahl der in Kapitel 4.1.1 angeführten Schädigungsmechanismen existieren Schädigungsmodelle. Da wie bereits beschrieben innerhalb dieses Projekts der Schwerpunkt auf Brücken in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise gelegt wird, werden einzig für den Stahlbeton- und Spannbetonbau ausgewählte Modelle beschrieben.

Generell kann man Schädigungsmodelle in vier Gruppen unterscheiden. Analytische Modelle basieren auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten (z. B. Schädigungsmechanik) und stellen den Anspruch mit höchster Genauigkeit Schädigungsprozesse zu

beschreiben. Der mathematische Aufwand zur Berechnung der Modelle kann enorm sein. Unter Umständen können geschlossene Lösungen gar nicht gefunden werden. Werden analytische Modelle einer Vereinfachung unterzogen, z. B. durch empirische Anpassung, gehen die Modelle in sogenannte Ingenieurmodelle über. Diese beschreiben der Anwendung entsprechend, einen Prozess „ausreichend genau“. Werden Modelle vollständig auf Grundlage von Empirie, Statistik und Stochastik aufgestellt, spricht man von sog. Probabilistischen Modellen. Diese Modelle bieten die Möglichkeiten streuende Größen und Unsicherheiten direkt in das Modell mit einzubeziehen. Eine weitere Modellgruppe stellen numerische Modelle dar. Sie sind im eigentlichen Sinne keine eigene Gruppe sondern bedienen sich lediglich der Numerik um analytische Modelle oder auch Ingenieurmodelle zu lösen. Die numerischen Modelle haben sich mit der rasanten Weiterentwicklung von Computern behauptet. Im Bauingenieurwesen ist vor allem die Methode der finiten Elemente stark vertreten.

Die Modellgruppen können nach ihrer Betrachtungsebene klassifiziert werden: Modelle, die Schädigungsmechanismen beschreiben, welche eine Größenordnung von Gelpartikeln untersuchen, können der Grundlagenforschung im Bereich der Materialtechnologie zugordnet werden. Hier wird die genaueste Beschreibung eines Prozesses untersucht und diese in analytische Modelle übertragen. Die Ebene wird Mikro-Ebene genannt. Eine Ebene oberhalb befindet sich die Meso-Ebene. Bezugsgröße ist eine Luftpore. Modelle auf Meso-Ebene sind auch Teil der Materialtechnologie. Da die Bezugsgröße unbestimmter ist als auf Mikro-Ebene, werden ungenauere Lösungen in Kauf genommen. Daher werden zwar analytische Modelle aufgestellt, aber mitunter können Ingenieurmodelle zufriedenstellende Ergebnisse bringen. Auf Makro-Ebene werden Modelle auf Bauteilebene beschrieben. Diesen werden ausschließlich Ingenieurmodelle zugeordnet. Für analytische Modelle ist die Bezugsgröße zu umfassend. Numerische Modelle bieten nun eine Möglichkeit analytische Modelle auf Makro-Ebene auch über die Einbeziehung probabilistischer Modelle anzuwenden. Dies ist aber auch unter Verwendung neuester, gängiger Computer nicht vollends möglich.

Für dieses Projekt werden Schädigungsmodelle, welche auf Makro-Ebene ohne Anwendung von FEM verwendet werden, können für Brücken in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise bevorzugt



und aufgelistet. Die Basis für das zu entwickelnde Verfahren soll dementsprechend auf Ingenieurmodellen und probabilistischen Modellen basieren.

### 4.3 Modelle auf Ebene des Einzelschadens

Zur Beschreibung der Entwicklung von Einzelschäden, die im Stahl- und Spannbetonbau auftreten, ist in der Literatur eine große Vielfalt an Modellen zu finden. In diesem Kapitel werden ausschließlich die Literaturstellen ausgewählter Modelle angeführt, die einen jeweiligen Schadensmechanismus, der Meinung des Autors nach, angemessen beschreiben. Dabei werden nur die im Rahmen dieses Projekts angewandten Modelle kurz beschrieben. Weitere Einzelheiten sind in der einschlägigen Literatur zu finden.

#### 4.3.1 Depassivierung des Betonstahls

Vor allem für die zeitliche Berechnung der Entwicklung der Depassivierung (Eindringung von Chloriden und Kohlenstoff in den Beton bzw. durch in das Bauteilinnere fortschreitenden Karbonatisierung) wurden über die Jahrzehnte hinweg viele Modelle entwickelt, die sich vor allem durch die Anzahl der zu berücksichtigenden Variablen unterscheiden.

#### 4.3.2 Depassivierung infolge Chlorideindringung

Das wohl derzeit am meisten Zuspruch findende Modell in Deutschland ist jenes nach [GEHLEN, C., 2000] Durch dieses Modell ist es möglich die zeitlich nicht konstante Einwirkung von Chloriden abzubilden.

$$C(x,t) = C_s \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff},c} \cdot t}} \right] \quad (1)$$

mit

$C(x,t)$  Chloridgehalt des Betons in der Tiefe  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  [M.-%/Zementgehalt]

$D_{\text{Eff},c}$  effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Zeitpunkt  $t$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$C_s$  Chloridkonzentration an der Betonoberfläche zum Zeitpunkt  $t$  [M.-%/Zementgehalt]

$x$  Tiefe [m]

$t$  Betonalter [s]

erf Fehlerfunktion

#### 4.3.3 Depassivierung infolge Karbonatisierung

Ein hinreichend genaues Modell für die Karbonatisierung wird in [GEHLEN, C., 2000] beschrieben, welches eine angemessene Berücksichtigung von chemischen und physikalischen Gesetzmäßigkeiten berücksichtigt. Grundsätzlich beschreibt es die Eindringtiefe der Karbonatisierungsfrente  $x_c$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$ :

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta C_s}{R_{\text{NAC},0}} \cdot \sqrt{t}} \quad (2)$$

mit

$x_c(t)$  Karbonatisierungstiefe zum Zeitpunkt  $t$

$\Delta C_s$  Differenz aus der  $\text{CO}_2$ -Konzentration der (freien) Umgebungsluft und der  $\text{CO}_2$ -Konzentration an der Carbonatisierungsfrente [kg/ $\text{m}^3$ ]

$R_{\text{NAC},0}$  Effektiver Carbonatisierungswiderstand von trockenem Beton [(kg/ $\text{m}^3$ )/( $\text{m}^2/\text{s}$ )]

#### 4.3.4 Korrosion der Bewehrung

Um die Entwicklung der Korrosion der Bewehrung abzubilden, kann das einfache Modell von [SARJA, A.; VESKARI, E., 1996] verwendet werden. Das Schädigungs-Zeit-Gesetz gibt die Querschnittsminderung der Bewehrung durch Korrosion wieder. Dabei wird von einer Reduktion des Stahldurchmessers  $d_0$  in Abhängigkeit von der Abtragungsrate  $k_s$  und der Zeit  $t$  ausgegangen:

$$A_s(t) = 0,25 \cdot n \cdot \pi \cdot (d_0 - 2 \cdot k_s \cdot t) \quad (3)$$

mit

$A_s(t)$  Stahlquerschnittsfläche zum Zeitpunkt  $t$  [ $\text{mm}^2$ ]

$d_0$  initialer Stabdurchmesser [mm]

$k_s$  Abtragungsrate [mm/a]

$t$  Zeit [a]

Für weitere Berechnung kann nach [GONZALES, J. A. et al., 1995] die vorrangig in der Literatur angegebene Korrosionsrate  $i_{\text{corr}}$  [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ] in die Abtragungsrate  $k_s$  [mm/a] konvertiert werden:

$$k_s = 0,0116 \cdot i_{\text{corr}} \quad (4)$$

mit

$i_{\text{corr}}$  Korrosionsrate [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]

Eine Verfeinerung des Ansatzes einer konstanten Korrosionsrate ist in [VU, K. A. T; STEWART, M., 2000] beschrieben. Dabei wird berücksichtigt, dass die anwachsenden Korrosionsprodukte an der Stahloberfläche (Rostschicht) den Korrosionsverlauf abschwächen, da es das Metall von korrosionsfördernden Medien abschirmt. Hierfür kann die konstante Korrosionsrate zu einem exponentiellen Ansatz angenommen werden, der vor allem die Lochfraßkorrosion besser zu beschreiben vermag:

$$i_{\text{corr,LF}}(t_{\text{Dep.}}) = i_{\text{corr}} \cdot 0,85 \cdot (t_{\text{Dep.}})^{-0,29} \quad (5)$$

mit

$t_{\text{Dep.}}$  Zeit nach der Depassivierung [a]

$i_{\text{corr,LF}}(t_{\text{Dep.}})$  Korrosionsrate im Fall der Lochfraßkorrosion zu Beginn des Prozesses [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]

#### 4.3.5 Unberücksichtigte Modelle

Neben den Modellen der Depassivierung und der Bewehrungskorrosion existiert eine Vielzahl an Modellen für unterschiedliche Schädigungsprozesse. Da diese innerhalb dieses Projekts nicht verwendet werden, erfolgt an dieser Stelle nur eine Auflistung der Schädigungsarten, für die Modelle aufgestellt wurden mit entsprechenden Literaturhinweisen:

- Abplatzungen infolge Bewehrungskorrosion [MÜLLER, H. S.; BOHNER, E., 2012],
- Betonkorrosion infolge Sulfatangriff [FENCHEL, M.; MÜLLER, H. S., 2009],
- Rissfortpflanzung [PARIS, P.; ERDOGAN, F., 1963],
- Ermüdung von Beton, Beton-/Spannstahl  
Unterschiedliche Ansätze vorhanden:
  - Linearere Schadensakkumulation [MINER, M., 1945],
  - Nichtlineare Schadensakkumulation [PEERLINGS, R., 1999],
  - Probabilistisches Modell [PFISTER, T., 2008],
- Verbundermüdung infolge Korrosion der schlaffen Bewehrung [FISCHER, C., 2012],
- Tau-Frost-Wechsel [PETERSON, L., 2003],

- Alkali-Kiesel-Säure-Reaktion [RHEINHARDT, H. W.; MIELICH, O., 2012] (Ansatz für die Bruchmechanik),
- Kriechen und Schwinden [TROST, H., 1966], [MÜLLER, H. S.; KVITSEL, V., 2002].

#### 4.4 Modelle auf Ebene des Gesamttragwerks

Einige Verfahren beschreiben anstelle der Entwicklung des Einzelschadens die Entwicklung des Gesamttragwerks.

Hier sind vor allem die Arbeiten von Frangopol zu nennen, der sich primär mit Lebenszyklus-, Lebensdauer und Instandhaltungsprognosen mit Hilfe von Monitoring-Systemen befasst. Hierbei ist sein Bestreben Prognosen über die Zustandsentwicklung unter zu Hilfenahme von stochastischen Modellbildungen des Gesamttragwerks zu ermöglichen [FRANGOPOL, D.; NEVES, L. C., 2011].

Eine weitere sehr interessante Möglichkeit die zeitliche Schädigung eines Brückentragwerks zu beschreiben wird in [AHRENS, M.; STANGENBERG, F., 2009] beschrieben: Dort wird ein stochastisches finite-Elemente-Modell eines Gesamttragwerks mit örtlicher Variabilität erstellt, welche Unsicherheiten bezüglich Materialschäden, wie z. B.

- Betonkorrosion (Druck- und Zugfestigkeit),
- Betonstahlkorrosion (Querschnitt, zul. Stahlspannung),
- Abplatzungen (statische Nutzhöhe),
- Streuende Betoneigenschaften (E-Modul, Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, etc.),
- Unsicherheiten der Geometrie

berücksichtigt.

##### 4.4.1 S-Shape-Funktionen

Ein sehr anschauliches und eingängiges Verfahren ist die Verwendung von S-förmigen Kurven, sog. S-Shape-Funktionen. Diese Funktionen beschreiben den Zustandsverlauf von Brückenbauwerken über die Zeit. Die Basis für solche Funktionen sind statistische Erhebungen und die zahlenmäßige Beschreibung der möglichen Zustände. Ein Beispiel einer solchen S-Kurve ist in Bild 10 zu sehen. Das

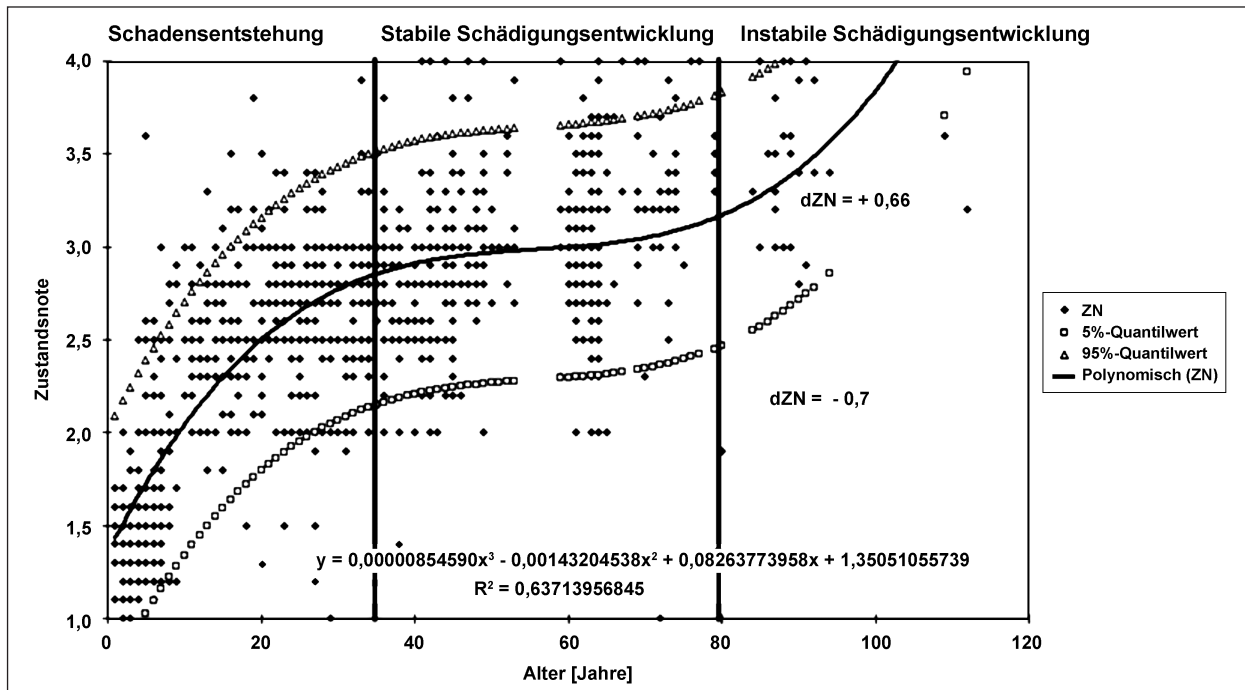


Bild 10: S-Shape-Funktion für die Entwicklung der Zustandsnote [HOLST, R., 2005]

Schaubild (Bild 10, wie aber auch Bild 17) basiert auf einer Auswertung von Herrn König, Landesamt für Bau und Verkehr in Thüringen und wurde in [HOLST, R., 2005] zitiert. Hier wurden die Zustandsnoten (siehe Kapitel 4) von Stahl- und Spannbetonbrücken über ihr Alter in einem Diagramm dargestellt und eine Regressionsfunktion für die Entwicklung der Zustandsnote in Abhängigkeit vom Bauwerksalter errechnet. Bei Verwendung eines Polynoms 3. Grades erhält die Regressionsfunktion eine S-Form. Der Kurvenverlauf zeigt einen in den Intervallen zwischen 0 bis 35 Jahren und 80 bis 110 Jahren wesentlich stärkeren Anstieg als im Intervall zwischen 35 und 80 Jahren. Der rasche Anstieg der Kurve im ersten Intervall kann mit Ausführungs- und Bemessungsfehlern erklärt werden. Diese Fehler machen sich vor allem in den ersten Jahren nach Freigabe der Brücke bemerkbar und induzieren Folgeschäden. Im Intervall zwischen 35 und 80 Jahren laufen stabile Schädigungsmechanismen im Bauwerk ab. Die Zustandsverschlechterung kann annähernd konstant angesehen werden. Ab einem Alter von über 80 Jahren ist der Umfang vieler Einzelschäden sehr weit fortgeschritten. Einige Schadensmechanismen beeinflussen sich gegenseitig, sodass Einzelschäden entweder in ihrem Schädigungsprozess beschleunigt werden oder sich zu komplexen Großschäden vereinen. Entsprechend Bild 10 ist die Zustandsnote 4,0 bzw. Bauwerksversagen spätestens mit einem Alter von ca. 110 Jahren erreicht.

#### 4.4.2 Markov-Ketten

Dieses Prognose-Verfahren basiert auf einer probabilistischen Berechnung des Zustands einer Brücke über die Zeit. Die Verwendung von Markov-Ketten für die Beschreibung des Verfalls ist auf [BOGDANOFF, J., 1978] zurückzuführen. Dabei wird die zeitliche Zustandsentwicklung anhand von diskreten Zuständen beschrieben. Das Modell besteht aus dem Zustandsraum, der Anfangsverteilung und der stochastischen Übergangsmatrix. Der Ansatz geht davon aus, dass sich ein Bauwerk zu jedem diskreten Zeitpunkt in genau einem Zustand befindet. Die Gesamtheit der Zustände, die das Bauwerk über die Zeit hinweg durchlaufen kann, ist der sog. Zustandsraum. Um den Übergang zwischen den Zuständen zu beschreiben, bedient man sich einer Verfallsmatrix, die den Schadensverlauf eines Schadensprozesses über eine Zeitspanne wiedergibt. Die Koeffizienten der Matrix stellen die prozentualen Anteile der Bauteile dar, die von einem Zustand in den nächsten übergehen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung, in welchem Zustand sich ein Brückentragwerk zum Zeitpunkt  $t = 0$  befindet wird als Anfangsverteilung  $\alpha_i$  bezeichnet. Mathematisch ist sie ein Vektor, der für jeden Zustand im Zustandsraum eine Komponente enthält. Damit stellt sie den Ausgangspunkt für die Prognose der Zustandsentwicklung dar, auf dessen Grundlage die Zustandsentwicklung anhand der sog. Übergangswahrscheinlichkeiten  $p_{ij}$  aufgestellt wird.

Diese sind die Wahrscheinlichkeit  $p_{ij}$ , mit denen ein Bauwerk von einem Zustand  $i$  in einer diskreten Zeitspanne in einen anderen Zustand  $j$  übergeht. Stellt man die Übergangswahrscheinlichkeiten für einen speziellen Betrachtungszeitraum auf, ergibt sich ein Vektor  $a_{ij}$ , der die Komponenten (Wahrscheinlichkeiten) für alle Zustände beinhaltet. Die folgenden mathematische Formulierungen beruhen auf den Arbeiten von [BERGMEISTER, SANTA, 2004] und [SETUNGE, S., 2011].

$$a_{ij} = |p_{1/i} \quad p_{2/i} \quad \dots \quad p_{j-1/i} \quad \dots \quad p_{j/i}| \quad (6)$$

Sind sämtliche Wahrscheinlichkeiten der Übergänge von allen Zuständen in alle anderen bekannt, können die Übergangsvektoren der einzelnen Zustände in der Übergangsmatrix  $A_{ij}$  vereint werden.

