

Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 81

The logo for 'bast' is written in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are closely spaced and have a slight shadow effect, giving it a three-dimensional appearance. The 'b' is particularly prominent with its thick stroke.

Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse

von

Harald S. Müller
Michael Vogel
Tabea Neumann

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Universität Karlsruhe

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 81

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 beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 89.0219/2009/AP:
Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse

Projektbetreuung
Peter Haardt

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
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-86918-152-3

Bergisch Gladbach, November 2011

Kurzfassung – Abstract

Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse

Volkswirtschaftliche Gesichtspunkte beim Bau und der Unterhaltung von Brückenbauwerken erfordern ein effektives Lebenszyklusmanagement. Ein wesentliches Ziel besteht dabei in der zuverlässigen Prognose der Schadensentwicklung. Die Kenntnisse über Mechanismen und Auswirkungen einzelner dauerhaftigkeitsrelevanter Beanspruchungen bzw. Schädigungsarten ist relativ weit fortgeschritten. Demgegenüber ist das Wissen über die Wirkungsweise kombinierter auftretender Beanspruchungen an Betonbauwerken bislang unzureichend. Dies gilt auch für den Fall, dass gleichzeitig singuläre Risiken, wie beispielsweise Ausführungsmängel oder Lagerschäden vorliegen. Gerade aber kombinierte Einwirkungen und bereits vorhandene Mängel sind für massive Schäden an Brücken maßgeblich verantwortlich. Diese Problematik wurde im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie eingehend beleuchtet.

Zunächst wurden im Rahmen einer umfangreichen Literatursichtung die vorhandenen dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen auf Brücken identifiziert sowie deren mögliche Modellierung in Form von Schädigungs-Zeit-Gesetzen aufgezeigt und eingehend diskutiert.

In einem nächsten Schritt konnten die bei Brückenbauwerken vorzufindenden Interaktionen zwischen den kombiniert auftretenden dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen und singulären Risiken auf der Basis einer Literatursichtung erfasst und in Form einer Interaktionsmatrix anschaulich dargestellt werden.

Die verschiedenen Methoden zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen wurden aufgezeigt sowie die Grundzüge einer System- und Risikoanalyse vorgestellt. Anhand ausgewählter Beispiele aus der Fachliteratur wurde die prinzipielle Vorgehensweise bei unterschiedlichen Methoden zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung dargestellt. Besondere Beachtung galt dabei dem aktuellen Stand der Forschung im Umgang mit kombiniert auftretenden Einwirkungen.

Im Ergebnis der umfangreichen Literaturstudie konnte festgestellt werden, dass kombinierte Ein-

wirkungen als Problem im Bereich des Betonbrückenbaus bekannt sind, ihre Erfassung und Modellierung jedoch weder zeitvariante Schädigungs-Zeit-Gesetze noch baustofftechnologische Interaktionen berücksichtigen. Auf der Grundlage der in der Literatur gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Ansatz für eine um diese beiden entscheidenden Punkte erweiterte System- und Risikoanalyse erarbeitet. Dieser Ansatz besteht darin, über die Verwendung geeigneter Schädigungs-Zeit-Gesetze und grenzzustandsbezogener Betrachtungen Lebensdauerprognosen durchzuführen. Hierdurch wird eine wirklichkeitsnahe Beurteilung der Dauerhaftigkeit möglich. Die Interaktion der Schädigungsmechanismen wird über einen Faktor η , der die baustofftechnologischen Veränderungen des Betons infolge einer anderen Einwirkung berücksichtigt, in das Modell aufgenommen. Das erarbeitete Konzept wurde durch exemplarische computergestützte Beispielrechnungen hinsichtlich seiner Anwendbarkeit bestätigt. Bis zur Praxiseinführung dieser Methode bedarf es jedoch noch umfangreicher Ausarbeitungen und gezielter weiterführender Forschung.

Quantification of the life-cycle of concrete bridges using systems analysis methods

Economic aspects regarding building and maintaining bridge constructions call for an effective life cycle management. A substantial goal is a reliable prediction of the deterioration development. The knowledge about mechanisms and influences of individual exposures or rather deterioration processes concerning durability is highly developed as opposed to the understanding about the effects of combined exposure and already existing deficiencies. The knowledge about influences of combined exposures on durability of concrete structures however is not sufficient. This is also valid for so called "singular risks" (deficiencies in workmanship or bearing damages). Especially combined exposures and already existing deficiencies result in massive damages on bridge constructions. This complex of problems is to be analyzed within the feasibility study at hand.

An extensive literature review helped to identify and analyze the existing durability exposures on bridges as well as possible models describing the deterioration. These considerations were followed by a literature based analysis of the interactions among the combination of various exposures and singular risks which can be found on bridge constructions. The results with the possible emerging combinations are being displayed in an interaction matrix.

In a next step, the different methods to ensure and/or to ascertain the durability of concrete structures were outlined and the basics of a system and risk management were introduced. Well chosen examples from literature underline the principle procedure of the different methods helping to evaluate the durability. Special attention was paid to the present state of knowledge regarding the approach to combined exposures.

The results of the extensive literature review indicate that combined exposures are recognized as durability problems within the field of concrete bridges. But their transcription within deterioration and risk management models cannot take into account two important criteria: the time dependence of deterioration models and the changes of material properties by interacting combined exposures.

Based on the result from the literature review a new approach on an expandable system and risk management was developed taking into account those two important aspects. The new approach intends to introduce time variant deterioration models concerning the durability of concrete structures into the lifecycle prognosis. This offers the possibility to make a realistic evaluation on the durability. The interaction of the deterioration mechanisms are taken into account by implementing a scaling factor η which represents the modification of the material characteristics as a result of other exposures. This way the material specific criterion of interaction expands into the system and risk management. The feasibility of the developed concept has been verified by a computer based sample. Although a starting point has been set, extensive research has to be dealt with before the procedure can be established in practice.