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} p_{1/1} & p_{1/2} & \dots & \dots & p_{1/j} \\ p_{2/1} & p_{2/2} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{j-1/1} & \dots & \dots & \dots & p_{j-1/j} \\ p_{j/1} & \dots & \dots & \dots & p_{j/j} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Zu unterscheiden ist in diesem Zusammenhang zwischen den Übergangswahrscheinlichkeiten  $\alpha_{ij}$  von beliebigen Zeiträumen und der Anfangsverteilung, die beschreibt, in welchem Zustand sich das Bauwerk zum Zeitpunkt  $t = 0$  befindet.

$$\alpha_i = |\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_j| \quad (8)$$

Beschreibt eine Markov-Kette einen Vorgang, in welchem ein Element, welches einen Zustand, den es bereits durchlaufen hat, nicht wieder annehmen kann, ist die Markov-Kette transient. Sinngemäß spricht man von transienten Übergangswahrscheinlichkeiten. Mathematisch bedeutet dies:

$$p_{i-1/i} = 0 \quad \text{bzw.} \quad p_{j-1/j} = 0$$

Speziell für die Zustandsbewertung bzw. der Prognose der Zustandsentwicklung von Brücken bedeutet die Verwendung von transienten Markov-Ketten, dass Instandsetzungsmaßnahmen nicht berücksichtigt bzw. modelliert werden.

Generell wird zwischen Markov-Ketten und Markov-Prozess unterschieden. Markov-Ketten sind zeitinvariante Prozesse, wodurch dem Prognose-Verfahren stets dieselbe Übergangsmatrix unterstellt wird. Ein Markov-Prozess ist zeitvariant, d. h. dass die Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix und

deren Komponenten zeitlichen Veränderungen unterliegen.

Im Falle einer Markov-Kette kann durch die Multiplikation der Übergangswahrscheinlichkeiten der Zustände mit dem Ausgangszustand eine Prognose über die Zustandsentwicklung gegeben werden.

Der Zustand  $Z$  ( $Z \in i, \dots, j$ ) zum Zeitpunkt  $t$  ergibt sich somit für das Beispiel eines Zustandsraums mit 4 Zuständen:

$$\begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{pmatrix}_t = \left( \begin{pmatrix} p_{1/1} & p_{1/2} & p_{1/3} & p_{1/4} \\ & p_{2/2} & p_{2/3} & p_{2/4} \\ & & p_{3/3} & p_{3/4} \\ & & & p_{4/4} \end{pmatrix} \right)^t \times \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{pmatrix}_{t=0} \quad (9)$$

Weitere mathematische Zusammenhänge hierzu können der einschlägigen Literatur entnommen werden.

## 4.5 Beurteilung der Modelle

Modelle auf Ebene des Einzelschadens ermöglichen die Beschreibung der Umfangsentwicklung konkreter Einzelschäden.

Modelle auf Ebene des Gesamttragwerks erlauben es, den Zustand des Gesamttragwerks vorherzubestimmen. Der Prognose kann dabei meist nicht der Einfluss eines Einzelschadens am Zustand des Gesamttragwerks entnommen werden. Von Vorteil gerade bei der Verwendung der S-Shape-Funktionen, ist die Schlichtheit des Verfahrens, die aber der Aussagequalität und -genauigkeit nachsteht.

Die Verwendung von Markov-Ketten und Markov-Prozessen für die Vorhersage der Zustandsentwicklung wird in vielen Veröffentlichungen favorisiert, wie in [CESARE, M., et al., 1992] und [MASOVIĆ, S.; HAJDIN, R., 2013]. In diesem Zusammenhang wird der Einsatz von Markov-Ketten bevorzugt. Darüber hinaus werden Markov-Ketten bereits in aktiven Brücken-Management-Systemen wie PONTIS und BRIDGIT eingesetzt; siehe [HAARDT, 1998]. Von Nachteil ist der hohe Arbeitsaufwand zur Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeiten. Diese können zum einen anhand von Auswertungen von Realdaten und zum anderen durch die Verwendung von Schädigungsmodellen durch die Festlegung von Grenzschädigungen und deren Zuordnung im Zustandsraum bestimmt werden.

## 5 Entwicklung einer Konzeption zur Prognose der Schadensumfangsentwicklung

### 5.1 Vorüberlegungen

Grundidee ist es, die statische Bewertung um die dynamischen Schädigungsmodelle zu erweitern. Dafür ist es notwendig, die Änderung der Daten (Einzelschäden) aus den Bauwerksprüfungen, die dem Algorithmus zur Berechnung der Zustandsbewertung zugrunde gelegt werden, mit den Modellen der Schadensumfangsentwicklung für künftige Zeitpunkte vorher zu bestimmen. Zufriedenstellend kann eine Prognose nur mit fundiertem Wissen über die Randbedingungen, unter denen die Schadensumfangsentwicklungen stattfinden, gegeben werden. Dafür wird auf das Datenbank-System SIB-Bauwerke zurückgegriffen. Für die Prognose der Zustandsentwicklung stehen, wie in Kapitel 4 aufgeführt ist, viele unterschiedliche Modelle und Verfahren zur Verfügung.

Im Rahmen dieses Projekts wird auf ein Prognose-Verfahren mit S-Shape-Funktionen in Verbindung mit Ingenieurmodellen für die Modellierung der Schädigungsprozesse nach Bild 11 und Markov-Ketten vertraut. Der Zusammenhang von S-Shape-Funktionen und Markov-Ketten bzw. der Übergangswahrscheinlichkeiten wird in Bild 11 anschaulich dargestellt: Hierfür wurde ein fiktives Beispiel in Anlehnung an die Arbeiten in [SETUNGE; S., 2011] ausgearbeitet. Das linke Diagramm zeigt den Verlauf der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Zustände 1 bis 4 für ein Brückenbauwerk für einen Betrachtungszeitpunkt  $t = 0$  unter der Voraussetzung eines

begrenzten Zustandsraums, der aus vier Zuständen besteht. Sieht man die Zustände 1 bis 4 als Zustandsnoten in Form von Dezimalzahlen an und berechnet sich dadurch die Zustandsnote zu diskreten Zeitpunkten (siehe Bild 11 für das Beispiel  $t = 30$  Jahre), ergibt sich eine S-Shape-Funktion. Der Zusammenhang beider Verfahren wird offensichtlich: Die Übergangswahrscheinlichkeiten können als Entflechtung der S-Shape-Funktion in ihre einzelnen Zustände, die sie durchläuft, angesehen werden. Die Übergangswahrscheinlichkeiten konkretisieren sozusagen die Aussage der S-Shape-Funktion.

In [SETUNGE, S., 2011] wurden die Wahrscheinlichkeitsverläufe durch die Verwendung einer homogenen Markov-Kette mit Übergangswahrscheinlichkeiten berechnet, die aus der Auswertung von vorgefertigten Spannbetonplatten australischer Brückenbauwerke hervorgingen. Dort war vor allem für Zustand 2 ein anderer Verlauf berechnet worden. Durch Nachrechnung der homogenen Markov-Ketten nach den in [SETUNGE, S., 2011] veröffentlichten Ergebnisse wird ersichtlich, dass sich die Verläufe wie in Bild 11 nicht mit homogenen sondern nur mit inhomogenen (vom Bauwerksalter  $t$  abhängigen) Übergangswahrscheinlichkeiten ergeben. Durch diesen Unterschied ergibt sich in [SETUNGE, S., 2011] ein logarithmischer anstatt S-förmiger Verlauf der Zustandsnote.

Vereinfachend wird auf die Umrechnung der fiktiven Wahrscheinlichkeiten nach Bild 11 in einen Markov-Prozess an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Dies wäre der nächste Schritt in zusätzlichen Untersuchungen.

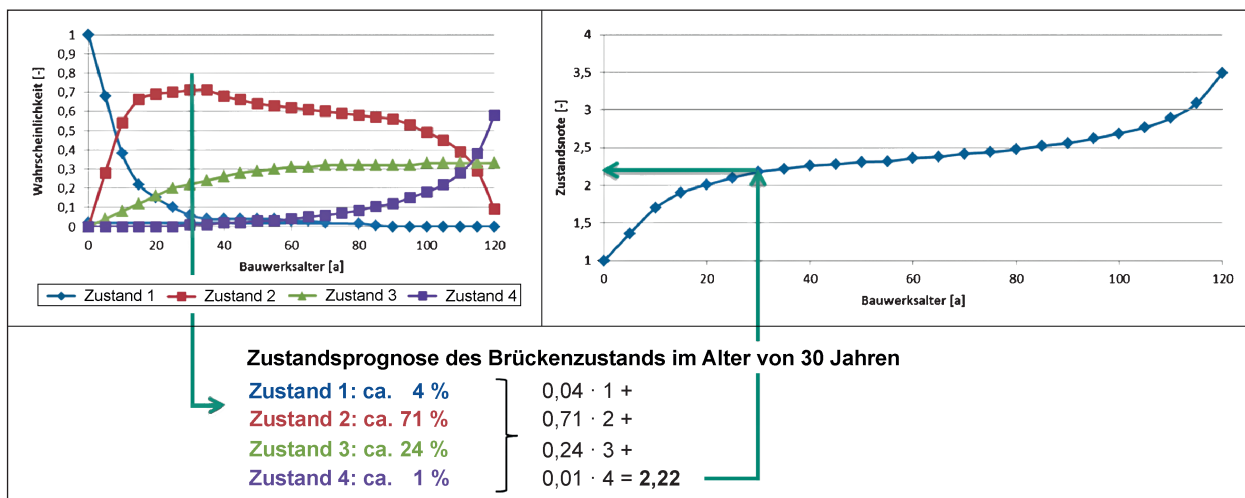


Bild 11: Korrelation der Übergangswahrscheinlichkeiten mit S-Shape-Funktionen

## 5.2 Auswertung der Daten von SIB-Bauwerke NRW

Für die Erarbeitung des Prognoseverfahrens auf Grundlage der Übergangswahrscheinlichkeiten nach Markov und der S-Shape-Funktionen wurden 1.741 Datensätze von Stahl- und Spannbetonbrücken aus SIB-Bauwerke von Nordrhein-Westfalen zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um

| Überbautyp        | Anzahl |
|-------------------|--------|
| Spannbeton        | 866    |
| Stahlbeton        | 861    |
| Unbewehrter Beton | 14     |

Tab. 2: Aufteilung nach Überbautyp

| Max. Stützweiten [m]            | Anzahl |
|---------------------------------|--------|
| $l_0 \leq 10$ m                 | 674    |
| $10 \text{ m} < l_0 \leq 30$ m  | 903    |
| $30 \text{ m} < l_0 \leq 50$ m  | 148    |
| $50 \text{ m} < l_0 \leq 100$ m | 16     |

Tab. 3: Aufteilung nach maximaler Stützweite

| Baujahr   | Anzahl | „frei gealtert“ SKZ Gesamtbauwerk | Instandsetzung 2000-2013 |
|-----------|--------|-----------------------------------|--------------------------|
| < 1900    | 12     | 2                                 | 10                       |
| 1900-1909 | 1      | -                                 | 1                        |
| 1920-1929 | 1      | -                                 | 1                        |
| 1930-1934 | 5      | -                                 | 5                        |
| 1935-1939 | 22     | 10                                | 12                       |
| 1940-1944 | 3      | -                                 | 3                        |
| 1945-1949 | 5      | 3                                 | 2                        |
| 1950-1954 | 27     | 7                                 | 20                       |
| 1955-1959 | 76     | 7                                 | 69                       |
| 1960-1964 | 96     | 20                                | 76                       |
| 1965-1969 | 297    | 75                                | 222                      |
| 1970-1974 | 288    | 45                                | 243                      |
| 1975-1979 | 233    | 37                                | 196                      |
| 1980-1984 | 176    | 39                                | 137                      |
| 1985-1989 | 215    | 76                                | 139                      |
| 1990-1994 | 178    | 63                                | 115                      |
| 1995-1999 | 69     | 15                                | 54                       |
| 2000-2013 | 37     | 11                                | 26                       |

Tab. 4: Aufteilung nach Baujahr

die Substanzkennzahlen der Jahre 2000, 2007 und 2013. Die Verteilung der Brückenbauwerke auf die maximale Stützweite, Brückenlänge, Bauverfahren, Baujahr, Brückentyp und Herstellungsverfahren sind in den Tabellen 2 bis 6 zusammengestellt. In Tabelle 2 bis 6 sind zudem alle „frei gealterten“ Brücken nach ihrem Baujahr und in Ergänzung die Brücken, die in dem Betrachtungszeitraum Instandgesetzt wurden (oder keine vollständigen SKZs aller Zeitpunkte vorliegen). Die Eigenschaft „frei gealtert“ bedeutet, dass diese Brücken in den Jahren 2000 bis 2013 keine Verbesserung der Substanzkennzahl des Gesamtbauwerks aufweisen.

Eine wesentlich geringere Grundgesamtheit verbleibt, wenn die Datensätze zusätzlich nach einer „freien Alterung“ in den Bauteilgruppen

- Überbau,
- Unterbau,
- Gründung,

| Brückenlänge [m]               | Anzahl |
|--------------------------------|--------|
| $l \leq 30$ m                  | 917    |
| $30 \text{ m} < l \leq 50$ m   | 396    |
| $50 \text{ m} < l \leq 100$ m  | 346    |
| $100 \text{ m} < l \leq 500$ m | 77     |
| $l < 500$ m                    | 5      |

Tab. 5: Aufteilung nach Brückenlänge

| Brückentyp    | Anzahl |
|---------------|--------|
| Balkenbrücke  | 823    |
| Plattenbrücke | 524    |
| Rahmenbrücke  | 309    |
| Bogenbrücke   | 70     |
| sonstige      | 15     |

Tab. 6: Aufteilung nach Brückentyp

| Herstellungsverfahren | Anzahl |
|-----------------------|--------|
| Hilfsgerüst           | 1.271  |
| Fertigteilmontage     | 4      |
| Längsverschub         | 11     |
| Hilfsstütze           | 6      |
| Freivorbau            | 11     |
| Sonstige/ohne Angabe  | 438    |

Tab. 7: Aufteilung nach Herstellungsverfahren

- Lager,
- Kappen,
- Fahrbahnübergangskonstruktion,
- Abdichtung,
- Beläge,
- Schutzeinrichtung

gefiltert werden. Hiernach ergibt sich eine Anzahl von 39 Brücken.

Begrenzt man die Filterung lediglich auf die Bauteilgruppen

- Überbau,
- Unterbau,
- Gründung,
- Lager,
- Kappen,

d. h., die Verschleißteile bleiben unberücksichtigt, erhält man eine Anzahl von 64 Brückentragwerken.

### 5.3 Auswertung der Daten von SIB-Bauwerke NRW und TH

Im Folgenden wird als weiterer Datensatz ein Auszug des SIB-Bauwerke-Bestands aus Nordrhein-Westfalen und Thüringen hinzugezogen. Die Daten liegen nur als Gesamtpaket vor und geben einen Überblick über die Zustandsbewertung in den Jahren 2000, 2007 und 2013. Die Verteilung entsprechend Kapitel 5.2 ist in den Tabellen 8 bis 13 zu finden.

| Überbautyp        | Anzahl |
|-------------------|--------|
| Spannbeton        | 942    |
| Stahlbeton        | 1.065  |
| Unbewehrter Beton | 29     |

Tab. 8: Aufteilung nach Überbautyp

| Max. Stützweiten [m]      | Anzahl |
|---------------------------|--------|
| $l_0 \leq 10$ m           | 845    |
| $10$ m < $l_0 \leq 30$ m  | 1.012  |
| $30$ m < $l_0 \leq 50$ m  | 158    |
| $50$ m < $l_0 \leq 100$ m | 21     |

Tab. 9 Aufteilung nach maximaler Stützweite

| Baujahr   | Anzahl | „frei gealtert“ SKZ Gesamtbauwerk | Instandsetzung 2000-2013 |
|-----------|--------|-----------------------------------|--------------------------|
| < 1900    | 12     | 2                                 | 10                       |
| 1900-1919 | 2      | 0                                 | 2                        |
| 1920-1929 | 5      | 0                                 | 5                        |
| 1930-1934 | 6      | 0                                 | 6                        |
| 1935-1939 | 44     | 13                                | 31                       |
| 1940-1944 | 12     | 0                                 | 12                       |
| 1945-1949 | 5      | 3                                 | 2                        |
| 1950-1954 | 31     | 10                                | 21                       |
| 1955-1959 | 82     | 9                                 | 73                       |
| 1960-1964 | 105    | 21                                | 84                       |
| 1965-1969 | 312    | 79                                | 233                      |
| 1970-1974 | 311    | 52                                | 259                      |
| 1975-1979 | 241    | 38                                | 203                      |
| 1980-1984 | 187    | 40                                | 147                      |
| 1985-1989 | 219    | 82                                | 137                      |
| 1990-1994 | 202    | 77                                | 125                      |
| 1995-1999 | 163    | 32                                | 131                      |
| 2000-2013 | 97     | 29                                | 68                       |

Tab. 10: Aufteilung nach Baujahr

| Brückenlänge [m]         | Anzahl |
|--------------------------|--------|
| $l \leq 30$ m            | 1.166  |
| $30$ m < $l \leq 50$ m   | 422    |
| $50$ m < $l \leq 100$ m  | 361    |
| $100$ m < $l \leq 500$ m | 79     |
| $l < 500$ m              | 8      |

Tab. 11: Aufteilung nach Brückenlänge

| Brückentyp    | Anzahl |
|---------------|--------|
| Balkenbrücke  | 876    |
| Plattenbrücke | 655    |
| Rahmenbrücke  | 392    |
| Bogenbrücke   | 98     |
| sonstige      | 15     |

Tab. 12: Aufteilung nach Brückentyp

| Herstellungsverfahren | Anzahl |
|-----------------------|--------|
| Hilfsgerüst           | 1.463  |
| Fertigteilmontage     | 12     |
| Längsvershub          | 12     |
| Hilfsstütze           | 12     |
| Freivorbau            | 13     |
| Sonstige/ohne Angabe  | 524    |

Tab. 13: Aufteilung nach Herstellungsverfahren

## 5.4 Untersuchung der S-Shape-Funktionen

### 5.4.1 Vorüberlegung

Bisher ist die Existenz der S-Shape-Funktion anhand einzelner Literaturstellen auf Grundlage von Stichproben oder theoretischer Überlegungen belegt worden. Die Frage ist daher, inwieweit ein bestimmter Kurvenverlauf auf die Schadensumfangsentwicklung von Brücken übertragen werden kann. Der Verlauf der S-Kurve aus Stichproben ist maßgeblich von seiner Grundgesamtheit abhängig. Eine anhand von konkreten Daten aufgestellte S-Shape-Funktion kann daher auf eine andere Population nicht ohne weiteres übertragen werden. In diesem Kapitel werden die S-Shape-Funktionen hinsichtlich ihres Verlaufs untersucht und zeitgleich auf ihre Anwendbarkeit bezüglich der Schadensumfangsentwicklung verifiziert. Als Grundlage werden der Schädigungsmechanismus der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion, welche nach [ZILCH, K.; MAURER, R.; WEIHER, H.; BÄTTJER, G., 2005] (s. auch Bild 6) maßgebender Degradationsprozess des Brückenüberbaus ist, und die Methodik der Zustandsbewertung der SIB-Bauwerke (Schadenbeispielkatalog nach [RI-EBW-PRÜF]) herangezogen.