Inhalt

1	Problemstellung, Ziel des Projekts und Vorgehensweise	7	5.7	Mehrfachkombinationen	19
2	Zustand der Infrastrukturbauwerke in Deutschland	7	6	Konzepte zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit	20
3	Lebenszyklusmanagement bei Infrastrukturbauwerken	8	6.1	Dauerhaftigkeitsbemessung	20
4	Einwirkungen auf Brücken	10	6.1.1	Deskriptives Konzept	20
4.1	Einwirkungen	10	6.1.2	Probabilistisches Konzept	22
4.1.1	Einwirkungen aus Umgebungseinflüssen	10	7	Risikoanalyse – Bewertung des Risikos für Systeme	23
4.1.2	Schädigungsphasen und Grenzzustände	10	7.1	Systemanalyse	23
4.2	Schädigungsprozesse – Bewehrungs- und Betonkorrosion	11	7.1.1	Systembeschreibung	23
4.2.1	Karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion	11	7.1.2	Ausfalleffektanalyse	24
4.2.2	Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion	12	7.1.3	Fehlerbaumanalyse	24
4.2.3	Frost-Tauangriff	13	7.2	Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten der Systemelemente und Analyse des Systemversagens	25
4.3	Modelle zur Beschreibung des Schädigungsfortschritts	14	7.2.1	Statischer Ansatz	25
4.3.1	Karbonatisierungsinduzierte Depassivierung	15	7.2.2	Dynamischer Ansatz	26
4.3.2	Chloridinduzierte Depassivierung	15	7.3	Quantifizierung des Risikos	26
4.3.3	Kritischer Sättigungsgrad, Frost	16	8	Berücksichtigung von kombinierten Einwirkungen im Rahmen einer Risikoanalyse	26
4.4	Parameterreduzierte Schädigungsmodelle	16	8.1	Grundsätzliche Überlegungen	26
4.5	Singuläre Risiken	17	8.2	Anwendbarkeit der Fehlerbaumanalyse im System Brückenbauwerk	26
5	Interaktionen zwischen den Einwirkungen	17	8.2.1	Modellierung der Schädigungsmechanismen als Ereignisse	26
5.1	Fall A: Karbonatisierung – Chloride ...	18	8.2.2	Modellierung der kombinierten Einwirkungen	27
5.2	Fall B: Karbonatisierung – Frost	18	8.2.3	Modellierung der Zeitvarianz	28
5.3	Fall C: Karbonatisierung – Risse	18	9	Modellierung der Interaktion kombiniert auftretender Einwirkungen	29
5.4	Fall D: Chloride – Frost	19	9.1	Prinzipielles Vorgehen	29
5.5	Fall E: Chloride – Risse	19	9.2	Programmtechnische Umsetzung	31
5.6	Fall F: Frost – Risse	19			

9.2.1	Allgemeines	31
9.2.2	Berechnung innerhalb mathematischer Grenzen	31
9.2.3	Berechnung unter Einbezug baustofftechnologischer Interaktionen	32
10	Forschungsbedarf	33
10.1	Rechnergestützte Untersuchungen ...	33
10.2	Experimentelle Untersuchungen	34
10.3	Methodische Untersuchungen	34
10.4	Systemerweiternde Unter- suchungen	34
11	Zusammenfassung	35
11.1	Untersuchung der Einwirkungen auf Brücken	35
11.2	Untersuchung der Interaktionen zwischen Einwirkungen	35
11.3	Untersuchungen zur Berücksich- tigung der Interaktionen von kombinierten Einwirkungen im Rahmen der Risikoanalyse	36
11.4	Untersuchungen zur Modellierung von Interaktionen	36
12	Literatur	36

1 Problemstellung, Ziel des Projekts und Vorgehensweise

Der Bau, der Betrieb und der Unterhalt von Brückenbauwerken aus Beton sind mit enormen Anfangsinvestitionen, aber auch erheblichen Folgekosten verbunden. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist daher ein effektives Lebenszyklusmanagement (LZM), durch das Betriebs- und Instandhaltungskosten minimiert und die Lebensdauer des Bauwerks maximiert werden können, unabdingbar. Ein wesentliches Element des LZM bildet die zuverlässige Prognose der Schadensentwicklung, welche eine Optimierung der Instandhaltungsplanung ermöglicht.

Neben direkten tragsicherheitsrelevanten Faktoren haben insbesondere auch dauerhaftigkeitsrelevante Einflüsse einen entscheidenden Anteil an Betonschäden bei Infrastrukturbauwerken. Die Kenntnis über die Mechanismen und Folgen der jeweiligen dauerhaftigkeitsrelevanten Beanspruchungen bzw. Schädigungsarten ist – jeweils für die einzelnen Schädigungsarten allein betrachtet – relativ weit fortgeschritten.

Demgegenüber ist der Wissensstand über die Wirkungsweise von kombiniert auftretenden Beanspruchungen an Betonbauwerken unvollständig. Eben diese kombinierte Beanspruchung liegt aber in der Praxis vor.

Darüber hinaus fällt eine Bewertung bzw. Prognose der Lebensdauer besonders schwer, wenn gleichzeitig singuläre Risiken, wie beispielsweise Abdichtungsmängel oder Korrosions- und Ermüdungsprobleme in Koppelfugen, vorliegen. Gerade aber kombinierte Einwirkungen und bereits vorhandene Mängel sind für massive, die Lebensdauer einschränkende Schäden an Betonbrücken maßgeblich verantwortlich.

Vor diesem Hintergrund bestand das Ziel des Projekts darin, im Rahmen einer Machbarkeitsstudie die Grundzüge, Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen der Methodik der Risiko- und Systemanalyse an Brückenbauwerken aufzuzeigen und daraus den Forschungs- und Entwicklungsbedarf abzuleiten, um längerfristig ein zuverlässiges LZM für Betonbrücken etablieren zu können.

Im Fokus der Betrachtungen stehen dabei die dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsmechanismen. Zunächst werden die relevanten Schädigungsmechanismen und deren Auswirkungen auf maßgebliche

che Bauteile einer Brücke im Rahmen einer Risikoanalyse behandelt. Im Weiteren wird untersucht, wie und inwiefern auch die zuvor definierten singulären Risiken in die Risikoanalyse aufgenommen werden können.

Inwieweit dies auf Grundlage des aktuellen Stands von Wissenschaft und Technik möglich ist, war im Rahmen des vorliegenden Projekts prinzipiell zu untersuchen. Darüber hinaus sollten diesbezüglich erste weiterzuerfolgende Ansätze aufgezeigt werden.

Der vorliegende Schlussbericht umfasst die folgenden Themen und Kapitel:

- „Zustand der Infrastrukturbauwerke in Deutschland“,
- „Lebenszyklusmanagement bei Infrastrukturbauwerken“,
- „Einwirkungen auf Brücken“,
- „Interaktionen zwischen den Einwirkungen“,
- „Konzepte zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit“,
- „Risikoanalyse – Bewertung des Risikos für Systeme“,
- „Berücksichtigung von kombinierten Einwirkungen im Rahmen einer Risikoanalyse“,
- „Modellierung der Interaktion kombiniert auftretender Einwirkungen“,
- „Forschungsbedarf“.

Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse der Machbarkeitsstudie zusammenfassend dargestellt.

2 Zustand der Infrastrukturbauwerke in Deutschland

In den kommenden Jahren ist davon auszugehen, dass die Kosten für die Erhaltung von Brücken des Bundesfernstraßennetzes weiterhin steigen werden. Begründet ist dies in erster Linie in der Altersstruktur der Brückenbauwerke in Deutschland. Rund 67 % aller Brücken sind älter als 20 Jahre und haben damit ein Alter erreicht – und vielfach bereits überschritten –, in dem erste Instandsetzungsmaßnahmen notwendig werden, siehe Bild 1 [1].

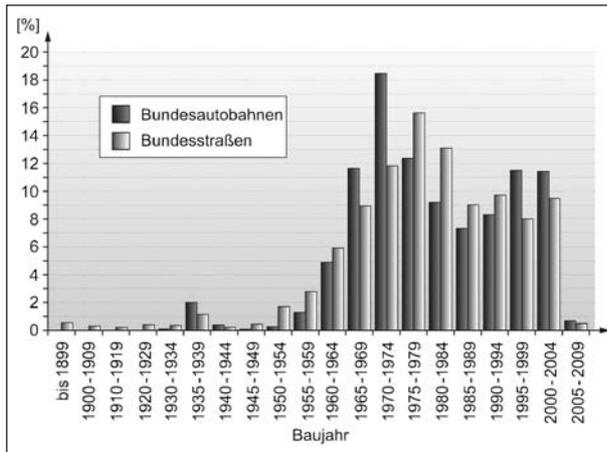


Bild 1: Brücken an Bundesfernstraßen – Alterstruktur nach Brückenflächen in Prozent (Stand: 31.12.2005) [1], (modifiziert)

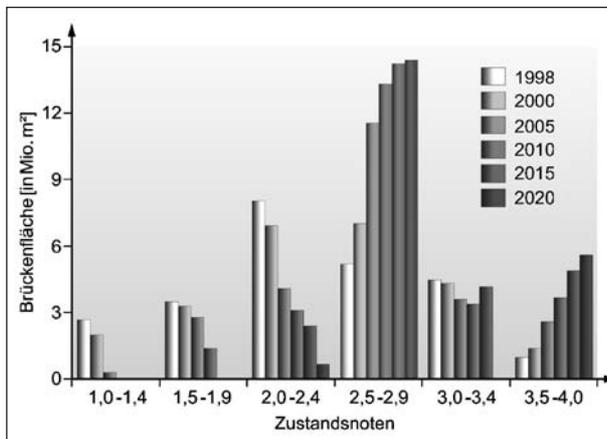


Bild 2: Zustandsentwicklung der Brücken eines Teilnetzes ohne Erhaltungsmaßnahmen bis in Jahr 2020, absolute Brückenfläche [in Mio. m²] [2], (modifiziert)

Einen ersten Anhaltspunkt für die zukünftige Entwicklung des Erhaltungsaufwands deutscher Brückenbauwerke ist aus der Prognose der durchschnittlichen Zustandsnoten der Bauwerke bis ins Jahr 2020 im direkten Vergleich mit den Vorjahren ersichtlich, siehe Bild 2 [2]. Sofern keine Erhaltungsmaßnahmen vorgenommen werden, ist damit zu rechnen, dass sich in den nächsten Jahren eine Vielzahl von Brücken, hier in einem exemplarischen Teilnetz dargestellt, in einem noch ausreichenden (Noten 2,5-2,9) bis ungenügenden (Noten 3,5-4,0) Erhaltungszustand befinden wird.

Mit etwa 88 % der Gesamtbrückenfläche stellen die Stahl- und Spannbetonbrücken den größten Anteil an den Brückenbauwerken des Bundesfernstraßennetzes dar und sind insofern für die in den nächsten Jahren notwendig werdenden Instandsetzungsmaßnahmen im Bundesfernstraßennetz von besonderer Relevanz, siehe Bild 3.

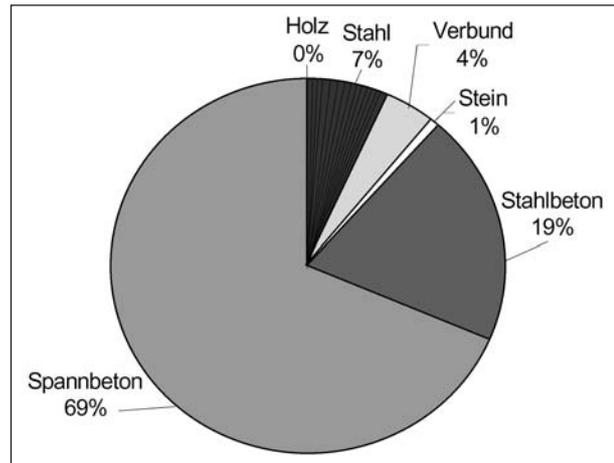


Bild 3: Prozentuale Verteilung des Brückenbestands im Bundesfernstraßennetz nach Anzahl der Bauarten [2]

Eine weitergehende Analyse der konkreten Schadensursachen an Brücken vom Typ der Betonbauweise hat gezeigt, dass mehr als die Hälfte (57 %) aller Schäden an den Betonbauteilen der Konstruktion auftritt. Besonders betroffen sind Über- und Unterbauten (ca. 45 %) und Betonkappen (ca. 12 %) [3]. Als maßgebliche Schädigungsmechanismen haben sich dabei die Bewehrungskorrosion infolge einer Depassivierung der Bewehrung durch Chloride und Karbonatisierung sowie Betonkorrosion infolge einer Frostbeanspruchung herausgestellt.

Das Bauwerksalter und der im Rahmen einer Bauwerksprüfung nach DIN 1076 [4] festgestellte Zustand sind für eine zuverlässige Prognose über zukünftige Instandsetzungs- und Erhaltungsprogramme allein oft nicht ausreichend. Im Hinblick auf ein vorausschauendes Erhaltungsprogramm fehlt bislang die Möglichkeit, die zeitliche Entwicklung sowohl der Einwirkungen als auch der Widerstände der Bauteile und deren Wechselwirkung im Bauwerksmanagementsystem quantifizieren zu können. Eine zukunftsorientierte, nachhaltige Prognose der Schadensentwicklung und darauf abgestimmte Erhaltungsmaßnahmen sind wesentlicher Bestandteil eines funktionierenden Lebenszyklusmanagements.