### 5.4.2 Berechnung der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion

Für die Berechnung der chloridinduzierten Korrosion der Tragbewehrung in Stahlbetonbrücken wird das Schädigungs-Zeit-Gesetz entsprechend dem Kapitel 3.2 verwandt. Für die Bestimmung der Chlorideindringung in den Beton müssen vorab Annahmen bezüglich der Chloridkonzentration auf der Betonoberfläche  $C_s$ , des Diffusionskoeffizienten  $C_{eff}$  und der vorhandenen Betondeckung  $c_{nom}$  getroffen werden, welche insbesondere vom Wasser-Zement-Wert  $w/z$  des verwandten Betons und der Betondeckung der Tragbewehrung  $c_{nom}$  abhängen. Letztere werden entsprechend des DIN FB 102 und DIN 1992-1-2 mit einem Wertebereich von  $w/z = 0,4$  bis  $0,7$  und  $c_{nom} = 4$  bis  $6$  cm angenommen. Der Diffusionskoeffizient und die Chloridkonzentration auf der Betonoberfläche werden nach [VU, K. A. T.; STEWART, M., 2000] bestimmt; siehe Bilder 12 und 13.

Im Anschluss an die Depassivierung setzt die Korrosion der Bewehrung einschließlich Querschnittsminderung ein. Das Schädigungs-Zeit-Gesetz nach Kapitel 3.2 beschreibt dies ausreichend genau. Daher wird für die Berechnung des Korrosionsverlaufs auf

dieses Modell zurückgegriffen. Für die Berechnung der Querschnittsminderung werden weitere Parameter und deren Wertebereiche benötigt. Vereinfachend wird für den Ausgangsquerschnitt der Tragbewehrung ein konstanter Durchmesser angenommen; die Korrosionsrate  $i_{corr}$  wird entsprechend [VU, K. A. T.; STEWART, M., 2000] dem Prozess unterstellt (s. Bild 14).

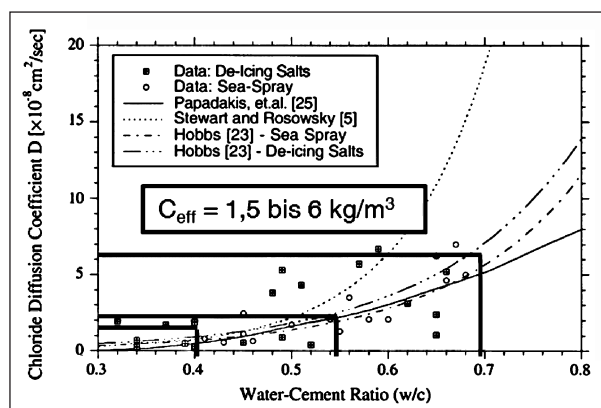


Bild 12: Einfluss des  $w/z$ -Wertes auf den Diffusionskoeffizient  $C_{eff}$  [VU, K. A. T.; STEWART, M., 2000]

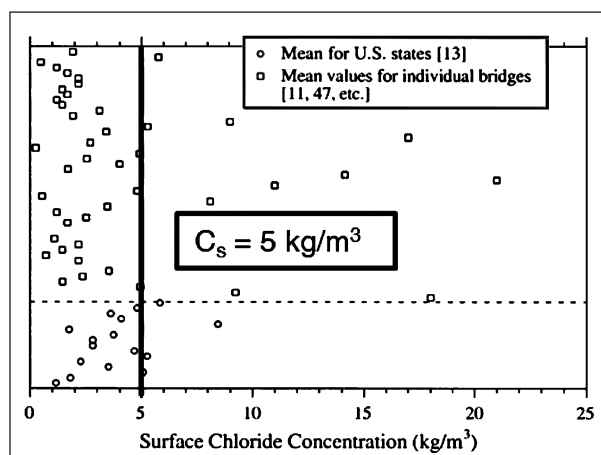


Bild 13: Chloridkonzentration auf der Oberfläche  $C_s$  für Tausalz ausgesetzte Betone [VU, K. A. T.; STEWART, M., 2000]

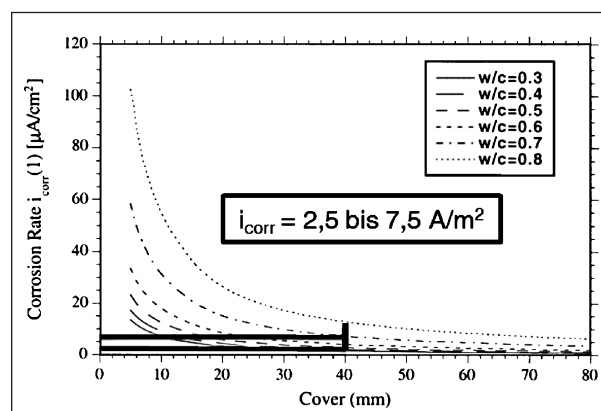


Bild 14: Einfluss des  $w/z$ -Wertes und der Betondeckung auf die Korrosionsrate  $i_{corr}$  [VU, K.; STEWART, M., 2000]



### 5.4.3 Umrechnung der Schädigungsprozesse in Substanzkennzahlen

Die Umrechnung der Schadensverläufe für unterschiedliche Parameterkombinationen erfolgt durch die Festlegung von Grenzschädigungen analog zum Schadensbeispielkatalog. Aus Tabelle 1 sind für die Grenzschädigungen der Chlorideindringtiefe  $x_t$  eindeutig folgende Tiefen festgelegt:

$$x_t = \{1/3 \cdot c_{\text{nom}}; 2/3 \cdot c_{\text{nom}}; c_{\text{nom}}\}.$$

Für die Festlegung der Grenzschädigungen für eine Querschnittsminderung infolge Korrosion mussten dagegen Annahmen getroffen werden, um die verbalen Grenzschädigungen der Schadensbeispiele (siehe Tabelle 14) in konkrete Zahlen zu überführen. Die Grenzschädigungen wurden in Abhängigkeit vom prozentualen Querschnittsverlust infolge Korrosion definiert und in Tabelle 15 eingearbeitet.

### 5.4.4 Parameterstudie zur chloridinduzierten Bewehrungskorrosion

Auf Grundlage der bisher beschriebenen Methodik wird eine Parameterstudie für den fiktiven Zustandsverlauf von Brücken mit den variablen Parametern des Diffusionskoeffizienten, der Betondeckung und der Korrosionsrate durchgeführt. Hierbei wird die Chloridkonzentration und der Ausgangsquerschnitt der Tragbewehrung vorerst vereinfachend als konstant angesehen. Der Wertebereich der Ausgangsparameter ist in Tabelle 16 hinterlegt.

### 5.4.5 Ergebnisse der einfachen Parameterstudie

Nach Generierung eines ungewichteten Datenfelds von ca. 250 Daten, ist durch die grafische Darstellung der zeitabhängigen Substanzkennzahlen und Berechnung der Regressionsfunktion die S-Shape-Funktion in Bild 15 ersichtlich. Bild 16 zeigt dagegen die S-Shape-Funktion nach einer Verfeinerung der Parameterstudie, siehe hierzu Kapitel 5.4.6 und 5.4.7. Dort werden die verschiedenen Verläufe diskutiert.

Der aus der Literatur empfohlene S-förmige Verlauf der Zustandskurve wird somit für die Schadensumfangsentwicklung von Brücken bestätigt. Der nächste Schritt ist nun, die Berechnung des hypothetischen Verlaufs der S-Shape-Funktion durchzuführen.

| Schadensbeschreibung   | S | D | SKZ |
|--|---|---|-----|
| Freiliegende Tragbewehrung mit korrodierter Bewehrung (keine nennenswerte Querschnittsminderung) | 1 | 2 | 2,2 |
| Tragbewehrung liegt im karbonisierten Bereich und ist korrodiert                                 | 1 | 3 | 2,7 |
| Freiliegende Tragbewehrung mit korrodierter Bewehrung (einsetzende Querschnittsminderung)        | 2 | 3 | 2,8 |
| Stark korrodierte Tragbewehrung (fortgeschrittene Querschnittsminderung)                         | 3 | 3 | 3,3 |
| Stark korrodierte Tragbewehrung (teilweiser Ausfall von Tragbewehrung)                           | 4 | 4 | 4,0 |

Tab. 14: Auszug aus dem Schadensbeispielkatalog, Korrosion der Tragbewehrung

| Schadensbeschreibung   | Querschnittsverlust infolge Korrosion [%] |
|--|---|
| Freiliegende Tragbewehrung mit korrodierter Bewehrung (keine nennenswerte Querschnittsminderung) | Bis 1                                     |
| Tragbewehrung liegt im karbonisierten Bereich und ist korrodiert                                 | 0 bis 1                                   |
| Freiliegende Tragbewehrung mit korrodierter Bewehrung (einsetzende Querschnittsminderung)        | 1 bis 2                                   |
| Stark korrodierte Tragbewehrung (fortgeschrittene Querschnittsminderung)                         | 5   |
| Stark korrodierte Tragbewehrung (teilweise Ausfall von Tragbewehrung)                            | 15  |

Tab. 15: Zuordnung der Grenzschädigung zu den Schadensbeispielen für Korrosion der Tragbewehrung

| Parameter                                     | Wertebereich                           |
|---|--|
| Diffusionskoeffizient $C_{\text{eff}}$        | 1,4; 2,0; 2,5; 3,5; 6,0 [10E-8 kg/sec] |
| Betondeckung $c_{\text{nom}}$                 | 4; 5; 6 [cm]                           |
| Korrosionsrate $i_{\text{corr}}$              | 2,5; 3,5; 5,0; 7,5 [A/m <sup>3</sup> ] |
| Chloridkonzentration auf der Oberfläche $C_s$ | 5 kg/m <sup>3</sup> (const.)           |
| Querschnitt der Tragbewehrung $\varnothing_s$ | 25 mm (const.)                         |

Tab. 16: Wertebereich der Parameter zur Berechnung des S-Shape-Funktions-Verlaufs

ren. Dazu ist das Datenfeld zu vergrößern, der Wertebereich der Parameter anzupassen und eine Wichtung der Daten in Abhängigkeit von der Auftretenswahrscheinlichkeit durchzuführen.

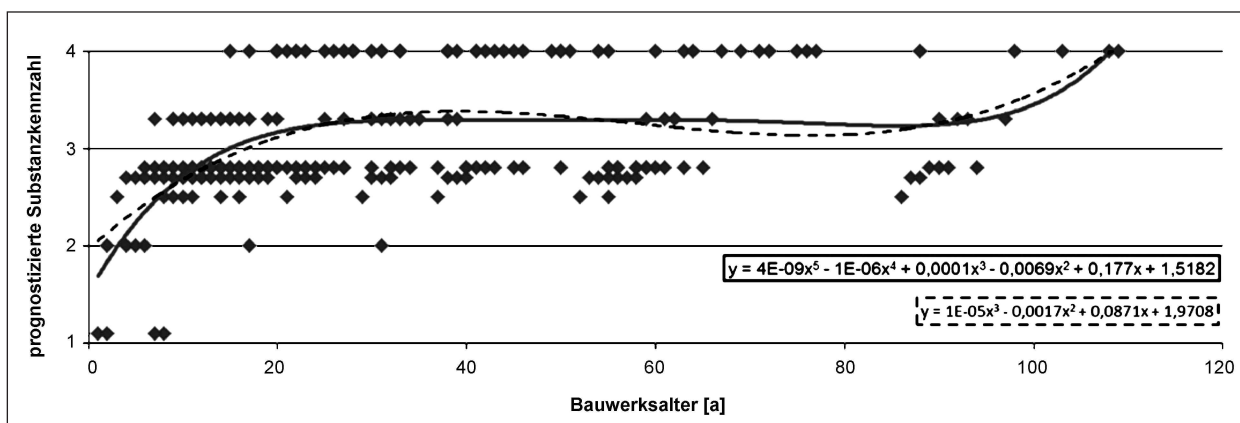


Bild 15: Verlauf der S-Shape-Funktion nach Durchführung der einfachen Parameterstudie

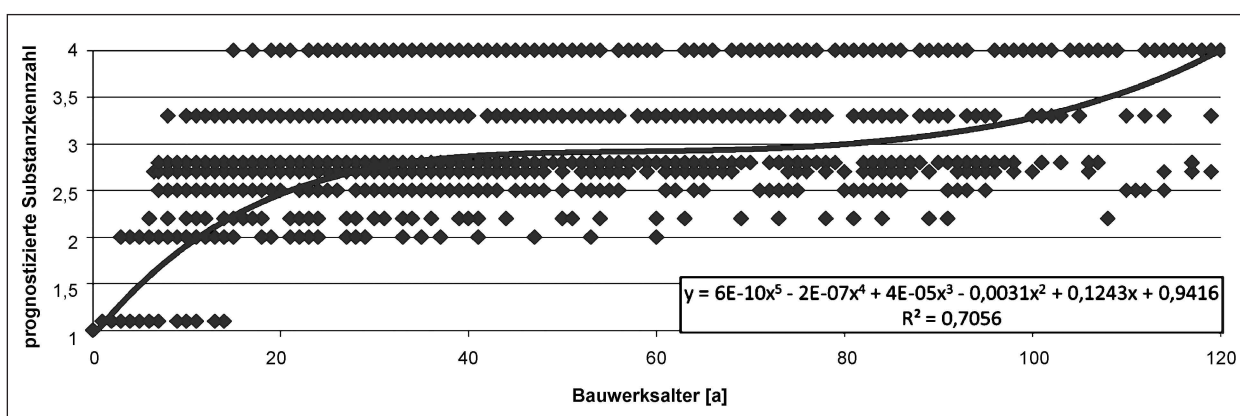


Bild 16: Verlauf der S-Shape-Funktion nach Durchführung der verfeinerten Parameterstudie

#### 5.4.6 Verfeinerung der Parameterstudie

Auf Grundlage der in Kapitel 5.4.6 beschriebenen Vorgehensweise wird die Parameterstudie in unterschiedlichen Gebieten ausgeweitet:

Zum einen werden die Wertebereiche der Eingangsparameter für die Chlorideindringung in den Beton und der anschließenden Bewehrungskorrosion erweitert, zum anderen wird entsprechend Bild 8 als weiterer Schädigungsmechanismus die Depassivierung infolge Karbonatisierung miteinbezogen, welche nach Gleichung (2) in Form eines Schädigungs-Zeit-Gesetztes angegeben werden kann. Im Weiteren wird für den Verlauf der Bewehrungskorrosion zwischen Lochfraßkorrosion infolge Chlorideindringung und Oberflächenkorrosion infolge fortschreitender Karbonatisierung unterschieden. In Untersuchungen in [KÖNKE, C., 1999] zeigt sich, dass die chloridinduzierte Lochfraßkorrosion wesentlich schneller voranschreitet als die karbonatisierungsbedingte Oberflächenkorrosion. Mathematisch wird dieser Beobachtung über den Faktor  $R_{\text{corr}}$  Rechnung getragen, welcher den Korrosionsabtrag nach Gleichung (4) genauer beschreibt:

$$k_s = 0,0116 \cdot i_{\text{corr}} \cdot R_{\text{corr}} \quad (10)$$

Dabei ist für karbonatisierungsinduzierter Flächenkorrosion  $R_{\text{corr}} \sim 1$  und für chloridinduzierter Lochfraßkorrosion zwischen 1 und 8 zu beziffern. Demnach kann die Lochfraßkorrosion bis zu 10-mal schneller verlaufen als die Flächenkorrosion. Weitere Untersuchungen in [VU, K. A. T.; STEWART, M., 2000] haben aber gezeigt, dass dieser Zusammenhang nur für eine Zeitspanne von einigen Jahren nach der Depassivierung gültig ist. Sobald sich eine gewisse Dicke an Rostschicht hinter der Korrosionsfront gebildet hat, erschwert diese den Ionen-Austausch zur Front. Infolge dessen wird vorgeschlagen einen exponentiellen Ansatz für die Lochfraßkorrosion anzusetzen, der den Zusammenhang besser beschreiben zu vermag. Aus diesem Grund wird für die Lochfraßkorrosion der Ansatz nach Gleichung (5) für die verfeinerte Parameterstudie herangezogen. Insgesamt wird bei den Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Parameter darauf geachtet, sinnvolle Kombinationen zusammenzustellen: Vereinfacht ausgedrückt wird z. B. darauf geachtet, dass bei höherem w/z-Wert

(größere Porosität des Zementsteins) auch größere Werte für den Diffusionskoeffizienten erreicht werden oder dass eine höhere Gefahr der Lochfraßkorrosion bei steigendem Chloridgehalt besteht. Die Wertebereiche der Parameter der verfeinerten Parameterstudie für den Mechanismus chloridinduzierte Korrosion sind in Tabelle 17 zusammengestellt.

Der Zusammenstellung ist hinzuzufügen, dass die Depassivierung infolge Karbonatisierung wesentlich langsamer verläuft, als die durch Chlorideindringung hervorgerufene. Für die Betondeckungen 4, 5 und 6 cm bedeutet dies, dass rechnerisch die karbonatisierungsbedingte Bewehrungskorrosion erst nach über 120 Jahren eintritt. Daher wird für die Parameterstudie für die Karbonatisierung des Betons der Wertebereich der Betondeckung abermals erweitert. Tabelle 18 gibt eine Übersicht über die berücksichtigten Wertebereiche des Karbonatisierungsverlaufs.

Abgesehen von diesen Neuerungen wurde eine Wichtung der einzelnen Eingangsparameter zu-

grunde gelegt, die eine Verteilung der Werte beschreibt. Diese wurde geschätzt. Die Wichtung in Form der prozentualen Verteilung der einzelnen Eingangswerte an der Gesamtanzahl an generierten Brücken ist in Tabelle 19 aufgelistet. Hierbei handelt es sich um die Wichtung für den Schädigungsmechanismus Chloridbeaufschlagung.

Die Eingangswerte für den Mechanismus der Karbonatisierung sind vereinfachend gleichverteilt.