3 Lebenszyklusmanagement bei Infrastrukturbauwerken

Das primäre Ziel eines Lebenszyklusmanagements bei Infrastrukturbauwerken liegt in der Erhaltung des bestmöglichen Bauwerkszustands während seiner angestrebten Nutzungsphase vor dem Hinter-

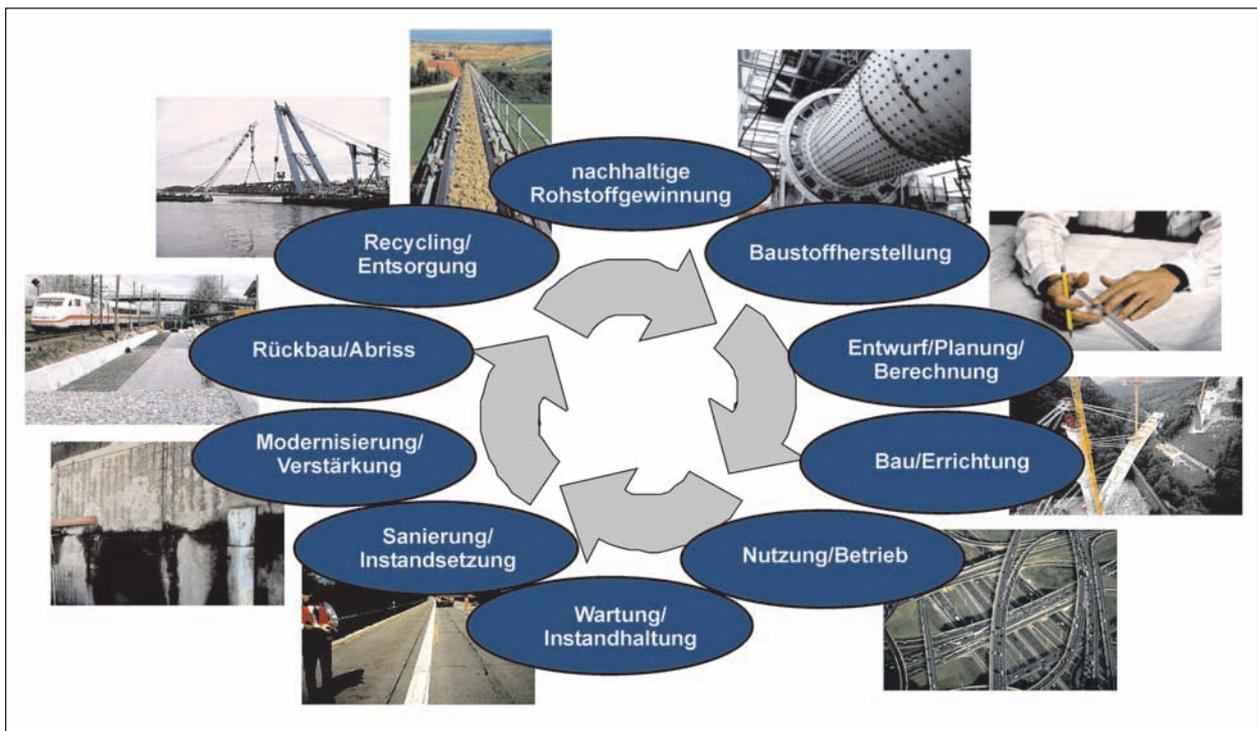


Bild 4: Lebenszyklus von Infrastrukturbauwerken

grund ökonomischer Randbedingungen (Kostenminimierung). Hierbei ist es erforderlich, alle Phasen im Lebenszyklus eines Bauwerks (von der Planung, Erstellung, Nutzung, Erneuerung bis Rückbau) in ihrer Gesamtheit zu betrachten, siehe Bild 4.

Insbesondere die Planungs- (Bemessung auf Dauerhaftigkeit) und die Instandhaltungsphase (Überprüfung und Wiederherstellung der Dauerhaftigkeit) stellen wichtige Etappen im Lebenszyklus eines Bauwerks dar.

Die Entwicklung einer Methodik zur Durchführung umfassender Lebenszyklusbetrachtungen bei komplexen Bauwerken war und ist Gegenstand umfangreicher Forschungstätigkeiten auf nationaler und internationaler Ebene [5, 6, 7, 8, 9]. Insbesondere für Brücken- und Tunnelbauwerke sowie für Anlagen der wasserwirtschaftlichen Nutzung liegen inzwischen erste Konzepte für solche Lebenszyklusmanagementsysteme vor [10, 11, 12]. Speziell für Bauwerke des Bundesfernstraßennetzes wurde ein Bauwerks-Management-System entwickelt [10].

Die Anforderungen an die Instandhaltung von Bauwerken ändern sich mit den objektspezifischen Alterungs- bzw. Schädigungsprozessen. Daher ist es unerlässlich, neben einer aktuellen Zustandsbewertung des betrachteten Bauwerks auch die wei-

tere Zustandsentwicklung – insbesondere den Alterungsprozess und die Entstehung bzw. Entwicklung von Schäden – so genau wie möglich zu prognostizieren. Hierzu können probabilistische Methoden angewendet werden. Sie gestatten eine Vorhersage der Nutzungs- oder Restnutzungsdauer sowie deren Veränderung infolge von Instandsetzungsmaßnahmen [13, 14, 15].

Aufgrund der Komplexität von Infrastrukturbauwerken hinsichtlich der Bauwerkselemente sowie der Vielzahl der nutzungs- und umweltbedingten Beanspruchungen wird im Rahmen aktueller Forschungstätigkeiten die Methodik der risiko- oder zuverlässigkeitsorientierten Systembewertung angewendet [16, 17, 18]. Derzeit beschränkt sich diese Bewertung jedoch auf wenige Beanspruchungsszenarien, in erster Linie die karbonatisierungs- und chloridinduzierte Bewehrungskorrosion. Die Vorgehensweise zur probabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessung sowie die Schädigungs-Zeit-Gesetze für die genannten Beanspruchungsszenarien sind im „Model Code for Service Life Design“ des fib geregelt [19]. Die darin vorgestellten Ansätze und Möglichkeiten befinden sich in Bezug auf das Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken noch in den Anfängen, sind noch nicht ausgeschöpft und bergen ein erhebliches weiteres Forschungspotenzial.

4 Einwirkungen auf Brücken

4.1 Einwirkungen

Die Einwirkungen auf Stahlbetonbrücken lassen sich im Wesentlichen in vier unterschiedliche Arten der Einwirkungen gliedern [20, 21, 22]:

- Lasten und Kräfte,
- Vorspannung,
- Zwängung und
- Umgebungseinflüsse.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts werden insbesondere die Einwirkungen aus Umgebungseinflüssen, d. h. die dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen auf Stahlbetonbrücken, betrachtet.

4.1.1 Einwirkungen aus Umgebungseinflüssen

Infrastrukturbauteile unterliegen starken klimatisch bedingten (Luft-)Feuchte- und Temperaturwechseln. Regen und Schnee oder aber direkte Sonneneinstrahlung führen zu erhöhten Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen in der Betonrandzone des Bauteils. Hinzu kommen nutzungsbedingte Umgebungseinflüsse wie Tausalzstreuung auf den Verkehrsstraßen in den Wintermonaten.

Die wesentlichen bei Stahlbetonbrücken vorzufindenden dauerhaftigkeitsrelevanten chemischen und physikalischen Einwirkungen sowie die daraus resultierenden Schäden sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die Karbonatisierung des Betons führt beispielsweise nicht direkt zu einer Schädigung, sondern bildet lediglich die Voraussetzung für die schädigende Bewehrungskorrosion. Daher ist es notwendig, diesen und andere Prozesse in mehrere Phasen zu unterteilen.

4.1.2 Schädigungsphasen und Grenzzustände

Prinzipiell können die an Betonbauteilen identifizierten Schädigungsprozesse in verschiedene Schädigungsphasen unterteilt werden. Jede Schädigungsphase muss dabei mit einem eigenen Schädigungs-Zeit-Gesetz beschrieben werden. Eine solche Phasenunterteilung eines Schädigungsprozesses wird exemplarisch in Bild 5 für den Fall der karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion, die bei Stahlbetonkonstruktionen eine entscheidende Rolle spielt, dargestellt.

In der ersten Phase – der Einleitungsphase – findet infolge Karbonatisierung des Betons eine Depassivierung des im Randbereich des Betonquerschnitts befindlichen Bewehrungsstahls statt, wobei die den Stahl schützende Passivschicht aus Eisenoxid zerstört wird. Die anschließende Phase der Bewehrungskorrosion – die Beanspruchungsphase – setzt ein, wenn sich für diesen Schädigungsprozess günstige Randbedingungen einstellen. Diese Randbedingungen ergeben sich u. a. aus dem Feuchtehaushalt und dem Sauerstoffangebot innerhalb der Betonrandzone bzw. am Bewehrungsstahl. In der Beanspruchungsphase oxidiert der Bewehrungsstahl unter Volumenzunahme, was – als Einleitung der Schädigungsphase – erste Haarrisse in

	Karbonatisierung	Chloridbeaufschlagung	Frost-/Frost-Tausalz-Angriff
Einwirkung	CO ₂ aus der Umgebung (einschließlich verkehrsbedingt)	Eindringen von Chloriden in den Beton	Frost- und Frost-Tausalzangriff
Transportvorgänge	Diffusion von CO ₂ von der Betonoberfläche zur Bewehrung	Transport der Chlorid-Ionen durch kapillares Saugen und Diffusion von der Betonoberfläche zur Bewehrung	Eindringen und Gefrieren von Wasser im Porensystem des Betons
Betoneigenschaften (maßgebend)	Porenstruktur, Bindekapazität, Betonfeuchte	Porenstruktur, Bindekapazität, Betonfeuchte	Porenstruktur, Wassersättigungsgrad, Festigkeit
Einflussgrößen	Bindemittel, Wasserzementwert, Nachbehandlung, Mikroklima, Betondeckung	Bindemittel, Wasserzementwert, Nachbehandlung, Mikroklima, Betondeckung	Luftporengehalt, Wasserzementwert, Nachbehandlung, Mikroklima
Schädigungsgefahr	Bewehrungskorrosion nach Depassivierung	Bewehrungskorrosion beim Erreichen eines kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts an der Bewehrung	Minderung der mechanischen Eigenschaften bis zur Gefügestörung durch Sprengdruck

Tab. 1: Dauerhaftigkeitsrelevante Einwirkungen, Transportvorgänge, maßgebende Betoneigenschaften und Einflussgrößen sowie die resultierenden Schädigungsgefahren

der Betondeckung zur Folge hat (Mikrorisse). Bei weiterer Entstehung von Korrosionsprodukten am Bewehrungsstahl wächst der Sprengdruck in der Betonrandzone so weit an, dass es zu einer starken Rissbildung und letztendlich zu Abplatzungen der Betondeckung kommt.

Die Konsequenzen der Schädigung sind in Bild 5 klar ersichtlich. Ähnlich wie die Untergliederung der Schädigungsphasen im Schädigungsprozess muss auch der zu erwartende Schaden in so genannte Grenzzustände unterteilt werden. Der Grenzzustand ist dabei ein Zustand, bei dessen Überschreitung das Tragwerk nicht mehr den festgelegten Nutzungsbedingungen entspricht. Die geeignete Wahl eines Grenzzustands ist maßgebend für die Wirtschaftlichkeit einer am Bauteil vorzunehmenden Instandsetzungsmaßnahme. Er ist beispielsweise vom Bauherrn oder Eigentümer im Vorfeld einer Lebensdauerprognose klar zu definieren. Einheitlich geregelte Grenzwerte gibt es hierbei noch nicht. Bislang ist für die dauerhaftkeitsrelevanten Einwirkungen gemäß Tabelle 1 lediglich die Einleitungsphase modelliert worden, siehe [19]. Aus diesem Grund wird im Folgenden unter dem Grenzzustand der Zustand verstanden, der erreicht ist, wenn die Einleitungsphase gerade überschritten wird. Für den Betrieb von Brücken ist dies gleich bedeutend mit einem optimalen Instandsetzungszeitpunkt, da noch kein Schaden an der Bewehrung zu verzeichnen und damit keine Einschränkung für die Tragfähigkeit des Bauwerks zu befürchten ist.