Das Verhältnis der generierten Brücken mit dem jeweiligen Schädigungsmechanismus wird schließlich entsprechend Bild 8 gebildet. Betrachtet wird ein Lebensdauerbereich von 120 Jahren. Schädigungsmechanismen bzw. Parameterkombinationen, die eine höhere Lebensdauer errechnen, bleiben unberücksichtigt. Dies wird zum einen damit begründet, dass eine maximale Lebensdauer von 100 bis 120 Jahren als realistisch angesehen wird und zum anderen, dass innerhalb dieser Studie nur schädigungsrelevante Brücken untersucht werden, sodass langlebigere Brücken nicht von Interesse sind. Zudem wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass beide Schädigungs-Zeit-Gesetze für ungerissenen Beton gelten. Die Interaktion von (übermäßigen) Rissen und der Durchdringung des Betons mit passivierenden Medien bleibt unberücksichtigt.

| Parameter                                     | Wertebereich                         |
|---|--------------------------------------|
| Diffusionskoeffizient $C_{eff}$               | 1,0; 1,5; 2,0; 2,5<br>[10E-8 kg/sec] |
| Wasserzementwert $w/z$                        | 0,4; 0,5; 0,6 [-]                    |
| Zementarten                                   | CEMI, CEMII; CEM III                 |
| Betondeckung $c_{nom}$                        | 4; 5; 6 [cm]                         |
| Korrosionsrate $i_{corr}$                     | 0,1; 0,5; 1,0 [A/m <sup>2</sup> ]    |
| Querschnitt der Tragbewehrung $\varnothing_s$ | 16; 25 [mm]                          |
| Korrosionsfaktor $R_{corr}$                   | 1; 4; 8 [-]                          |

Tab. 17: Wertebereich der Parameter zur Berechnung des S-Shape-Funktions-Verlaufs für die Chlorideindringung

| Parameter                                     | Wertebereich                      |
|---|-----------------------------------|
| Wasserzementwert $w/z$                        | 0,4; 0,5; 0,6 [-]                 |
| Zementarten                                   | CEMI, CEMII; CEM III              |
| Betondeckung $c_{nom}$                        | 3; 3,5; 4; 5; 6 [cm]              |
| Korrosionsrate $i_{corr}$                     | 0,1; 0,5; 1,0 [A/m <sup>2</sup> ] |
| Chloridkonzentration auf der Oberfläche $C_s$ | 2,0; 3,5; 6,0 kg/m <sup>3</sup>   |
| Querschnitt der Tragbewehrung $\varnothing_s$ | 16; 25 [mm]                       |
| Korrosionsfaktor $R_{corr}$                   | 1 [-]                             |

Tab. 18: Wertebereich der Parameter zur Berechnung des S-Shape-Funktions-Verlaufs für die Karbonatisierung

| Parameter   | Verteilung [%] |
|---|----------------|
| <b>w/z-Wert</b>   |                |
| 0,4   | 50             |
| 0,5   | 35             |
| 0,6   | 15             |
| <b>Chloridkonzentration auf der Oberfläche <math>C_s</math></b> |                |
| 6   | 20             |
| 3,5   | 40             |
| 2   | 40             |
| <b>Querschnitt der Tragbewehrung <math>\varnothing_s</math></b> |                |
| 16  | 50             |
| 25  | 50             |
| <b>Betondeckung <math>c_{nom}</math></b>                        |                |
| 4   | 40             |
| 5   | 40             |
| 6   | 20             |

Tab. 19: Wichtung der Wertebereiche der Chlorideindringung

### 5.4.7 Ergebnisse der verfeinerten Parameterstudie

Der Verlauf der Zustandsentwicklung der Brücken ist in Bild 16 dargestellt. Wiederum ergibt sich eine S-förmige Funktion für den repräsentativen Verlauf der Brücken.

Auffallend im Vergleich der Schaubilder 15 und 16 ist bei erster Betrachtung die wesentlich höhere Dichte der Punktwolke in Bild 16. Dienten als Grundlage für Bild 15 ca. 30 Brücken (einfache Parameterstudie), sind für die verfeinerte Studie ca. 1100 Zustandsverläufe von Brücken generiert worden. Dadurch weist der neue Datenbestand an den

erreichbaren Substanzkennzahlen viel weniger und kleinere Lücken auf.

Des Weiteren ist der Verlauf im Vergleich zur einfachen Parameterstudie (Bild 15) streng-monoton steigend. Zudem ist der Anstieg im Bereich von 0 bis 40 Jahren wesentlich flacher, sodass sich ein Plateau bei der SKZ von ca. 2,8 (einfache Parameterstudie: SKZ (t = 40 a)  $\approx$  3,3) einstellt.

Wird die verfeinerte S-Shape-Funktion dem Referenz-Verlauf aus Bild 10 gegenübergestellt, erkennt man eine große Ähnlichkeit der Steigungen in den Bereichen zwischen t {0; 40} und {70; 90}; siehe hierzu auch Bild 17. Bemerkenswerte Unterschiede

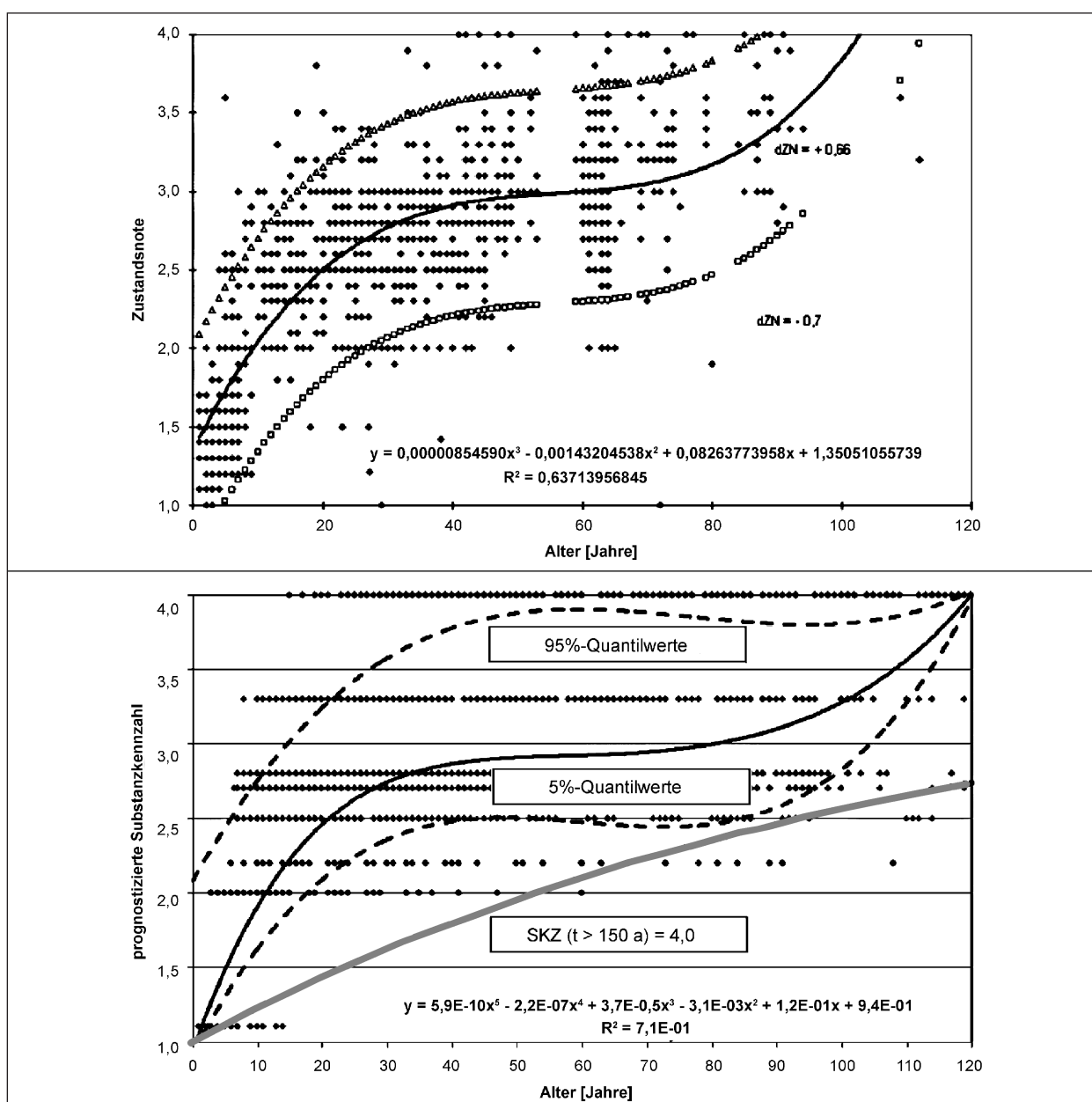


Bild 17: Vergleich der S-Shape-Funktion anhand von Realdaten mit der verfeinerten Parameterstudie

sind zum einen der Ursprung bzw. dessen Achsenabschnitt: Der Achsenabschnitt nach Realdaten beträgt ca. 0,4, d. h. in Realität ist des Öfteren eher von anfänglich vorgeschädigten Brückenbauwerken auszugehen. Bei der Studie wurde dies nicht berücksichtigt, die Substanzkennzahl beträgt zum Zeitpunkt  $t = 0$  stets  $SKZ = 0$ . Zum anderen tritt der Zeitpunkt des Tragfähigkeitsverlusts ( $SKZ = 4,0$ ) mit  $t = 105$  a für die Realdaten früher ein, als bei der theoretischen Nachrechnung  $t = 120$  a. Dies kann damit erklärt werden, dass der Verlauf nur für Chlorideindringung und Karbonatisierung aufgestellt wurde, andere Schädigungsmechanismen (siehe auch Bild 8) sind nicht berücksichtigt und dass keine Interaktionen von Schädigungen einbezogen wurden.

Zuletzt wird an dieser Stelle noch auf die unterschiedlichen Verläufe der Quantil-Werte (0,05- und 0,95-Quantile) hingewiesen. Vor allem der Verlauf der 0,95-Quantil-Werte nach Theorie zeigt eine von der S-Form abweichenden Form. Nach ca. 50 Jahren ist hier eine Substanzkennzahl von  $SKZ = 3,8$  erreicht. Dabei zeigt der Verlauf nahezu keine S-Form.

#### 5.4.8 Interpretation der Ergebnisse und Ausblick

Die Ergebnisse zur Nachrechnung der S-Shape-Funktionen bekräftigen die Erkenntnisse aus [HOLST, R., 2005], dass der Zustandsverlauf einer Brücke anhand einer S-förmigen Funktion beschrieben werden kann.

Durch die Verfeinerung der Parameterstudie und weiterer Berücksichtigung der Karbonatisierung wird ersichtlich, dass sich infolge unterschiedlicher Eingangsparameter bzw. deren Wertebereich variable Funktionsverläufe ergeben. Aus diesem Grund ist es aber auch nur möglich eine vage Aussage über den tatsächlichen Verlauf einer konkreten Brücke zu machen. Interessant sind hinsichtlich dieser Erkenntnisse die Verläufe von einzelnen Brückenklassen, d. h. nach einer Unterteilung der Brückengesamtheit in einzelne Klassen gleicher Voraussetzungen, um den Zustandsverlauf präziser prognostizieren zu können.

Eine Klassifizierung anhand der technischen Regelwerke, Normen und zusätzlichen technischen Vorschriften ist eine Möglichkeit Verläufe für unterschiedliche Randbedingungen aufzustellen bzw. den Wertebereich in entscheidenden Stellen zu

verringern. Zum Beispiel könnten in Abhängigkeit der vorgeschriebenen Betondeckung nach Norm bzw. ZTV, Brückenklassen nach deren Baujahren eingeführt werden. Darauf aufbauend sollten sich unterschiedliche repräsentative Zustandsverläufe nach obiger Systematik ergeben. Ob dann auch eine S-förmige Zustandskurve entsteht ist dabei zu untersuchen.

Aufbauend auf dieser Methodik ist es möglich, ein einfaches Modell für die Zustandsentwicklung einer Brücke aufzustellen, welches für eine erste Einschätzung genutzt werden könnte.

Hinsichtlich des Umstands, dass nur wenige Bauwerksdaten in SIB-Bauwerke zur Einsicht bereit stehen, gibt eine solche Untersuchung bessere Angaben über entweder eine Schar von Brückenbauwerken oder sogar über eine konkrete Brücke auf Netzebene.

Für die Klassifizierung der Bauwerke können viele Parameter herangezogen werden. Tabelle 20 gibt einen Überblick über die Änderungen und zusätzlichen Anforderungen von Normen und Richtlinien, welche die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken betreffen. Dabei wird versucht die maßgebenden Aspekte zusammen zu stellen. Die Zusammenstellung basiert zum Teil auf den Recherchen von [SCHNELLENBACH-HELD, M. et al., 2013]. Viele der dort aufgeführten Regelungen können derzeit nicht in ein Schädigung-Zeit-Gesetz integriert werden oder gar zahlenmäßig erfasst werden, dennoch haben sie einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit (s. Kapitel 4.1.2). Für Bauwerke, die einer Klasse mit solchen Eigenschaften angehören, ist in weiteren Untersuchungen zu erarbeiten, ob und inwiefern sich die Eigenschaften auf die Substanzkennzahlen auswirken

Aus Tabelle 20 wird folgende Klassifizierung der Brückenbauwerke nach Baujahr für weitere Untersuchungen vorgeschlagen:

|          |          |               |
|----------|----------|---------------|
| Klasse 1 | Baujahr: | $\leq 1951$ , |
| Klasse 2 | Baujahr: | 1952-1967,    |
| Klasse 3 | Baujahr: | 1968-1972,    |
| Klasse 4 | Baujahr: | 1973-1982,    |
| Klasse 5 | Baujahr: | 1983-2002,    |
| Klasse 6 | Baujahr: | 2002-2013.    |

Maßgebend für die Unterteilung in die Klassen nach Baujahren sind die Einführungen der unter-

schiedlichen Brückenklassen und der damit in der Bemessung zu berücksichtigenden Lastmodelle. Zwischen den einzelnen Änderungen sind meist auch Ergänzungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeitsanforderungen eingeführt worden, die dann zusammen mit überarbeiteten Lastmodellen in die entsprechenden Normen aufgenommen wurden. Die oben aufgeführte Klasseneinteilung nach Baujahr infolge Entwicklung der Regelwerke wird daher als ausreichend genau angesehen.

Dennoch sind neben den in Tabelle 20 aufgeführten Klassifizierungseigenschaften auch die weiteren Bauwerksbeschaffenheiten und Randbedingungen in die Klassifizierung einzuarbeiten, welche zum Teil auch in [SCHNELLENBACH-HELD, M. et al., 2013] vorgeschlagen werden, wie

- Bauwerksart (Platten-, Balken-, Rahmen-, -Gewölbebrücke),
- Querschnittsgestaltung (Hohlkasten-, Plattenbalken; Plattenbrücken),

- Baustoff (Stahlbeton, Spannbeton, unbewehrter Beton),
- statisches System in Brückenlängsrichtung (Einfeld-, Mehrfeldsystem),
- Spannweite ( $l_{\text{eff}} < \text{oder} > 30 \text{ m}$ ),
- Brückenklasse.

Weitere Eigenschaften, die feinere Klassifizierungen nahe legen, sind außergewöhnliche Umweltbedingungen: Brücken mit Lage in Küstennähe (bis zu einer Entfernung von 3 km; [McGEE, R., 1999]), in Gebieten mit hohem Schneefall, sodass dort vermehrt Tausalz eingesetzt wird oder in Industriegebieten mit hohem  $\text{CO}_2$ -Ausstoß oder Gebieten mit saurem Regen sind dafür Beispiele.

Zuletzt ist der Einsatz der unterschiedlichen Zementarten in den Brückenbauwerken zu berücksichtigen. Hierzu müssten statistische Erhebungen über den jährlichen Verbrauch der einzelnen Zementarten ausgewertet werden.

| Jahr | Name der Richtlinie/<br>des Regelwerks                              | Betreffende<br>Bauweise   | Eingeführte Regelungen   |
|------|---|---------------------------|--|
| 1916 | Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton        | Eisenbeton                | Betondeckung zwischen 1 bis 1,5 cm, im Freien: 2 cm  |
| 1924 | DIN 1072:24   | Brückenbau                | Dampfwalze; Lastkraftwagen   |
| 1925 | DAfEb Sept 1925   | Eisenbeton                | Änderung Betondeckung: große Bauteile $\geq 2 \text{ cm}$ , Brücken über Eisenbahnschienen: 4 cm, Verschleißbeanspruchter Beton +1 cm, Mindestzementwert: 300 kg/m <sup>3</sup> (bei Brücken u. U. mehr), festgelegte Schalungsfristen |
| 1932 | DAfEb-Teil A 1932-05  | Eisenbeton                | Verwendung von Tonerzement; Mindestzementwert: Hochbau 270 kg/m <sup>3</sup> , Brücken 300 kg/m <sup>3</sup> , Anordnung von Nachbehandlung, zusätzliche Schalfristen  |
| 1935 |   | MEILENSTEIN<br>Spannbeton | Erste Spannbetonbrücke   |
| 1937 | DIN 1045:1937-05  |                           | Mindestzementgehalt Brücken 300 kg/m <sup>3</sup>  |
| 1941 | DIN 1072:41   | Brückenbau                | Dampfwalze; Lastkraftwagen   |
| 1944 | DIN 1047:44-04  | Beton                     | Bindemittelgehalt bei Brücken $\geq 200 \text{ kg/m}^3$  |
| 1951 | Richtlinie für die Bemessung und Ausführung von Spannbetonbauteilen | MEILENSTEIN<br>Spannbeton |  |
| 1952 | DIN 1072:52   | Brückenbau                | Einführung BK 3, 6, 12, 31, 45, 60   |
| 1953 | DIN 4227  | Spannbeton                | Mindestschubbewehrung, Lastfall Temperatur: nur konstante $\Delta T$ -Änderung   |
| 1959 | DIN 4225  | Fertigteile<br>Spannbeton | Betondeckung: 1,0-1,5 cm   |
| 1964 |   | MEILENSTEIN<br>Spannbeton | Taktschiebeverfahren   |
| 1966 | ZB DIN 4227:66-02   | Spannbeton                | Mindestbewehrung für wenig überdrückte Bereiche, Erhöhung Mindestlängsbewehrung, Änderung des Nachweises auf Schub, Genauere Festlegung für Mindestschubbewehrung, Änderung der Mindestbewehrung                                       |