Analog gilt die Einteilung in die jeweiligen Schädigungsphasen und entsprechenden Grenzzustände für den Fall der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion. Eine ähnliche Einteilung in Phasen kann auch für den Frostangriff gewählt werden.

4.2 Schädigungsprozesse – Bewehrungs- und Betonkorrosion

4.2.1 Karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion

Einleitungsphase – Depassivierung

Während der Hydratation des Zementes wird Calciumhydroxid gebildet, das zusammen mit weiteren Alkalien – Kalium- und Natriumhydroxid – in Lösung geht und im Porenwasser des Betons pH-Werte zwischen ca. 11,5 und ca. 13,7 (in Abhängigkeit von der jeweiligen Zementart) erzeugt. Die hohe Alkalität des Porenwassers sorgt für einen natürlichen Korrosionsschutz des Bewehrungsstahls. Um den im Beton eingebetteten Stahl bildet sich eine passivierende Deckschicht, bestehend aus einem dünnen Film aus Eisenoxiden und -hydroxiden. Zwar stellt bereits dieser Vorgang einen Korrosionsprozess dar, jedoch hat er vernachlässigbar geringe Abtragsraten am Bewehrungsstahl zur Folge [23, 24, 25]. Infolge des Einflusses der atmosphärischen Kohlensäure (CO_2), die durch das im Beton befindliche Porensystem diffundiert, wird der natürliche Schutz der

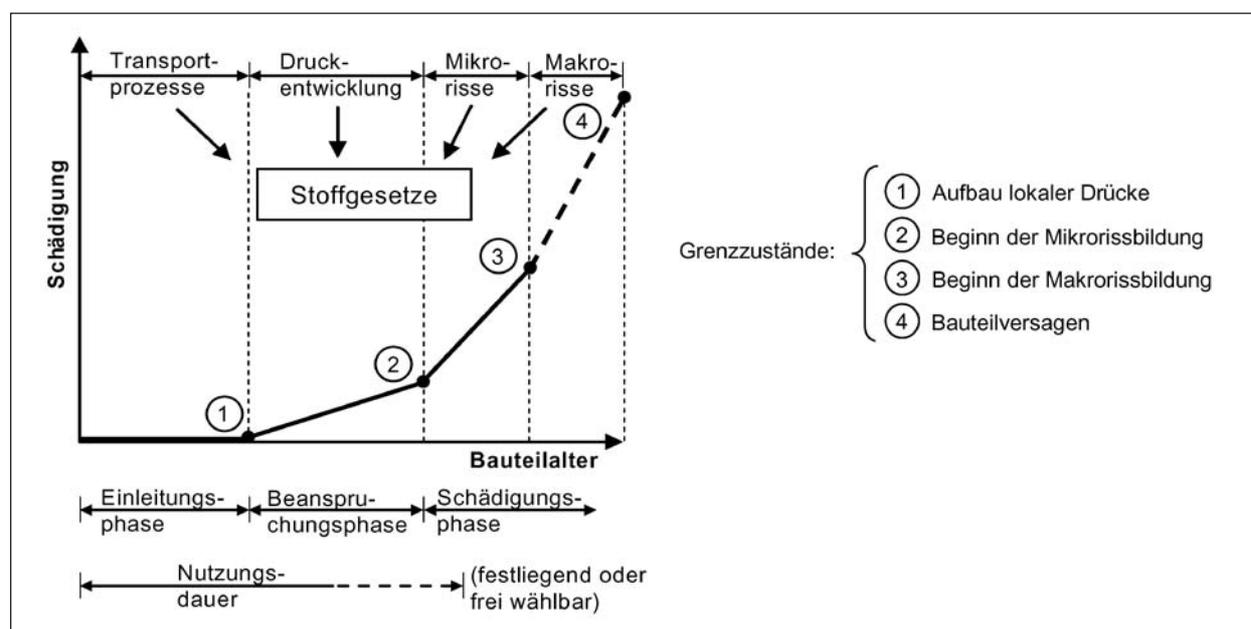


Bild 5: Schädigungsphasen und Grenzzustände im Fall einer karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion

Bewehrung aufgehoben, sobald die in Abhängigkeit von der Zeit voranschreitende Karbonatisierungsf front den Stahl erreicht. Der wesentliche Prozess der Karbonatisierung findet statt, indem sich die Luftkohlen säure mit dem in der Porenlösung befindlichen Calciumhydroxid verbindet und zu Calciumcarbonat reagiert. Im Verlauf der Karbonatisierung sinkt daher der pH-Wert in der Porenwasserlösung auf Werte von ca. 9,0 ab, wobei der Bewehrungsstahl bereits bei einem pH-Wert von ca. 11,0 seine schützende Passivschicht verliert.

Die Karbonatisierung des Betons wird maßgeblich durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre,
- Betonfeuchtigkeit,
- Wasserzementwert des Betons,
- Zementart,
- Gesteinskörnung,
- Zusatzmittel bzw. -stoffe und
- Nachbehandlung des Betons.

Während die genannten Einflüsse für sich allein genommen sehr gut erforscht sind, wird die Interaktion bis heute nur unzureichend verstanden. Als Konsequenz werden Produktansätze (siehe Kapitel 4.1.3) zur Beschreibung des Karbonatisierungsfortschritts herangezogen, die hohen Genauigkeitsansprüchen nicht genügen können, jedoch eine gute Näherung darstellen.

Beanspruchungs- und Schädigungsphase – Bewehrungskorrosion

Der Vorgang der Karbonatisierung des Betons stellt an sich noch keine direkte Schädigung des Bauteils dar. Erst in Gegenwart von Sauerstoff und Feuchtigkeit und bei gleichzeitigem Vorliegen von Potenzialunterschieden auf der Metalloberfläche der Bewehrung kann eine Bewehrungskorrosion eintreten.

Die Bewehrungskorrosion ist ein elektrochemischer Vorgang, der in zwei Teilprozesse – die Anoden- und Kathodenreaktion – unterteilt werden kann. Unmittelbar an der Stahloberfläche bilden sich in direkter Nachbarschaft eine Anode (Lokalanode) und eine Kathode (Lokalkathode) aus, die unterschiedliche Potenziale aufweisen. Anode und Kathode sind einerseits über den Bewehrungsstahl und andererseits über einen Elektrolyten miteinander elek-

trisch kurzgeschlossen, da das Porenwasser aufgrund seiner hohen Ionenkonzentration elektrisch leitend wirkt.