Tab. 20: Änderungen für die Bemessung und konstruktive Durchbildung von Brücken seit Beginn des 20. Jahrhunderts

| Jahr         | Name der Richtlinie/<br>des Regelwerks               | Betreffende<br>Bauweise   | Eingeführte Regelungen  |
|--------------|--|---------------------------|---|
| 1967         | DIN 1072:67  | Brückenbau                | Einführung BK 12, 30 ,60  |
| 1969         | ZB DIN 4227:69-11                                    | Spannbeton                | Erhöhung der Mindestbewehrung, Verwendung von Rippenstahl anstelle Glattstahl   |
| Ende<br>1960 |  | MEILENSTEIN<br>Brückenbau | Einsatz von Streusalz   |
| 1971         | DIN 4226/1971-12                                     | Stahlbeton                | Einführung der DIN 4226 „Zuschlag für Beton“ (Vorbeugung gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktionen)   |
| 1972         | DIN 1045   | Stahlbeton                | Ermittlung der Mindestbewehrung für Rissbreite unter Gebrauchslast  |
| 1972         | DAfStb zu DIN 1045:72-01                             | Stahlbeton                | Fachwerkanalogie für Schub, Einbau von Bügeln und Schrägstäben möglich; Betondeckung i. Abh. von Stabdurchmesser und Umweltbedingungen: 1-4 cm, Modifikation des Zementgehalts i. Abh. von Betonklasse und Sieblinie: 240-280 kg/m <sup>3</sup> ; w/z-Wert ≤ 0,65 bis 0,75, bei Frost w/z < 0,6; indirekter Nachweis der Rissbreite über konstruktive Vorgaben (Rissbreite: „normal“, „gering“ und „sehr gering“) |
| 1972         | ARS 8/1972-03  | Brückenbau                | Herstellung von frost- und tausalzbeanspruchtem Beton   |
| 1973         | DIN 4227:73-06                                       | Spannbeton                | Anpassung/ Änderung der Mindestbewehrung  |
| 1977         | Soforterlass 07.77                                   | Spannbeton                | Ermüdungsnachweis unter Einbeziehung des Lastfalls Temperatur ( $\Delta T$ )  |
| 1979         | DIN 4227   | Spannbeton                | Veränderlicher Druckstrebenwinkel, Anpassungen des linearen Temperaturgradienten $\Delta T$ , Detailliertere Berücksichtigung der Formänderung infolge Kriechen und Schwinden   |
| 1980         | ZTV-K 80   | Brückenbau                | Spannglieder zu 30 % durchzuführen, Verbot glatter Betonstähe, Betondeckung $\geq 4$ cm, Betondeckung der Hüllrohre in Fahrbahnplatten: Längsspannglied 10 cm, Querspannglied 8 cm, w/z-Wert $\leq 0,55/0,5$ ; Zementgehalt max. 400/370 kg/m <sup>3</sup>  |
| 1982         | ARS 09/1982-03                                       | Brückenbau                | Einführung BK 30/20, 60/30  |
| 1982         | ARS 14/1982-05                                       | Brückenbau                | Bedingungen zur Anwendung des Taktchiebeverfahrens  |
| 1985         | DIN 1072   | Brückenbau                | Anpassung/Änderung des linearen Temperaturgradienten $\Delta T$   |
| 1986         | DIN 4226/1986-12                                     | Stahlbeton                | Einführung (Hamburg) Richtlinie Alkalireaktion im Beton: Vorbeugung gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion   |
| 1988         | DIN 1045:1988-07                                     | Stahlbeton                | Erhöhung der Betondeckung: 1-5 cm, Nachweis der Rissbreite über Mindestbewehrung i. Abh. von Stahlspannung für Zwangseinwirkung   |
| 1988         | DIN 4227   | Spannbeton                | Erhöhung Mindestbewehrung der Rissbreite, Modifikation des Ermüdungsnachweises  |
| 1990         | ARS 10/1990  | Brückenbau                | Nachweis der Rissbreiten auf Grundlage der Zugkraftdeckung  |
| 1993         | BMV  | Brückenbau                | Gefahr der auf Spannungsrisskorrosion bei Spanngliedern Neptun N40 hergestellt bis 1965   |
| 1995         | A1 DIN 4227-1  | Spannbeton                | Mindestbewehrung für duktilen Bauteilversagen, Änderung des Nachweises der Rissbreiten aus ARS 10/1990  |
| 1996         | DIN 1045/A1:96-12                                    | Stahlbeton                | Zusätzliche Hinweise zur Herstellung von Beton mit hohem Frost-Tausalz-widerstand: Portlandzement, Portlandhüttenzement, Portlandölschieferzement, Portlandkalkstein-zement, Portlandflugaschzement, Portlandflugaschhüttenzement, Hochofenzement   |
| 1998         | Richtlinie für Betonbrücken mit externer Vorspannung | Spannbeton                | Verbot von Spanngliedern in Stegen von Hohlkästen; Quervorspannung von Fahrbahnplatten nur verbundlos   |
| 2001         | DIN FB 101   | Brückenbau                | Anpassung/Änderung $\Delta T$ i. Abh. von Belagstärke, Mindestanforderungsklassen, Mindestbewehrung anhand Betonzugfestigkeit oder Begrenzung des Stabdurchmessers  |
| 2003         | DIN FB 101:03  | Brückenbau                | Einführung LM1, 2,3,4   |
| 2003         | ARS 11/2003  | Brückenbau                | Mindestdruckstrebenwinkel 29,7°   |
| 2009         | DIN FB 102   | Brückenbau                | Nachweis der Rissbreiten für gegliederte Querschnitte   |

Tab. 20: Fortsetzung

## 5.5 Anwendung der Markov-Ketten

### 5.5.1 Anwendung bezogen auf SIB-Bauwerke

In Kapitel 4.3.2 ist die Methodik der Markov-Ketten und ihre Elemente beschrieben. Für deren Anwendung innerhalb dieses Projekts werden ausschließlich Übergangswahrscheinlichkeiten angewandt bzw. deren Aufstellung mittels der Daten der SIB-Bauwerke untersucht.

Wie aus Kapitel 2 hervorgeht basiert die Zustandsbewertung auf der automatischen Generierung einer Note zwischen 1,0 bis 4,0 aus den Bewertungen der Einzelschäden, wobei ein fließender Übergang mit Kommastellen berücksichtigt wird. In diesem Fall ergibt sich bei Berücksichtigung aller Zustandsnoten ein Zustandsraum von 31 Zuständen. Die transiente Übergangsmatrix hat dementsprechend 496 Komponenten. Wird dem Vorschlag nachgegangen zeitvariante Übergangsmatrizen zu berücksichtigen, müssen hierzu weitere Matrizen für die jeweiligen diskreten Beobachtungszeitpunkte aufgestellt werden. Als Beispiel sei von einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren auszugehen. Würden Beobachtungszeitpunkte bzw. -intervalle von fünf Jahren untersucht, müssen für 20 Zeitpunkte jeweils die Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen aufgestellt werden. Dies bedeutet vereinfacht (das Auftreten einiger Zustände über die Zeit geht gegen null), dass 9.920 Übergangswahrscheinlichkeiten zu ermitteln sind. Wird in Betracht gezogen, verschiedene Markov-Ketten für unterschiedliche Brückenklassen (z. B. Baujahr 1950 bis 1970, Plattenbalken- oder Hohlkastenquerschnitt) oder Bauteilgruppen (z. B. Überbau, Unterbau, Gründung) aufzustellen, steigt die Anzahl an benötigten Übergangswahrscheinlichkeiten enorm an.

Dafür ist der zur Verfügung gestellte Datenbestand (insbesondere mit Anspruch auf nicht instandgesetzte Brückenbauwerke) zu gering und eine Auswertung über den gesamten Zustandsraum zu rechenintensiv.

Dennoch wurden zur Entwicklung eines Verfahrens und für den Abgleich der Modelle mit Realdaten Datensätze aus dem SIB-Bauwerks Brückenmanagement von Nordrhein-Westfalen ausgewertet, um daran das weitere Vorgehen zu entwickeln.

### 5.5.2 Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten für den neuen Zustandsraum der Daten NRW und TH

Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Daten aus Thüringen ist die Übergangsmatrix der Bauteilgruppe Überbau von 2000 nach 2007 in Tabelle 21 und von 2007 nach 2013 in Tabelle 22 aufgeführt. Die Darstellungen sollen nochmals zwei grundsätzliche Überlegungen verdeutlichen:

Zum einen wird ersichtlich dass die Betrachtung des gesamten Zustandsraums nicht sinnvoll ist. Die Matrix hat insgesamt 31 Komponenten (aufgrund der Größe sind die Noten 3,5-3,9 in der Tabelle nicht vorhanden, wobei dieser Zustand im Betrachtungszeitraum auch gar nicht belegt wurde), wodurch der Rechenaufwand jeder Matrix sehr groß ist.

Zum anderen erkennt man sehr anschaulich, dass der Datenbestand zu gering ist: Einerseits sind in einigen Zeilen keine Eintragungen vorhanden und andererseits stechen in den belegten Reihen viele Nullübergänge hervor. In Anbetracht dessen, dass für die Erstellung alle Brücken ohne Klassifizierung miteingerechnet wurden, können anhand des Datenumfangs nur schwer aussagekräftige Zusammenhänge erarbeitet werden.

In den Tabellen 21 und 22 ist zudem die Breite der eingenommenen Zustandsräume markiert. Die Markierung gibt demnach wieder, bis zu welcher Substanzkennzahl sich ein Anteil an Brückenbauwerken innerhalb des Zeitraums verschlechtert hat. Daraus kann der Trend abgeleitet werden, dass sich mit zunehmendem Brückenalter der eingenommene Zustandsraum verringert. Zudem könnte aus dem Vergleich der beiden Tabellen hervorgehen, dass die Breite des eingenommenen Zustandsraums auch mit zunehmender Substanzkennzahl des Ausgangszustands abnimmt. Allerdings sind weitere Auswertungen von Übergangsmatrizen notwendig, um die Aussagen zu untermauern.



| SKZ | 1    | 1,1  | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5  | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2   | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6  | 2,7  | 2,8  | 2,9  | 3    | 3,2 | 3,3 | 3,4  | 4 |
|-----|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|------|---|
| 1   | 82,6 | 3    | 0,2 | 0   | 0   | 1,5  | 2,9  | 4,1  | 2,7  | 0,2  | 0   | 0,5 | 0,5 | 0   | 0,2 | 0,5 | 0,2  | 0,2  | 0,6  | 0,2  | 0    | 0   | 0   | 0,2  | 0 |
| 1,1 |      | 64,3 | 0   | 0   | 3,6 | 10,7 | 10,7 | 7,1  | 7,1  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 3,6  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 1,2 |      |      | 25  | 0   | 25  | 0    | 25   | 0    | 25   | 0    | 25  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 1,3 |      |      |     | -   | -   | -    | -    | -    | -    | -    | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -    | -    | -   | -   | -    | - |
| 1,4 |      |      |     | -   | -   | -    | -    | -    | -    | -    | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -    | -    | -   | -   | -    | - |
| 1,5 |      |      |     |     | 60  | 0    | 0    | 0    | 20   | 0    | 0   | 0   | 20  | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 1,6 |      |      |     |     |     |      | 81,8 | 9,1  | 0    | 0    | 9,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 1,7 |      |      |     |     |     |      |      | 56,4 | 12,7 | 3,6  | 5,5 | 9,1 | 0   | 3,6 | 0   | 0   | 5,5  | 3,6  | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 1,8 |      |      |     |     |     |      |      |      | 78,8 | 9,1  | 0   | 3   | 3   | 3   | 0   | 0   | 0    | 3    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 1,9 |      |      |     |     |     |      |      |      |      | 66,7 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 22,2 | 0    | 11,1 | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 2   |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 2,1 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 2,2 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     | 100 | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 2,3 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     | 100 | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 2,4 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     | 100 | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 2,5 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     | 0   | 0    | 66,7 | 0    | 0    | 16,7 | 0   | 0   | 16,7 | 0 |
| 2,6 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     | 33,3 | 33,3 | 33,3 | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 2,7 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |      | 60   | 20   | 20   | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 2,8 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |      |      | 83,3 | 16,7 | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 2,9 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |      |      |      | 100  | 0    | 0   | 0   | 0    | 0 |
| 3   |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      | -    | -   | -   | -    | - |
| 3,1 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      | -    | -   | -   | -    | - |
| 3,2 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      | -    | -   | -   | -    | - |
| 3,3 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      | -    | -   | -   | -    | - |
| 3,4 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      | -    | -   | -   | 100  | 0 |
| 4   |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      | - |

Tab. 21: Übergangsmatrix der Bauteilgruppe Überbau von 2000 nach 2007; Daten NRW und TH

| SKZ | 1    | 1,1  | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5  | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2    | 2,1  | 2,2  | 2,3 | 2,4 | 2,5  | 2,6  | 2,7  | 2,8  | 2,9 | 3   | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 4 |
|-----|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| 1   | 74,2 | 1,8  | 0   | 0   | 0   | 1,1  | 6,4  | 7,4  | 3,1  | 0,6  | 0,7  | 1,3  | 1,1  | 0   | 0   | 1,5  | 0,4  | 0,2  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0 |
| 1,1 |      | 65,8 | 0   | 0   | 0   | 7,9  | 2,6  | 10,5 | 5,3  | 0    | 0    | 2,6  | 2,6  | 0   | 0   | 2,6  | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,2 |      |      | 50  | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 50   | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,3 |      |      |     | -   | -   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -   | -   | -    | -    | -    | -    | -   | -   | -   | -   | -   | -   | - |
| 1,4 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |   |
| 1,5 |      |      |     |     |     | 73,3 | 6,7  | 0    | 6,7  | 0    | 6,7  | 6,7  | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,6 |      |      |     |     |     |      | 54,8 | 32,3 | 6,5  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 6,5  | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,7 |      |      |     |     |     |      |      | 71,4 | 12,7 | 0    | 1,6  | 3,2  | 1,6  | 0   | 0   | 3,2  | 3,2  | 1,6  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,8 |      |      |     |     |     |      |      |      | 57,4 | 7,4  | 0    | 3,7  | 1,9  | 0   | 0   | 3,7  | 1,9  | 7,4  | 3,7  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,9 |      |      |     |     |     |      |      |      |      | 53,8 | 7,7  | 7,7  | 15,4 | 7,7 | 0   | 7,7  | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2   |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      | 16,7 | 33,3 | 33,3 | 0   | 0   | 16,7 | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,1 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      | 60   | 20   | 0   | 0   | 10   | 0    | 10   | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,2 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      | 100  | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,3 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      | 100 | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,4 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     | 100 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,5 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     | 66,7 | 33,3 | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,6 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      | 71,4 | 28,6 | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,7 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      | 53,3 | 26,7 | 6,7 | 6,7 | 6,7 | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,8 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      | 75   | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,9 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      | 80  | 20  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 3   |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 3,1 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     | -   | -   | -   | -   | - |
| 3,2 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |     | -   | -   | -   | - |
| 3,3 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |     | -   | -   | -   | - |
| 3,4 |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |     |     |     | 100 | 0 |
| 4   |      |      |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     | - |

Tab. 22: Übergangsmatrix der Bauteilgruppe Überbau von 2007 nach 2013; Daten NRW und TH

### 5.5.3 Begrenzung des Zustandsraums

Kapitel 5.5.2 zeigt deutlich, dass für die Anwendung der Übergangswahrscheinlichkeiten nach MARKOV auf die Datenfelder der SIB-Bauwerke, der Zustandsraum zu begrenzen ist. Da dieses Projekt auf die Schadensumfangsentwicklung abzielt, ist die Überlegung den Zustandsraum auf Zustände zu reduzieren, die offensichtlich Aussagen über die Umfangsentwicklung liefern. Widmet man sich dem Bewertungsschlüssel der Substanzkennzahlen (Bild 7), wird ersichtlich, dass die Noten

1,3 / 1,4 / 1,6 / 1,7 / 1,8 / 1,9

2,4 / 2,6 / 2,9 und

3,5 / 3,6 / 3,7 / 3,8 / 3,9

nicht durch die Bewertung eines Einzelschadens erreicht werden, sondern nur in Verbindung mit Zu- oder Abschlägen durch die Berücksichtigung des Schadensumfangs und der Schadensanzahl.

Wird das Datenfeld der „frei gealterten“ Brücken bezüglich den Substanzkennzahlen der Bauteilgruppen Überbau und Unterbau in den oben genannten Noten gefiltert, erkennt man, dass sich fast alle diese Brücken im Bereich der Noten 1,6 bis 1,9 befinden. Im Notenbereich 3,5 bis 3,9 sind dagegen keine Brücken vorhanden, die eine solche Substanzkennzahl aufweisen. Da es im Interesse des Bundes ist, sämtliche Bauwerke auf einem guten Zustandsniveau zu halten, wird versucht Instandsetzungsmaßnahmen vor dem Erreichen einer Zustandsnote über 3,5 durchzuführen, so dass es nicht zu einem Versagen des Bauwerks kommt. Mit diesem Hintergrund überrascht die Tatsache, dass Brücken mit einer SKZ von über 3,5 quasi nicht vorhanden sind, kaum.

### 5.5.4 Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten für den neuen Zustandsraum der Daten NRW und TH

Aus Tabelle 23 geht nun die Anzahl an Brücken hervor, die sich zu den Zeitpunkten der Zustandsbewertungen der Jahre 2000, 2007 und 2013 in bestimmten Zuständen befand, die für eine Aussage über die Schadensumfangsentwicklung herangezogen werden können. Der Tabelle kann aber nicht entnommen werden, wie viele Brücken, die sich zu einem der Zeitpunkte in einem bestimmten Zustand befanden, in einen anderen expliziten Zustand im Beobachtungszeitraum übergehen. Dafür müssen

| SKZ | Überbau |      |      | Unterbau |      |      |
|-----|---------|------|------|----------|------|------|
|     | 2000    | 2007 | 2013 | 2000     | 2007 | 2013 |
| 1,3 | 0       | 0    | 0    | 0        | 0    | 0    |
| 1,4 | 0       | 0    | 0    | 0        | 0    | 0    |
| 1,6 | 9       | 27   | 41   | 11       | 12   | 17   |
| 1,7 | 43      | 43   | 67   | 22       | 29   | 37   |
| 1,8 | 26      | 38   | 41   | 33       | 52   | 68   |
| 1,9 | 8       | 9    | 5    | 14       | 32   | 44   |
| 2,4 | 0       | 1    | 1    | 1        | 1    | 5    |
| 2,6 | 3       | 3    | 7    | 0        | 1    | 9    |
| 2,9 | 0       | 3    | 3    | 0        | 1    | 3    |
| 3,5 | 0       | 0    | 0    | 0        | 0    | 0    |
| 3,6 | 0       | 0    | 0    | 0        | 0    | 0    |
| 3,7 | 0       | 0    | 0    | 0        | 0    | 0    |
| 3,8 | 0       | 0    | 0    | 0        | 0    | 0    |
| 3,9 | 0       | 0    | 0    | 0        | 0    | 0    |
| Σ   | 89      | 124  | 165  | 81       | 128  | 183  |

Tab. 23: Verteilung der Brücken nach den Substanzkennzahlen der Umfangs- und Schadensanzahl zu den Betrachtungszeitpunkten (Daten NRW)

die Übergangswahrscheinlichkeiten aufgestellt werden. Tabelle 24 zeigt die Übergangswahrscheinlichkeiten [%] der Substanzkennzahlen im Bereich von SKZ = 1,5 bis SKZ = 1,9 des Überbaus im Betrachtungszeitraum 2000 nach 2007 in alle weiteren Zustände (bis maximal SKZ = 2,9) für den Datenbestand aus Nordrhein-Westfalen. Auffällig ist, dass der größere Anteil an Brücken in diesem Betrachtungszeitraum in seinem Zustand verbleibt, ein geringerer Anteil den nächst gelegenen Zustand einnimmt und nur ein Bruchteil in höhere Zustände übergeht. Auch unter Einbeziehung der Daten von Thüringen ändert sich an dieser Feststellung nichts: Tabelle 25 belegt, dass der Großteil der Brücken, d. h. mindestens 60 %, im untersuchten Zeitraum in seinem Zustand verbleibt oder eine Zustandsentwicklung nur in den nächst zahlenmäßig höheren Zustand erfährt.

In beiden Tabellen sind dennoch große Sprünge im Zustandsverlauf einiger Brücken zu erkennen. Vereinzelt werden sogar Sprünge von 8 Zuständen (z. B. vom Zustand SKZ = 1,9 nach SKZ = 2,7) von Brücken mit einem Anteil von bis zu 25 % ersichtlich.

Auch im Vergleich der Tabellen 24 und 25 mit den Tabellen 26 und 27, welche den Betrachtungszeitraum 2007 nach 2013 darstellen, werden keine weiteren Auffälligkeiten ersichtlich.

|               | Substanzkennzahl |      |      |      |      |      |     |      |     |     |     |     |     |     |      |
|---------------|------------------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $P_{i/j}$ [%] | 1,5              | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2,0  | 2,1 | 2,2  | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9  |
| $P_{1,5/j}$   | 66,7             | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 33,3 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    |
| $P_{1,6/j}$   | -                | 77,8 | 11,1 | 0    | 0    | 11,1 | 0   | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    |
| $P_{1,7/j}$   | -                | -    | 53,5 | 16,3 | 2,3  | 4,7  | 9,3 | 0    | 4,7 | 0   | 7,0 | 0   | 2,3 | 0   | 0    |
| $P_{1,8/j}$   | -                | -    | -    | 76,9 | 7,7  | 0    | 3,8 | 3,8  | 3,8 | 0   | 0   | 0   | 3,8 | 0   | 0    |
| $P_{1,9/j}$   | -                | -    | -    | -    | 62,5 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 25  | 0   | 12,5 |

Tab. 24: Übergangswahrscheinlichkeiten der Substanzkennzahl des Überbaus zwischen 2000 und 2007; Daten NRW

|               | Substanzkennzahl |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |      |     |      |
|---------------|------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| $P_{i/j}$ [%] | 1,5              | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7  | 2,8 | 2,9  |
| $P_{1,5/j}$   | 60               | 0    | 0    | 20   | 0    | 0   | 0   | 20  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0    |
| $P_{1,6/j}$   | -                | 81,8 | 9,1  | 0    | 0    | 9,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0    |
| $P_{1,7/j}$   | -                | -    | 56,4 | 12,7 | 3,6  | 5,5 | 9,1 | 0   | 3,6 | 0   | 0   | 5,5 | 3,6  | 0   | 0    |
| $P_{1,8/j}$   | -                | -    | -    | 78,8 | 9,1  | 0   | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 0   | 0   | 0   | 3,0  | 0   | 0    |
| $P_{1,9/j}$   | -                | -    | -    | -    | 66,7 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 22,2 | 0   | 11,1 |

Tab. 25: Übergangswahrscheinlichkeiten der Substanzkennzahl des Überbaus zwischen 2000 und 2007; Daten NRW und TH

|               | Substanzkennzahl |      |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |      |     |     |
|---------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| $P_{i/j}$ [%] | 1,5              | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2,0  | 2,1  | 2,2  | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7  | 2,8 | 2,9 |
| $P_{1,5/j}$   | 81,8             | 9,1  | 0    | 9,1  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0   |
| $P_{1,6/j}$   |                  | 55,6 | 29,6 | 7,4  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 7,4 | 0   | 0    | 0   | 0   |
| $P_{1,7/j}$   |                  |      | 72,1 | 11,6 | 0    | 2,3  | 2,3  | 2,3  | 0   | 0   | 2,3 | 4,7 | 2,3  | 0   | 0   |
| $P_{1,8/j}$   |                  |      |      | 52,6 | 2,6  | 0    | 5,3  | 13,2 | 2,6 | 0   | 5,3 | 2,6 | 10,5 | 5,3 | 0   |
| $P_{1,9/j}$   |                  |      |      |      | 44,4 | 11,1 | 11,1 | 22,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0   |

Tab. 26: Übergangswahrscheinlichkeiten der Substanzkennzahl des Überbaus zwischen 2007 und 2013; Daten NRW

|               | Substanzkennzahl |      |      |      |      |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------|------------------|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $P_{i/j}$ [%] | 1,5              | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2,0 | 2,1 | 2,2  | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 |
| $P_{1,5/j}$   | 73,3             | 6,7  | 0    | 6,7  | 0    | 6,7 | 6,7 | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,6/j}$   |                  | 54,8 | 32,3 | 6,5  | 0    | 0   | 0   | 0    | 0   | 0   | 6,5 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,7/j}$   |                  |      | 71,4 | 12,7 | 0    | 1,6 | 1,6 | 3,2  | 1,6 | 0   | 3,2 | 3,2 | 1,6 | 0   | 0   |
| $P_{1,8/j}$   |                  |      |      | 57,4 | 7,4  | 0   | 3,7 | 13   | 1,9 | 0   | 3,7 | 1,9 | 7,4 | 3,7 | 0   |
| $P_{1,9/j}$   |                  |      |      |      | 53,8 | 7,7 | 7,7 | 15,4 | 7,7 | 0   | 0   | 7,7 | 0   | 0   | 0   |

Tab. 27: Übergangswahrscheinlichkeiten der Substanzkennzahl des Überbaus zwischen 2007 und 2013; Daten NRW und TH

### 5.5.5 Optimierung der Übergangswahrscheinlichkeiten

Die Einschränkung des Zustandsraums auf Substanzkennzahlen, die vorrangig die Schadensumfangsentwicklung beschreiben, bringt neben der Reduktion des Rechenaufwands, die Möglichkeit

mit sich, Optimierungsverfahren zur Bestimmung von Übergangswahrscheinlichkeiten zu verwenden. In [REALE, T.; O'CONNOR, A., 2012] wird als Optimierungsverfahren die Kreuz-Entropie („cross entropy“) vorgestellt. Die Entropie kommt aus der Nachrichtentechnik und ist ein Maß für den Informationsgehalt einer Nachricht. Die Kreuz-Entropie

ist vereinfacht ausgedrückt, ein Verfahren zur Simulation bzw. Optimierung von seltenen Ereignissen. Dazu wird eine Verteilung über ein iteratives Verfahren an eine eigens vorgegebene Verteilungsfunktion angepasst. Als Zielverteilungsfunktion für die Übergangswahrscheinlichkeiten der Zustandsentwicklung von Brücken wird die Normalverteilung (Gauß'sche Glockenkurve) genannt. Die iterative Berechnung wird prinzipiell in zwei Schritte unterteilt: Im ersten Schritt werden die Übergangswahrscheinlichkeiten aufgestellt. Dies kann wie schon in Kapitel 5 durch die statistische Auswertung von Stichproben erfolgen. Im zweiten Schritt wird die Normalverteilung anhand von einigen wenigen Wahrscheinlichkeiten, die der Normalverteilung entsprechen, berechnet und mit zusätzlichen Wahrscheinlichkeiten ergänzt (entspricht Schritt 1). Mit der neuen Population wird erneut Schritt 2 vollzogen. Das Verfahren wird solange wiederholt bis die Zielverteilungsfunktion aufgestellt ist.

Die Kreuz-Entropie kann somit zur Optimierung von Verteilungen, die offensichtlich einer bekannten Verteilungsfunktion ähneln, aber auch zur Vervollständigung von lückenhaften Auswertungen von Datenfeldern genutzt werden.

Wie bereits erwähnt, wird in [REALE, T.; O'CONNOR, A., 2012] als Zielverteilung eine Normalverteilung empfohlen. In Anbetracht eines Beobachtungsintervalls von einem Jahr, trifft diese Aussage zu, da sich in diesem Zeitraum nur geringe Zustandssprünge von mehr als einem Zustand einstellen. Für die Anwendung der Kreuzentropie mit den Daten aus SIB-Bauwerke sind zum Vergleich die Übergangswahrscheinlichkeiten verschiedener Brückenpopulationen in den Bildern 18 und 19 dargestellt. Bild 18 zeigt die Übergangswahrscheinlichkeiten der Substanzkennzahlen des Überbaus, Unterbaus und des Gesamttragwerks „frei gealterter“ Brücken im Zeitraum 2007 nach

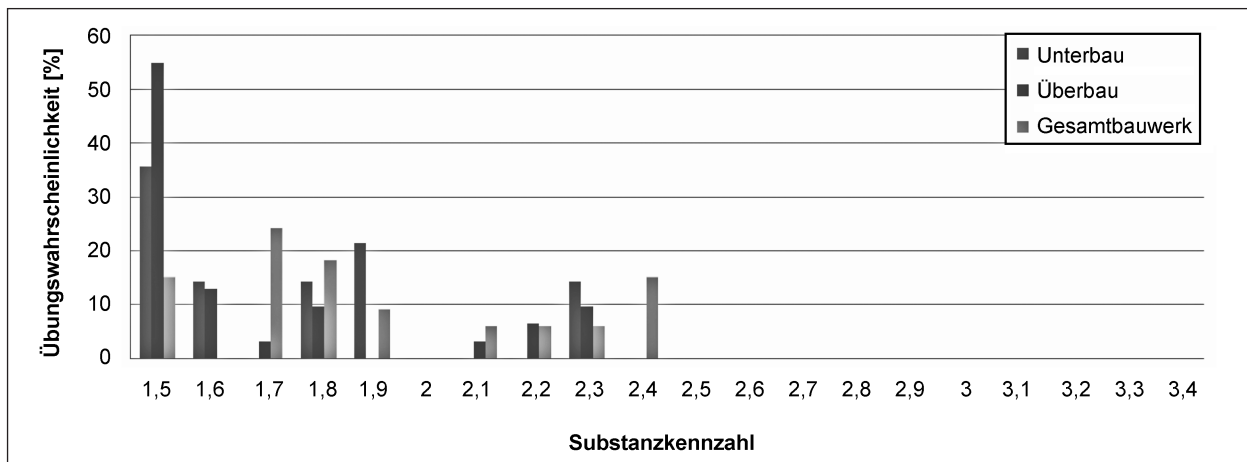


Bild 18: Auszug Übergangswahrscheinlichkeiten 2007 nach 2013 als Säulendiagramm (Ausgangszustand: SKZ = 1,5)

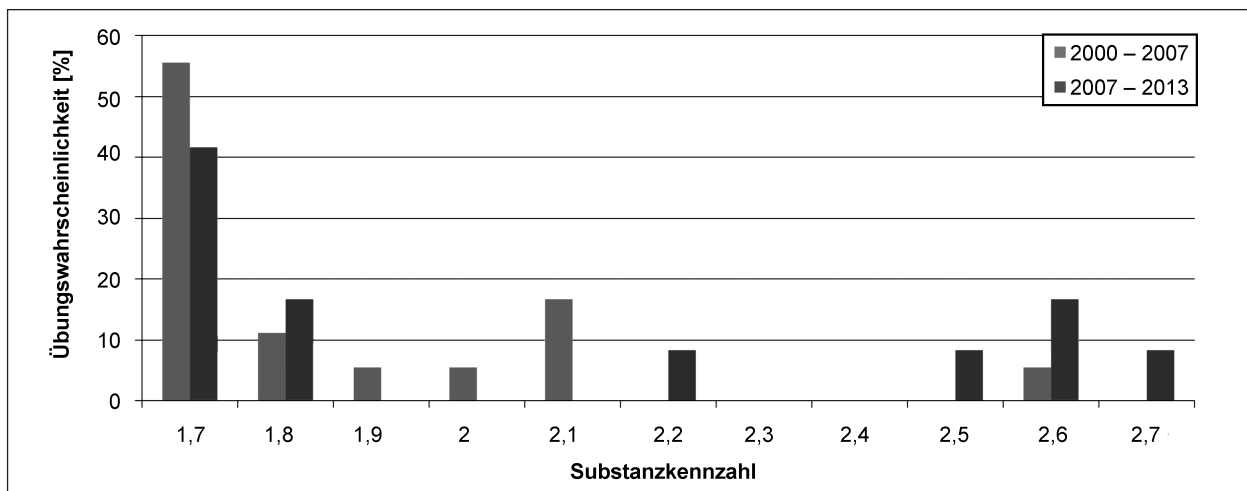


Bild 19: Auszug der Übergangswahrscheinlichkeiten der Substanzkennzahlen des Überbaus von Spannbetonbrücken der Baujahre zwischen 1950 und 1980 als Säulendiagramm (Ausgangszustand: SKZ = 1,7)

2013 vom Ausgangszustand  $SKZ = 1,5$  in alle nachfolgenden Zustände. Auffallend ist, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums ein maximaler Zustandssprung von 9 Zuständen (von 1,5 nach 2,4) für die SKZ des Gesamttragwerks auftritt und dass die Säulendiagramme unvollständig sind, d. h. einzelne Wahrscheinlichkeiten nicht vorhanden sind. Zudem ist ersichtlich, dass aus den Säulendiagrammen, wenn diese in eine Verteilungsfunktionen übertragen werden, diese stark von der Normalverteilung abweichen. Diese Tatsachen können auf das Säulendiagramm der Übergangswahrscheinlichkeiten der Bauteilgruppe Überbau von Spannbetonbrücken übertragen werden, welche zwischen den Jahren 1950 und 1980 erbaut wurden (Bild 18). Zum Vergleich sind in Bild 19 nicht nur der Beobachtungszeitraum 2007 nach 2013 sondern auch 2000 nach 2007 eingearbeitet. Die Diagramme unterscheiden sich signifikant untereinander und unterstreichen die Bedeutung der Population und die Verwendung von zeitvarianten Übergangswahrscheinlichkeiten.

Betrachtet man aber nur die Übergangswahrscheinlichkeiten der ersten ein bis fünf Zustände, ist die Normalverteilung andeutungsweise vorhanden. Mit dem Hintergrund, dass der Betrachtungszeitraum wesentlich größer ist als der in [REALE, T.; O'CONNOR, A., 2012] für die Kreuz-Entropie empfohlene, könnte die Normalverteilung dennoch aus-

reichend genau sein. Dafür ist Voraussetzung, dass der Wahrscheinlichkeitsraum begrenzt wird, wie in Kapitel 5.4.3 vorgeschlagen wurde.

Als weitere Untersuchung hinsichtlich einer Optimierungsmöglichkeit wird der Datenbestand in Bezug auf das Baujahr gefiltert, sodass nur noch die Bauwerke, welche in den Jahren 1964 bis 1975 erbaut wurden, betrachtet werden. Als Weiteres wird als grobe Vereinfachung angenommen, dass eine Brücke nur alle sechs Jahre, d. h. zu jeder Hauptprüfung, notenmäßig bewertet wird. Das bedeutet für das Bauwerk, dass es innerhalb des Intervalls die gleiche Substanzkennzahl wie zur vorherigen Hauptprüfung aufweist bis die nächste durchgeführt wird. Tabelle 28 soll das Vorgehen genauer erläutern: In der ersten Spalten sind die Baujahre 1963 bis 1976 aufgeführt und die Jahre '64 bis '75 in rot hervorgehoben. Die 2., 4., 6., 8. und 10. Spalte zeigen das Alter all jener Brücken der betroffenen Baujahre zu den Zeitpunkten 1994, 2000, 2006, 2012 und 2018. Die Zeitpunkte entsprechen den Jahren in denen eine Hauptprüfung der Brücken durchgeführt wurde bzw. wird. Unter der Annahme, dass zwischen zwei HPen die SKZ der Brücke konstant bleibt, werden im Weiteren die Intervalle, in denen die Brücken eines Baujahres das Alter von 36 Jahren erreichen, hervorgehoben (rote Markierungen in den Spalten 4 bis 7). Damit kann der Datenbestand erweitert werden, indem

|         | Prüfjahr der Hauptprüfung im 6-Jahre-Intervall |          |       |          |       |          |       |  |       |
|---------|--|----------|-------|----------|-------|----------|-------|--|-------|
|         | 1994   |          | 2000  |          | 2006  |          | 2012  |  | 2018  |
| Baujahr | Alter  |          | Alter |          | Alter |          | Alter |  | Alter |
| 1963    | 31   |          | 37    |          |       |          |       |  |       |
| 1964    | 30   | ...      | 36    | ...      | 42    |          | 48    |  | 54    |
| 1965    | 29   | 36...    | 35    | 36...    | 41    |          |       |  |       |
| 1966    | 28   | ...36... | 34    | ...36... | 40    |          |       |  |       |
| 1967    | 27   | ...36... | 33    | ...36... | 39    |          |       |  |       |
| 1968    | 26   | ...36... | 32    | ...36... | 38    |          |       |  |       |
| 1969    | 25   | ...36    | 31    | ...36    | 37    |          |       |  |       |
| 1970    | 24   | ...      | 30    | ...      | 36    | ...      | 42    |  | 48    |
| 1971    |  |          |       |          | 35    | 36...    | 41    |  |       |
| 1972    |  |          |       |          | 34    | ...36... | 40    |  |       |
| 1973    |  |          |       |          | 32    | ...36... | 39    |  |       |
| 1974    |  |          |       |          | 33    | ...36... | 38    |  |       |
| 1975    |  |          |       |          | 32    | ...36    | 37    |  | 43    |
| 1976    |  |          |       |          | 31    | ...      | 36    |  | 42    |

Tab. 28: Grundlage zur Erstellung der Übergangsmatrix Alter 36 a bis 42 a

| SKZ | 1    | 1,1  | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2    | 2,1  | 2,2  | 2,3  | 2,4 | 2,5  | 2,6 | 2,7  | 2,8 | 2,9  | 3 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 4 |
|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 1   | 70,7 | 3,4  | 0   | 0   | 0   | 2,9 | 4,3 | 4,3  | 7,2  | 0,5  | 0    | 1    | 2,4  | 0    | 0   | 2,4  | 0,5 | 0    | 0,5 | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,1 |      | 53,8 | 0   | 0   | 0   | 0   | 7,7 | 7,7  | 15,4 | 0    | 0    | 0    | 7,7  | 0    | 0   | 7,7  | 0   | 0    | 0   | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,2 |      |      | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,3 |      |      |     | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -   | -    | -   | -    | -   | -    | - | -   | -   | -   | -   | - |
| 1,4 |      |      |     |     | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -   | -    | -   | -    | -   | -    | - | -   | -   | -   | -   | - |
| 1,5 |      |      |     |     |     | 75  | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 25   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,6 |      |      |     |     |     |     | 70  | 20   | 0    | 0    | 10   | 0    | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,7 |      |      |     |     |     |     |     | 61,5 | 11,5 | 3,8  | 3,8  | 11,5 | 0    | 0    | 0   | 7,7  | 0   | 0    | 0   | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,8 |      |      |     |     |     |     |     |      | 76,5 | 0    | 0    | 0    | 0    | 5,9  | 0   | 5,9  | 0   | 11,8 | 0   | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 1,9 |      |      |     |     |     |     |     |      |      | 55,6 | 0    | 0    | 0    | 11,1 | 0   | 0    | 0   | 22,2 | 0   | 11,1 | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2   |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      | 33,3 | 33,3 | 33,3 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,1 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      | 66,7 | 0    | 0    | 0   | 33,3 | 0   | 0    | 0   | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,2 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      | 100  | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,3 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      | -    | -   | -    | -   | -    | -   | -    | - | -   | -   | -   | -   | - |
| 2,4 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      | -    | -   | -    | -   | -    | -   | -    | - | -   | -   | -   | -   | - |
| 2,5 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     | 0    | 0   | 100  | 0   | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,6 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |      | 40  | 40   | 20  | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,7 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |      |     | 75   | 25  | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,8 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |      |     |      | 100 | 0    | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 2,9 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |      |     |      |     | 100  | 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 3   |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |      |     |      |     |      | 0 | -   | -   | -   | -   | - |
| 3,1 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |      |     |      |     |      |   | -   | -   | -   | -   | - |
| 3,2 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |      |     |      |     |      |   |     | -   | -   | -   | - |
| 3,3 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |      |     |      |     |      |   |     |     | -   | -   | - |
| 3,4 |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |      |     |      |     |      |   |     |     |     | -   | - |
| 4   |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |      |     |      |     |      |   |     |     |     |     | - |

Tab. 29: Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix; Alter 43 a bis 46 a

z. B. Brücken, welche 1966 errichtet wurden, für das Alter von 36 Jahren die SKZen aus der HP aus dem Jahr 2000 zugeordnet werden (tatsächliches Alter im Jahr 2000 ist 34). Für die SKZ der Brücken im Alter von 42 Jahren wird entsprechend vorgegangen. Darauf aufbauend wird entsprechend Tabelle 26 eine Übergangsmatrix aufgestellt, die den Übergang vom Bauwerksalter 36 Jahren nach 42 Jahre repräsentieren soll. Die Matrix ist in Tabelle 29 zu finden. Auch hier erkennt man, wie schon in Tabellen 21 und 22, dass der eingenommene Zustandsraum größer ist als nur der nächstgelegene Zustand. Zudem bestätigt die Matrix durch deren Lücken und Nullübergänge, dass der Datenbestand zu gering ist, um genaue Aussagen treffen zu können. Auch der bedeutungsvolle Bereich der Substanzkennzahlen von  $SKZ = 1,5$  bis  $SKZ = 1,9$  (wie in Tabellen 24 bis 27 bereits hervorgehoben) unterscheidet sich nur geringfügig von den Ergebnissen in Tabellen 24 bis 27. Anhand dieser Auswertungen muss festgehalten werden, dass an dieser Stelle mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Daten keine weiteren Erkenntnisse getroffen werden können. Die Optimierung der Übergangswahrscheinlichkeiten ist auf Grund des zu großen Betrachtungsintervalls von sechs Jahren nicht möglich, da viele Brücken in diesem Zeitraum eine Verschlechterung von mehreren Zuständen erfahren. Um zu untersuchen, wie sich die Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen bei kleineren Betrachtungsintervallen ändern, muss der Datenbestand erweitert werden.