Eine solche Anordnung von Anode zu Kathode wird auch als Mikroelement bezeichnet. Derartige Mikroelemente überziehen die gesamte Stahloberfläche und führen zu einer flächigen Korrosion über den depassivierten Bewehrungsstahl.

4.2.2 Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion

Einleitungsphase – Depassivierung

Für den Transport von Chloriden in den Beton sind zwei Transportmechanismen maßgeblich [23, 24, 25]. Diese umfassen

- die Diffusion von Chloriden und
- den Huckepack-Transport von Chloriden infolge kapillar eindringenden Wassers.

Zur wirklichkeitsnahen Beurteilung und Modellierung des Eindringverhaltens von Chloriden in den Beton ist es wichtig, die Art der Chloridbeaufschlagung am Bauteil zu unterscheiden [26]. Bei einer kontinuierlichen Chloridbeaufschlagung kann auch von einem kontinuierlichen Prozess des Chlorideindringens ausgegangen werden, d. h., die Chloridkonzentration nimmt ausgehend von der Betonoberfläche stetig ab. Eine kontinuierliche Chloridbeaufschlagung ist bei Betonbauteilen gegeben, die sich entweder direkt im Wasser befinden (z. B. Brückenpfeiler), oder bei horizontalen Bauteilen, die mit stehendem Wasser beaufschlagt sind (z. B. Brückenkappen (zeitweise)). Eine intermittierende Chloridbeaufschlagung unterbricht den kontinuierlichen Prozess des Chlorideindringens, da sich im Bereich der so genannten Konvektionszone Abweichungen vom Fick'schen Diffusionsverhalten einstellen. Intermittierende Bauwerksbereiche sind Bauteile, die sich in der Wasserwechselzone (z. B. Stahlbetonstütze im Landesteg im Meerwasser) oder im Spritzwasserbereich befinden (z. B. Brückenpfeiler im Straßenbereich).

Chloride durchdringen lokal die Passivierungsschicht der Bewehrung. Voraussetzung hierfür ist ein ausreichend hoher Chloridgehalt, der auch als so genannter kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt bezeichnet wird [27].

Die maßgebenden Faktoren, die die Transportvorgänge für Chloride beeinflussen, umfassen

- die Art und Menge des Chlorids,
- die Art der Chloridbeaufschlagung,
- die Zementart und -gehalt,
- die Betonfeuchtigkeit,
- die Temperatur,
- der Wasserzementwert des Betons,
- die Gesteinskörnung,
- die Zusatzmittel bzw. -stoffe und
- die Nachbehandlung des Betons.

Für diese Einflussfaktoren gilt – mehr noch als bei der Karbonatisierung –, dass die Interaktionen noch nicht ausreichend erforscht sind.

Beanspruchungs- und Schädigungsphase – Bewehrungskorrosion

Die chloridinduzierte Korrosion ist durch eine räumlich sehr begrenzte Ausbildung eines elektrochemischen Elements, d. h. einer kleinen Anode und einer großen Kathode [24], gekennzeichnet. Im Gegensatz zur karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion werden hier so genannte Makroelemente gebildet. Die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion ist also eine sehr schnell fortschreitende lokal begrenzte Schädigung der Bewehrung. Sie

wird auch Lochfraßkorrosion genannt, da sich die Eisenauflösung an einer kleinen Stelle lochartig zur Stahlmitte hin fortsetzt. Diese Art der Korrosion ist durch nur geringe Mengen an Korrosionsprodukten geprägt und somit von außen, mangels fehlender Rostfahnen, nur schwer erkennbar. Voraussetzung für eine Korrosion ist stets die Anwesenheit von Wasser bzw. eines hinreichend hohen Feuchte-niveaus (elektrolytischer Teilprozess) und Sauerstoff [23, 24].

4.2.3 Frost-Tauangriff

Einleitungsphase – Wassersättigung

Die größte Herausforderung bei der Beschreibung des Frost-Tauangriffes ist die Abbildung des Saugvorganges und der damit verbundenen Zunahme der Wassersättigung im Beton. Diese steigt mit der Intensität und Geschwindigkeit der Temperaturänderung und der Anzahl der Frost-Tauwechsel. Jedoch gestaltet sich die Modellierung dieses Vorganges als sehr komplex, da eine Vielzahl verschiedener Parameter einwirkt. Die bislang vorliegenden Modelle unterliegen daher auch einer Vielzahl von Einschränkungen.

Eine thermodynamische Erklärung des Anstiegs des Sättigungsgrads hat SETZER [28, 29, 30] mit seinem „Mikroeislinienmodell“ geliefert, welches anhand der 6 Zustandsbilder in Bild 6 erklärt wer-