## 6 Künstliche Erweiterung des Datenbestands aus SIB-Bauwerke

In Kapitel 5.2 wurde bereits der Datenbestand der SIB-Bauwerke aus Nordrhein-Westfalen und Thüringen vorgestellt. Dabei war schon festgestellt worden, dass der Umfang für aussagekräftige Auswertungen zu gering ist. Dies betrifft vor allem Daten bzw. Brücken eines gemeinsamen Jahrgangs. Von großem Interesse ist des Weiteren die Zustandsentwicklung bzw. sind die Übergangswahrscheinlichkeiten einzelner Klassen in einem Zeitintervall, das kleiner ist als jenes, das in den vorhandenen Daten von SIB-Bauwerke gegeben ist.

Da es innerhalb des Projekts nicht möglich ist zusätzliche Datenfelder aus weiteren Bundesländern zur Auswertung heranzuziehen, wird anhand der

bisherigen Erkenntnisse die Rückrechnung der vorhandenen Daten vorgenommen.

### 6.1 Rückrechnung auf Grundlage der S-Shape-Funktion

Als Ansatz für die Rechnung wird die in den Kapiteln 5.4.6 und 5.4.7 ausgearbeitete S-Shape-Funktion zugrunde gelegt:

Die Aufgabe ist es eine Zustandsfunktion für ein konkretes Brückenbauwerk zu finden. Dafür wird die Annahme getroffen, dass alle Bauwerke eine ähnliche Zustandsentwicklung entsprechend dem theoretischen Verlauf der S-Shape-Funktion durchlaufen. Dabei ist klar, dass der Verlauf variierbar sein muss, um ihn an die individuelle Substanzkennzahlen nach Prüfung anpassen zu können.

Hierfür wird als Annahme getroffen, dass sich die Funktion einer jeder Brücke als Linearkombination der theoretischen Verläufe der S-Shape-Funktion nach Kapitel 5.4.6, deren 0,95-Quantil-Werte und einer weiteren Funktion ergibt, die es vermag, Brücken mit quasi idealen Voraussetzungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit zu beschreiben. Letztere wurde anhand einer weiteren Parameterstudie entwickelt, für die alle „Brücken“ mit idealen Parameterkombinationen ausgewertet wurden, deren Zustandsentwicklung so gutmütig verläuft, dass die Substanzkennzahl  $SKZ = 4,0$  frühestens im Alter von 150 Jahren erreicht wird. Die Annahme für letztere Funktion wird dadurch gerechtfertigt, dass unter der Berücksichtigung von Sicherheiten in der Bemessung und auf der sicheren Seite liegenden Annahmen während der Planung die Nutzungsdauer einzelner Brücken beträchtlich mehr als 100 Jahre betragen kann. Dennoch wurde diese Annahme lediglich grob abgeschätzt. Der Ausschnitt dieser Funktion im Betrachtungszeitraum bis 120 Jahren ist in Bild 17 unten (grauer Funktionsverlauf) und in Bild 20 als Funktion  $f_3$  gezeichnet. Erwähnenswert ist, dass die Funktion im Alter von 120 Jahren nur die Substanzkennzahl  $SKZ = 2,7$  erreicht. Die  $SKZ = 4,0$  würde somit erst mit einem Alter von 200 Jahren eintreten.

Die mathematische Formulierung der Linearkombination für einen individuellen Zustandsverlauf  $f(t)$  lautet somit:

$$f(t) = X_1 \cdot f_1(t) + X_2 \cdot f_2(t) + X_3 \cdot f_3(t) \quad (11)$$



- $f_1(t)$  Funktion der 0,95 %-Quantil-Werte der theoretischen S-Shape-Funktion über die Zeit  $t$
- $f_2(t)$  S-Shape-Funktion nach Kapitel 5.4.7
- $f_3(t)$  Funktion der Brücken mit SKZ ( $t < 150a$ )  $< 4,0$
- $X_1; X_2; X_3$  Wichtungparameter der Funktionen  $f_1; f_2$  und  $f_3$

Die Verläufe der Funktionen sind nochmals in Bild 20 zu finden. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass der Verlauf der 0,95-Quantil-Werte im Intervall zwischen 7 und 120 Jahren

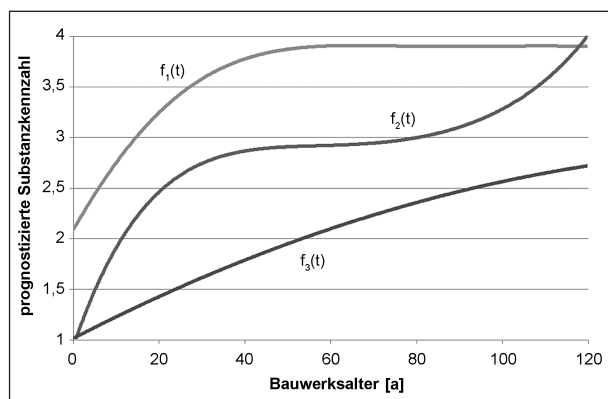


Bild 20: Schaubilder der Funktionsverläufe  $f_1; f_2$  und  $f_3$

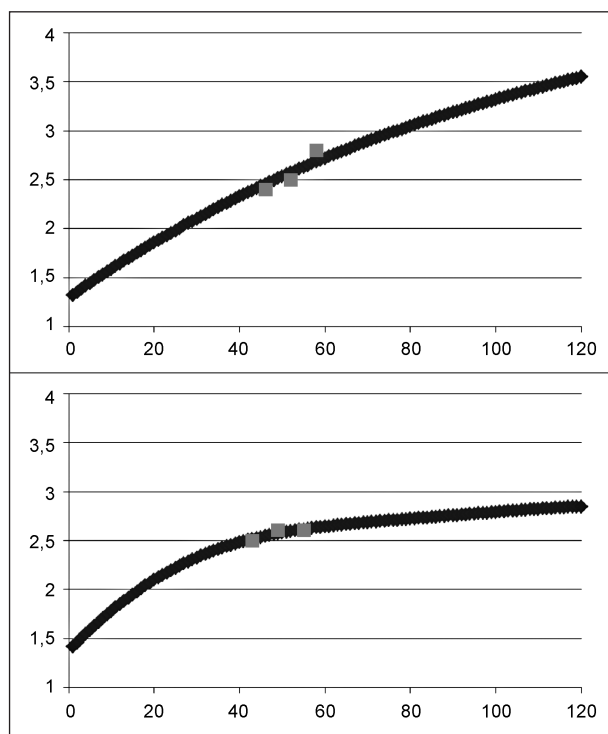


Bild 21: Funktionsverläufe der optimierten Zustandsfunktionen für fiktive Beispiele

angepasst wurde, sodass in diesem Bereich vereinfachend ein konstanter Verlauf von  $SKZ \approx 3,8$  angenommen wurde. Dies berücksichtigt die Tatsache, dass keine Verbesserungen der SKZ (Instandsetzungen, Instandhaltungen) berücksichtigt werden.

Mit dem Ansatz nach Gleichung (11) und den Daten aus SIB-Bauwerke ist nun eine Rückrechnung der Daten möglich:

Das zur Verfügung gestellte Datenfeld der SIB-Bauwerke beinhaltet für jedes Bauwerk unter anderem die Substanzkennzahlen der Jahre 2000, 2007 und 2013, d. h. Bewertungen aus drei Prüfungen. Anhand der drei Wertepaare (SKZ und Bauwerksalter) kann nun mit dem Ansatz in Gleichung (6) eine Parameterschätzung für die Wichtungparameter  $X_1, X_2$  und  $X_3$  erfolgen. Dabei muss die Vorgabe erfüllt sein, dass die Funktion  $f(X_1; X_2; X_3; t)$  den Verlauf so approximiert, dass die Funktion bestmöglich an die drei Prüfungsergebnisse angepasst wird. Damit geht die Parameterschätzung in ein Optimierungsproblem unter Randbedingungen über.

Die Lösung des Optimierungsproblems wird an dieser Stelle durch Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate gefunden. Der Ansatz der Methode der kleinsten Quadrate basiert auf dem Gedanken, die quadratischen Differenzen zwischen beobachtetem Wert und dem geschätzten Wert auf ein Minimum zu senken.

Die Umsetzung des Lösungsansatzes erfolgt in Microsoft Excel 2010 über das Solver-Add-In der Firma Frontline Systems, Inc. Aufgrund der Formulierung des Problems ist eine nichtlineare Optimierung erforderlich. Dies wird im Solver-Add-In als Lösungsmethode GRG-Nichtlinear berücksichtigt.

Bild 21 gibt einen Eindruck über die Lösung des Optimierungsverfahrens anhand fiktiver Substanzkennzahlen bzw. Prüfungszeitpunkten.

## 6.2 Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten für die erweiterte Datenbasis

Anhand der im vorherigen Kapitel beschriebenen Systematik wird der vorhandene Datenbestand von SIB-Bauwerke aus Nordrhein-Westfalen und Thüringen künstlich erweitert, indem die Rückrechnung der Substanzkennzahlen über die Optimierung erfolgt.

Dabei wird innerhalb dieser Untersuchung nur die Bauteilgruppe Überbau betrachtet. Nach Filterung können 746 Brücken als Ausgangsdatenbestand verwendet werden. Wiederum wird all diesen Brücken eine freie Alterung unterstellt. Einen Überblick über die Alterszusammensetzung der Brücken gibt Tabelle 30.

Die Rückrechnung erfolgt auf die Jahre 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46, 49, 52 und 55. Für einige Brückenbauwerke, deren Bewertungen starke Sprünge in der Prüfreihe aufzeigen, wird durch die Optimierung nur punktuell ein optimaler Zustandsverlauf errechnet. Diese Brücken wurden für anschließende Auswertungen in Übergangswahrscheinlichkeiten nicht berücksichtigt.

| Baujahr   | Anzahl |
|-----------|--------|
| < 1900    | 3      |
| 1900-1909 | 0      |
| 1920-1929 | 1      |
| 1930-1934 | 0      |
| 1935-1939 | 14     |
| 1940-1944 | 0      |
| 1945-1949 | 3      |
| 1950-1954 | 9      |
| 1955-1959 | 26     |
| 1960-1964 | 30     |
| 1965-1969 | 136    |
| 1970-1974 | 71     |
| 1975-1979 | 64     |
| 1980-1984 | 65     |
| 1985-1989 | 114    |
| 1990-1994 | 102    |
| 1995-1999 | 65     |
| 2000-2009 | 43     |

Tab. 30: Altersverteilung der Brücken für die Rückrechnung der Substanzkennzahl der Bauteilgruppe Überbau

Insgesamt wird der Zustandsraum entsprechend den Überlegungen in Kapitel 5.5.3 begrenzt. Nach den Erkenntnissen in Kapitel 5.5.5 ist es notwendig den Betrachtungszeitraum zu verringern. Daher wurde die Hälfte des Intervalls für die Hauptprüfung nach DIN 1076 gewählt. Tabellen 31 bis 39 zeigen die Auszüge der Übergangswahrscheinlichkeiten auf Grundlage des Drei-Jahre-Intervalls vom Lebensjahr 28 bis 55. In der Auswertung wurden jeweils nur die Brücken berücksichtigt, deren Alter zum Zeitpunkt des ersten Prüftermins in SIB-Bauwerke mit dem Betrachtungsjahr, in welches eine jede Auswertung übergeht, übereinstimmt. Prognostizierte SKZ-Verläufe jüngerer Brücken, d. h. Vorrechnungen, werden nicht aufgenommen.

Die Tabellen zeigen, dass sich der eingenommene Zustandsraum Größtenteils auf denselben oder auf den nächst höheren Zustand beschränken. Mindestens 80 % aller Brücken gehen in dem Betrachtungsintervall maximal in den nächst höheren Zustand über oder verbleiben im Ausgangszustand. In einigen Fällen geht ein geringer Anteil der Bauwerke direkt in die übernächsten Zustände über, wobei dies mit maximal 8 % in Tabelle 31 nahezu vernachlässigbar ist. Nur vereinzelt sind Zustandsprünge von mehr als sechs Zuständen vorhanden und dann auch nur von geringfügiger Größe (maximal 12 % in Tabelle 36). In Anbetracht dieser Ergebnisse treffen die Annahmen nach [REALE, T.; O'CONNOR, A., 2012] zu. Eine Optimierung mit der Kreuz-Entropie auf Grundlage der Normalverteilung wäre mit dem Datenbestand wesentlich besser durchführbar.

Zuletzt muss dem Verfahren der Rückrechnung angemerkt werden, dass nach deren Durchführung nur geringe Anzahlen an Brücken den einzelnen Ausgangszuständen zugehörig sind, sodass Unsicherheiten bei den Ergebnissen vorhanden sind.

| $P_{ij}$ [%] | Substanzkennzahl |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|              | 1,5              | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| $P_{1,5/j}$  | 33               | 67  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,6/j}$  |                  | 65  | 33  | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,7/j}$  |                  |     | 41  | 56  | 3   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,8/j}$  |                  |     |     | 50  | 50  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,9/j}$  |                  |     |     |     | 33  | 67  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

Tab. 31: Auszug der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix; Alter 28 a bis 31 a

|              | Substanzkennzahl |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p_{ij}$ [%] | 1,5              | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| $P_{1,5/j}$  | 25               | 75  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,6/j}$  |                  | 14  | 86  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,7/j}$  |                  |     | 32  | 63  | 3   | 0   | 3   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,8/j}$  |                  |     |     | 50  | 42  | 8   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,9/j}$  |                  |     |     |     | 62  | 23  | 8   | 8   | 0   | 0   | 0   |

Tab. 32: Auszug der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix; Alter 37 a bis 40 a

|              | Substanzkennzahl |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p_{ij}$ [%] | 1,5              | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| $P_{1,5/j}$  | 25               | 75  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,6/j}$  |                  | 29  | 69  | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,7/j}$  |                  |     | 52  | 48  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,8/j}$  |                  |     |     | 65  | 35  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,9/j}$  |                  |     |     |     | 75  | 25  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

Tab. 33: Auszug der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix; Alter 31 a bis 34 a

|              | Substanzkennzahl |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p_{ij}$ [%] | 1,5              | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| $P_{1,5/j}$  | 25               | 75  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,6/j}$  |                  | 50  | 50  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,7/j}$  |                  |     | 33  | 67  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,8/j}$  |                  |     |     | 67  | 27  | 6   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,9/j}$  |                  |     |     |     | 56  | 39  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

Tab. 34: Auszug der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix; Alter 40 a bis 43 a

|              | Substanzkennzahl |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p_{ij}$ [%] | 1,5              | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| $P_{1,5/j}$  | 50               | 33  | 0   | 0   | 17  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,6/j}$  |                  | 30  | 70  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,7/j}$  |                  |     | 68  | 30  | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,8/j}$  |                  |     |     | 64  | 32  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,9/j}$  |                  |     |     |     | 36  | 55  | 0   | 0   | 0   | 9   | 0   |

Tab. 35: Auszug der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix; Alter 34 a bis 37 a

|              | Substanzkennzahl |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p_{ij}$ [%] | 1,5              | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| $P_{1,5/j}$  | 0                | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,6/j}$  |                  | 0   | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,7/j}$  |                  |     | 0   | 88  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 12  |
| $P_{1,8/j}$  |                  |     |     | 22  | 70  | 4   | 4   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,9/j}$  |                  |     |     |     | 54  | 46  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

Tab. 36: Auszug der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix; Alter 43 a bis 46 a

|              | Substanzkennzahl |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p_{ij}$ [%] | 1,5              | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| $P_{1,5/j}$  | -                | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| $P_{1,6/j}$  |                  | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,7/j}$  |                  |     | 60  | 40  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,8/j}$  |                  |     |     | 62  | 38  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,9/j}$  |                  |     |     |     | 80  | 20  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

Tab. 37: Auszug der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix; Alter 46 a bis 49 a

|              | Substanzkennzahl |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p_{ij}$ [%] | 1,5              | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| $P_{1,5/j}$  | -                | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| $P_{1,6/j}$  |                  | 0   | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,7/j}$  |                  |     | 0   | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,8/j}$  |                  |     |     | 29  | 71  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,9/j}$  |                  |     |     |     | 44  | 44  | 11  | 0   | 0   | 0   | 0   |

Tab. 38: Auszug der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix; Alter 49 a bis 52 a

|              | Substanzkennzahl |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p_{ij}$ [%] | 1,5              | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| $P_{1,5/j}$  | -                | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| $P_{1,6/j}$  |                  | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| $P_{1,7/j}$  |                  |     | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| $P_{1,8/j}$  |                  |     |     | 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| $P_{1,9/j}$  |                  |     |     |     | 83  | 167 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

Tab. 39: Auszug der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix; Alter 52 a bis 55 a

### 6.3 Beurteilung des Rückrechnungsverfahrens

Das in Kapitel 6.1 beschriebene Verfahren ist ein einfacher Ansatz zur Rückrechnung der Substanzkennzahlen.

Bei der Rückrechnung der vorhandenen Daten von SIB-Bauwerke war es der Fall, dass auf Grund der geringen Anzahl an Datenpunkte je Bauwerk (nur 3 Prüfungen) bezogen auf die Anzahl an möglichen Datenerhebungen im gesamten Betrachtungszeitraum von 120 Jahren (mindestens 40) für die Zielfunktion die Teilfunktionen  $f_1$  und  $f_2$  maßgebend wurden. Die Teilfunktion  $f_2$ , die theoretische S-Shape-Funktion, hat im Großteil der Datenbestände nur einen sehr geringen Einfluss auf den Verlauf, d. h. der Parameter  $X_2 \rightarrow 0$ . Erst bei einer größeren Anzahl an Substanzkennzahlen wird die Funktion  $f_2$  an der Zustandsfunktion  $f$  stärker einbezogen.

Für eine genauere Beschreibung des Zustandsverlaufs sind aber weitere Verfeinerungen sinnvoll:

Um die Ausgangssituation (Zeitpunkt  $t = 0$ ) entsprechend Bild 10 zu berücksichtigen, könnte eine Zufallszahl, die einen Wertebereich zwischen 1,0 und 2,0 für den Zeitpunkt  $t = 0$  abdeckt in die Optimierung als zusätzliche Randbedingung eingehen. Diese Maßnahme könnte dann gewissermaßen als Vorschädigungen von Bauwerken infolge Bemessungs- oder Ausführungsfehlern in den Zustandsverlauf mit einfließen. Dazu sind aber in weiterer Forschungsarbeit die Wertebereiche der Zufallszahl für unterschiedliche Brückenklassen zu bestimmen. Auch hier könnte es sinnvoll sein, sich an der Klassifizierung nach Kapitel 5.4.8 zu orientieren. Insgesamt ist es dann möglich den gesamten Berechnungsansatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher S-Shape-Funktionen und initialen

Zufallswerten für getrennte Brückenklassen aufzustellen.

Des Weiteren könnte eine Teilung des Betrachtungszeitraums eingeführt werden. Dies hätte zum Vorteil, dass große Sprünge der Substanzkennzahlen in der Zeitreihe von aufeinanderfolgenden Prüfungen wesentlich besser optimiert werden könnten, bzw. dass zu große Abweichungen vermieden werden. Dann muss aber im Weiteren entschieden werden, welche Übergangsbedingungen in den Sprüngen gelten und in welchen Intervallen Sprünge approximiert werden.

Zuletzt wird auf eine andere Möglichkeit für die Verwendung des Optimierungsverfahrens hingewiesen, nämlich dass sie nicht nur für die Rückrechnung verwendet werden könnte, sondern auch für eine individuellere Prognose des künftigen Zustandsverlaufs herangezogen werden könnte.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Projekts wurde ein Konzept entwickelt, das als Grundlage für ein Prognosemodell der zeitlichen Zustandsentwicklung und der damit einhergehend Schadensumfangsentwicklung von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken dienen kann. Dazu werden drei Teilbereiche untersucht, die gemeinsam haben, dass sie der Systematik der Zustandsbewertung nach DIN 1076 und RI-EBW-PRÜF folgen.

Ein Bereich ist die Untersuchung der theoretischen Modellierung der Schadensumfangsentwicklung. Hierbei wird ein Modell angestrebt, das maßgeblich auf den bereits bewährten Markov-Ketten basiert, welche den Zustandsverlauf einer Brücke auf Bauwerksebene beschreiben, in Verbindung mit Ingenieurmodellen in Form von Schädigungs-Zeit-Gesetzen. Dabei wird gezeigt, inwieweit die Markov-Ketten, bzw. deren Übergangswahrscheinlichkeiten mit S-Shape-Funktionen und somit mit Schädigungsmodellen, die einen Einzelschaden auf Bauteilebene beschreiben und deren zeitlichen Entwicklung zusammenhängen. Dabei entpuppen sich die S-Shape-Funktionen als Verbindungsstelle der beiden Prognose-Modelle; Markov-Ketten einerseits und Schädigungs-Zeit-Gesetze andererseits (d. h. die Verbindung des Modells auf Bauwerksebene und der Modelle auf Bauteilebene). Zudem

werden grundlegende Untersuchungen zu den S-Shape-Funktionen hinsichtlich deren theoretischer Verläufe durchgeführt und eine Grundlage für weiterführende Untersuchungen zu dieser Thematik bereitgestellt.

Aus den geführten Untersuchungen ergeben sich unterschiedliche Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen:

- Zustandsentwicklung des Einzelschadens auf Bauteilebene

Für deren Prognose und Einarbeitung in ein Modell auf Bauwerksebene ist es notwendig, weitere Modelle für die Depassivierung infolge Chlorideindringung und Karbonatisierung und die Bewehrungskorrosion zu untersuchen und deren Genauigkeit zu validieren; z. B. Modelle für gerissenen Beton. Des Weiteren müssen andere Schädigungsmechanismen und deren Schädigungsmodelle, wie z. B. die Schädigung infolge Frost-Tau-Wechsel, in die entwickelte Systematik mit aufgenommen werden. Hinsichtlich der Interaktion der einzelnen Schädigungen besteht derzeit größter Forschungsbedarf. Wie in Kapitel 4 ersichtlich wird, sind zu deren Berücksichtigung nur sehr wenige Modelle vorhanden bzw. für die Anwendung innerhalb dieser Methodik nicht geeignet.

- Verlauf der S-Shape-Funktionen

In diesem Bereich sind die Verläufe für unterschiedliche Brückenklassen zu untersuchen. Dabei sind unter anderen die Brückenklassen entsprechend der in Kapitel 5.4.8 zusammengestellten Eigenschaften zu wählen. Die unterschiedlichen Funktionsverläufe allein könnten schon als erste Einschätzung für die Zustandsentwicklung einer Brücke herangezogen werden.

- Zusammenhang zwischen Übergangswahrscheinlichkeiten nach Markov- und Schädigungs-Zeit-Gesetzen

Weitere Forschung ist auch notwendig für die Übertragung des theoretischen Verlaufs der S-Shape-Funktionen in inhomogene Übergangswahrscheinlichkeiten und somit der Schädigungs-Zeit-Gesetze in eben diese. Hierfür ist der Algorithmus zu finden, in welchen zeitlichen Abhängigkeiten die Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen stehen. Daraus könnte

letzten Endes die Wahrscheinlichkeit aller Zustände über die Zeit hinweg aufgestellt werden und eine Prognose auf Grundlage der Markov-Prozesse aufgestellt werden. Damit wäre ein Prognosemodell für den theoretischen Zustandsverlauf komplett.

Ein anderer Teilbereich des Projekts ist die Auswertung der Datenfelder aus SIB-Bauwerken aus den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Thüringen. Auch hierfür wurde als Grundlage die Methodik der Markov-Ketten bzw. -Prozesse gewählt. Aus den Datenfeldern wurden die Übergangswahrscheinlichkeiten aufgestellt um deren zeitliche Abhängigkeit zu untersuchen und der Möglichkeit einer systematischen Optimierung nachzugehen. Dabei können die folgenden Erkenntnisse festgehalten werden: Das zur Verfügung gestellte Datenfeld mit ca. 2.000 Brückendaten von drei Prüfungszeitpunkten ist für eindeutige Erkenntnisse zur gering. Dabei ist vor allem die Ungewissheit anzuführen, ob die Brücken innerhalb ihrer bisherigen Lebensdauer schon instandgesetzt wurden oder nicht. Das Betrachtungsintervall im 6-Jahre-Rythmus entsprechend der durchzuführenden Hauptprüfung nach DIN 1076 ist zu groß, um eine sinnvolle Optimierung der Übergangswahrscheinlichkeiten durchzuführen, da nicht vernachlässigbare Anteile an Brückenbauwerken innerhalb dieser Zeitspanne Verschlechterungen von mehreren Zuständen erfahren. Dabei wird gezeigt, dass die Halbierung des Intervalls auf 3 Jahre ausreichend genau ist.

Hinsichtlich weiterer Forschungsvorhaben sind aber einige Ansatzpunkte zu nennen:

- Zusammenstellung eines bundesweiten Datenfeldes

Um eindeutige Aussagen auf Grundlage der Auswertung von Realdaten treffen zu können, muss ein wesentlich größeres Datenfeld bereitgestellt werden. Ideal wäre eine Zusammenstellung sämtlicher Daten aus SIB-Bauwerke auf Bundesebene. Hierbei muss versucht werden, Daten von instandgesetzten Brücken herauszufiltern, um nur frei gealterte Brücken beurteilen zu können, da die Wirksamkeit von Instandsetzungsmaßnahmen nur sehr schwer objektiv zu beschreiben ist. An einem solchen Datenbestand kann die Aufstellung der

Übergangswahrscheinlichkeiten anhand von Brückenklassen eindeutige Erkenntnisse bringen.

- Optimierung der Übergangswahrscheinlichkeiten

Mit der Erkenntnis, dass mit kleinerem Betrachtungsintervall der eingenommene Zustandsraum stark beschränkt wird, wird die Optimierung der einzelnen Übergangswahrscheinlichkeiten ermöglicht. In [REALE, T.; O'CONNOR, A., 2012] wird als Zielfunktion die Normalverteilung, d. h. eine stetige Verteilungsfunktion, vorgeschlagen. Die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Zustände (Ausprägungen) sind aber eindeutig bestimmbar und müssen nicht für ein Intervall angegeben werden. Demnach sind die Übergangswahrscheinlichkeiten diskret, sodass auch eine diskrete Verteilungsfunktion sinnvoll ist. Der Anschauung nach kommen entweder geometrische Verteilungen oder Binomialverteilungen infrage. Die Anwendung der Verteilungen auf die Übergangswahrscheinlichkeiten ist in weiteren Forschungsvorhaben zu prüfen.

Der letzte Teilbereich des Projekts besteht aus der Verbindung der theoretischen Untersuchungen und der daraus entsprungenen Modelle mit der Auswertung der Realdaten. Grundlage für die Verbindung der Teilbereiche sind zwei Anknüpfungspunkte: Dies ist zum einen dieselbe Systematik der Schadens- und Zustandsbewertung nach DIN 1076 und RI-EBW-PRÜF für beide Teilbereiche, (theoretische Untersuchungen und Auswertung von Realdaten) und zum anderen die Verwendung eines gemeinsamen Prognose-Modells, hier die Markov-Ketten bzw. -Prozesse, das als gemeinsames Fundament dient. Darauf aufbauend wird im Projekt die Rückrechnung der Substanzkennzahlen der vorhandenen Datenfelder aus SIB-Bauwerke durchgeführt, um das Datenfeld künstlich zu erweitern. Dadurch kann gezeigt werden, dass ein 3-Jahres-Intervall für weitere Untersuchungen der Übergangswahrscheinlichkeiten praktikabel ist.

Weitere Ansatzpunkte ist diesem Teilbereich für weitere Forschung sind:

- Erarbeitung der Anfangsverteilung

Von großem Nutzen sind Untersuchungen bezüglich der Anfangsverteilung von Brücken.

Hierzu sind sämtliche Brückenprüfungen zum Zeitpunkt der Bauwerksabnahme bzw. in unmittelbarerem zeitlichen Abstand nach Freigabe auszuwerten inwieweit Vorschädigungen durch Bemessungs- und Ausführungsfehler vorhanden sind. Dazu müssen auch Prüfprotokolle, die nicht auf Grundlage der aktuellen DIN 1076 erstellt wurden, auf die heute gängige Zustandsbenotung aktualisiert werden.

- Zahlenmäßige Erfassung nicht modellierbarer Schädigungen und Eigenschaften

Der Vergleich der Verläufe von Bewertungen von Brückenprüfern einzelner Brückenklassen mit den theoretischen Zustandsverläufen auf Basis von Schädigungsmodellen unter klassenspezifischen Parametern könnte den Einfluss von Änderungen in Bemessung, konstruktiver Durchbildung und nicht berücksichtigter Schädigungsmechanismen zahlenmäßig hervorbringen. Dies könnte durch S-Shape-Funktionen, aber auch mit Übergangswahrscheinlichkeiten durchgeführt werden.

## 8 Literatur

- AHRENS, M.; STANGENBERG, F.: Simulierte Alterung, RUBIN Sonderforschungsbereich 398, 2009
- BERGMEISTER, K.; SANTA, U.: Brückeninspektion und -überwachung. Betonkalender 2004, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2004
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Verkehrsinvestitionsbericht 2010, 2011
- BOGDANOFF, J.: A new cumulative damage model: part 1. Journal of Applied Mechanics, 1978
- CESARE, M.; SANTANMIRNA, C.; TURKSTRA, C.; VANMARCKE, E.: Modeling Bridge Deterioration with Markov Chains. Journal of Transportation Engineering, 1992
- COLDITZ, B.: Bedeutung der Bauwerksprüfung für die Brückenertüchtigung, 23. Zusammenkunft der Ingenieurinnen/Ingenieure der Bauwerksprüfung am 11. und 12.09.2012 in Fulda, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Downloadbereich: [www.brueckenertuechtigung.de](http://www.brueckenertuechtigung.de), abgerufen am 1. März 2012
- DIN 1076 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen; Überwachung und Prüfung. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- FENCHEL, M.; MÜLLER, H. S.: Sulfatangriff auf Beton – Mechanismen und Prognosemodell. In: CD-Beitrag P2.76 zur 17. Int. Baustofftagung (ibausil), 23.-26. September 2009, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar, 2009
- FINGER, A.; MEILI, M.: Dauerhaftigkeit von offenen Holzbrücken. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Abteilung Holz: Forschungs- + Arbeitsberichte, Dübendorf EMPA, 2002
- FISCHER, C.: Auswirkung der Bewehrungskorrosion auf den Verbund zwischen Stahl und Beton, Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, 2012
- FRANGOPOULOS, D.; NEVES, L. C.: Modelling Life-Cycle Performance of Infrastructure under Uncertainty: Emphasis on Condition and Safety Profiles. Chapter 12 in Soft Computing Methods for Civil and Structural Engineering; Saxe-Coburg Publications, Stirling, Scotland, 297-312, 2011
- GEHLEN, C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Heft 510 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Beuth Verlag, 2000
- GEROLD, M.: Holzbrücken am Weg. Bruder-verlage, Karlsruhe, 2001
- GONZALES, J. A. et al.: Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement, Cement and Concrete Research 25, S. 257-264, 1995
- HAARDT, P.: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbauwerke, Heft B 22, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, 1999
- HAARDT, P.: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von Brücken- und Ingenieurbauwerken. Schlussbericht zum AP-Projekt 97244, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 25, Bergisch Gladbach, 1998

- HEMMERT-HALSWICK, A.: Erfahrungssammlung: Schäden an Stahlbrücken – wetterfeste Stähle – Seile. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbauwerke, Heft B 45, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, 2004
- HOLST, R.: Entwicklung eines Brücken-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufe 3 – Schlussbericht zum AP-Projekt 02 244/B4, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2005
- HUNKELER, F.; von MATT, U.; WERNER, R.: Spannglieder, Schrägseile und Anker – Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden. Eigenössisches Departement für Umwelt, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, Forschungsauftrag AGB2000/470, 2005
- JIANG, Y.; SINHA, K. C.: Bridge service life prediction model using the Markov chain. Transportation Transportation Research Board, Washington, D.C., 24-30, 1989
- KASCHNER, R.; BUSCHMEYER, W.; SCHNELLENBACH-HELD, M.; LUBASCH, P.; GRÜNBERG, J.; HANSEN, M.; LIEBIG, J.; GEIßLER, K.: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 68, Bergisch Gladbach, 2009
- KÖNKE, C.: Schädigungssimulationsverfahren zur Lebensdauerabschätzung von Tragwerken, Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1999
- KÜCHLER, M.: Instandsetzung von Betontragwerken. Beton-Kalender 2013, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2013
- MASOVIĆ, S.; HAJDIN, R.: Modeling of bridge elements deterioration for Serbian bridge inventory, Structure and Infrastructure Engineering, Taylor & Francis, 2013
- McGEE, R.: Modelling of durability performance of tasmanian bridges. In: MELCHERS, R.E.; STEWART, M.G., editors. ICASP8 applications of statistics and probability in civil engineering, vol. 1, 1999
- MINER, M. A.: Cumulative damage in fatigue. Transactions AMSE A 62 (3), 159-164, 1945
- MÜLLER, H. S.; KVIITSEL V.: Kriechen und Schwinden von Beton – Grundlagen der neuen DIN-1045 und Ansätze für die Praxis. Beton und Stahlbetonbau 97, Heft 1, S. 8-19, 2002
- MÜLLER, H. S.; BOHNER, E.: Rissbildung infolge Bewehrungskorrosion Mechanismen und Prognosemodelle, Beton- und Stahlbetonbau Vol. 107, Ernst & Sohn Verlag, 2012
- NAUMANN, J.: Brückenertüchtigung jetzt – Ein wichtiger Beitrag zur Sicherung der Mobilität auf Bundesfernstraßen. DBV-Heft 22, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V., Berlin, 2011
- PARIS, P.; ERDOGAN, F.: A critical analysis of crack propagation laws, Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, pp. 528-534, 1963
- PEERLINGS, R. H. J.: Enhanced damage model for fracture and fatigue. Technische Universität Eindhoven, 1999
- PETERSON, L.: Einfluss baustofflicher Schädigungsprozesse auf das Tragverhalten von Stahlbetonbauwerken, Dissertation, Universität Hannover, Institut für Baustoffe, Berichte aus dem Institut für Baustoff, Heft 3, 2003
- PFISTER, T.: Ein Ermüdungsschädigungsmodell für Zuverlässigkeitsanalysen von Stahlbetontragwerken. Fakultät für Bauingenieurwesen. Institut für Stahlbeton- und Spannbetonbau, Ruhr-Universität Bochum, 2008
- PROSKE, D.; LIEBERWIRTH, P.; van GELDER, P.: Sicherheitsbeurteilung historischer Bogenbrücken. Sonderdruck zum 16. Dresdner Brückenbausymposium, Dirk Proske Verlag, Dresden 2006
- REALE, T.; O'CONNOR, A.: Cross-Entropy as an Optimization Method for Bridge Condition Transition Probability Determination. Journal of Transportation Engineering; Ausgabe 138, S. 741-750, 2012
- RHEINHARDT, H. W.; MIELICH, O.: A fracture mechanics approach to the crack formation in alkali-sensitive grains, Cement and Concrete Research 41, 255-262, Elsevier Science Ltd., 2012
- Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten RI-ERH-ING: Richtlinie zur einheitlichen Erfas-



sung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 RI-EBW-PRÜF, 2007-11

RI-EBW-PRÜF: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF); Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen

SARJA, A.; VESKARI, E.: Durability design of concrete structures. RILEM Report of TC 130-CSL, RILEM report series 14, E & FN Spon, 1996

SCHIEßL, P.; MAYER, T.: Lebensdauermanagementsystem – Teilprojekt A2. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. (Hrsg.): Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“ (Heft 572), Berlin, 2007

SCHNELLENBACH-HELD, M.; PEETERS, M.; MIEDZINSKIÖ, G.: Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale aus Beton. Schlussbericht, Teilprojekt „Intelligente Bauwerke“. Schlussbericht FE 15.0510/2011/DRB, 2013

SETUNGE, S.: Concrete Bridge Deterioration Prediction using Markov Chain Approach. Conference Paper, ICSECM 2011 – Kandy – Sri Lanka, 15<sup>th</sup> to 17<sup>th</sup> December 2011; <http://www.civil.mrt.ac.lk/conference>

TROST, H.: Spannungs-Dehnungs-Gesetz eines viskoelastischen Festkörpers wie Beton und Folgerungen für Stabtragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton. Beton 16, S. 233-248, 1966

VU, K. A. T.; STEWART, M.: Structural reliability of concrete bridges including improved Chloride induced corrosion models, structural Safety 22, Elsevier Science Ltd, 2000

ZILCH, K.; MAURER, R.; WEIHER, H.; BÄTJER, G.: Sicherheit von Spannbetonbrücken. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des BMVBS FE 15.0408/2004/HR. Technische Universität München und Universität Dortmund, 2005

## 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 Expositionsklasse 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 Expositionsklasse 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 € 18,50
- B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken  
Hegger, Herbrand € 17,00
- 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.
- B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken  
Müller € 15,00

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.