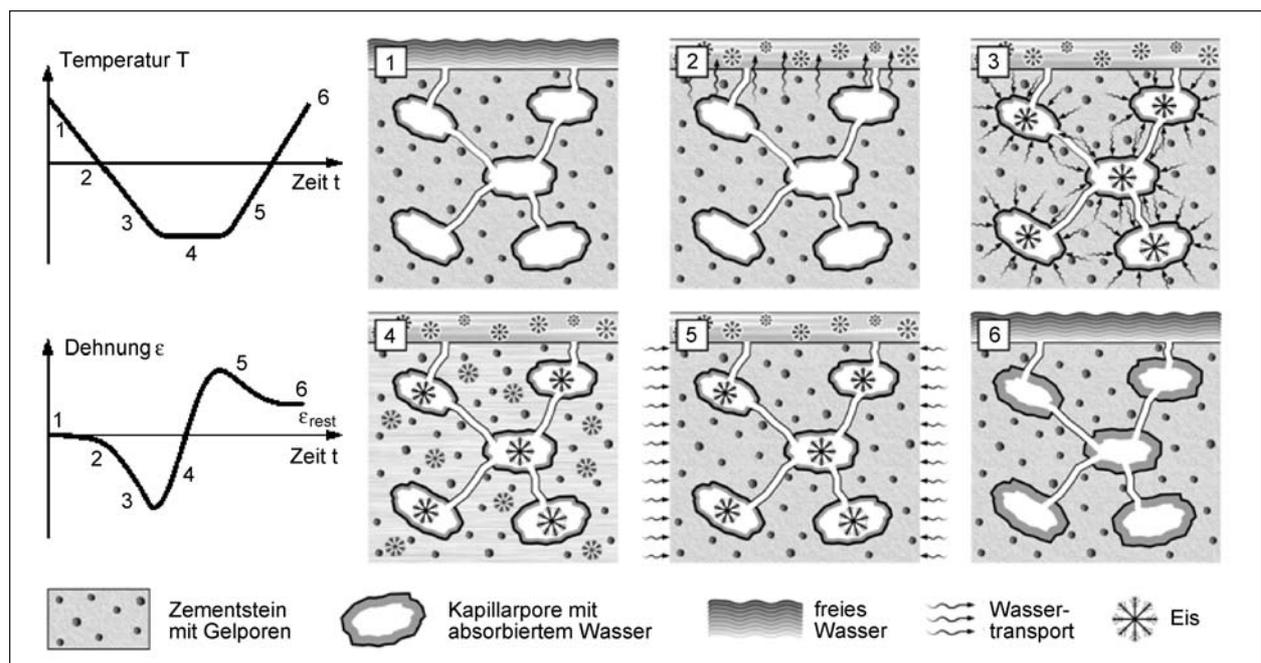


Bild 6: Dehnungsverhalten von Zementstein im Frostversuch nach wiederholter Frost-Tauwechselbeanspruchung in Abhängigkeit von der Temperatur einschließlich schematischer Darstellung der physikalischen Vorgänge im Zementstein (Stadien 1-6) [29]

den kann. Ein Frost-Tauwechsel wird dabei in 6 Stadien unterteilt. Der zeitliche Verlauf der Temperatur und der Dehnung einer Zementsteinprobe sowie die zugehörigen physikalischen Vorgänge sind darin in den einzelnen Stadien dargestellt. Im Stadium 1 ist das Wasser sowohl auf der Betonoberfläche als auch in den Betonporen flüssig. Wird nun die Zementprobe abgekühlt, gefriert bei 0 °C zuerst das Wasser auf der Betonoberfläche (Stadium 2). Mit der sinkenden Temperatur steigt jedoch der Unterdruck im Porenwasser, was eine Wasserabgabe des Zementsteins zur Folge hat. Das Wasser friert an das schon bestehende Eis in den Kapillarporen an und die Zementsteinprobe schwindet (Stadium 3). Erst bei ca. -25 °C gefriert auch das Wasser in den kleinsten Kapillar- und Gelporen und die Zementsteinprobe expandiert durch das zunehmende Volumen bei der Phasenumwandlung von Wasser zu Eis (Stadium 4). Wird die Probe nun wieder aufgetaut, so schmilzt zuerst das Wasser in den Gelporen und kleineren Kapillarporen. Der durch die Volumenverkleinerung und mikrostrukturelle Vorschädigung des Zementsteins in der Porenumgebung durch die Phasenumwandlung entstandene Unterdruck wird durch angesaugtes Wasser aus dem Umfeld abgebaut. Dieser Vorgang wird als Frostsaugen bezeichnet (Stadium 5).

Infolge der Frostbeanspruchung hat sich auch der Sättigungsgrad im Beton (siehe Stadium 6) stark erhöht. Voraussetzung für einen derartigen Saugvorgang ist das Vorhandensein von flüssigem Wasser während des Auftauvorgangs, z. B. an der Betonoberfläche, wenn der Beton Stadium 5 erreicht. Durch diese so genannte Mikroeislinsepumpe wird bei jedem Frost-Tauwechsel Wasser in den Beton „gepumpt“.

Die maßgebenden Faktoren, die einen Einfluss auf die Wassersättigung des Betons ausüben, umfassen

- die Art der Wasserbeaufschlagung (z. B. Wasserwechselzone),
- den Wasserzementwert des Betons,
- die Gesteinskörnung,
- die Zementart,
- die Zusatzmittel bzw. -stoffe und
- die Nachbehandlung des Betons.

Quantitative Angaben zur Größe der jeweiligen Einflussfaktoren sind nur sehr begrenzt bekannt.

Beanspruchungs- und Schädigungsphase – Gefügeschädigung

Ein Frostangriff bewirkt eine innere Gefügeschädigung des Betons. Das durch kapillares Saugen oder Diffusion eingedrungene Wasser sowie das Porenwasser gefrieren bei tiefen Temperaturen und dehnen sich bei der Phasenumwandlung zu Eis um ca. 9 % aus. Erreicht bzw. überschreitet nun der Sättigungsgrad der Poren einen betonspezifischen kritischen Sättigungsgrad, so reicht der im Beton zur Verfügung stehende Expansionsraum nicht mehr aus. Es entwickelt sich ein Sprengdruck und der Beton wird zerstört.

Bei den Zerstörungsmechanismen ist zwischen jenen zu unterscheiden, die makroskopische Spannungen bewirken bzw. die Veränderungen im mikroskopischen Zementsteingefüge nach sich ziehen [23].

Wird wassergesättigter Beton einem Angriff durch Frost-Tauwechsel ausgesetzt, kann es zu Schäden kommen, die prinzipiell in zwei unterschiedlichen Schadensarten klassifiziert werden können: oberflächliche Abwitterung (äußere Schädigungen) am Betonrandbereich und/oder z. B. Mikrorissbildung (innere Schädigungen) tiefer im Betoninneren. Äußere Schädigungen können das Eindringen von schädlichen Substanzen in den Beton zur Folge haben, während innere Schädigungen die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Betons derart beeinträchtigen, dass es zum Versagen des Bauteils kommen kann [29, 30].

4.3 Modelle zur Beschreibung des Schädigungsfortschritts

Die zuvor beschriebenen Schädigungsmechanismen können durch Modelle abgebildet werden. Allen vorliegenden Modellen ist jedoch gemeinsam, dass sie zunächst nur die Einleitungsphase beschreiben können. Modelle zum Ausmaß des tatsächlichen (Bewehrungs- oder Beton-)Korrosionsfortschritts gibt es bislang nicht. Die hier vorgestellten Schädigungsmodelle sind Bestandteil des „Model Code for Service Life Design“ der Fédération Internationale du Béton (fib) [19]. Sie beschreiben jedoch die jeweilige Einleitungsphase bereits sehr genau.

4.3.1 Karbonatisierungsinduzierte Depassivierung

Das aufgeführte Schädigungsmodell, siehe Gleichungen (1) bis (4), bildet die relevanten physikalischen und chemischen Vorgänge, die bei der karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion auftreten, auf einem empirischen Niveau hinreichend gut ab [19]. Hierbei wird die Karbonatisierungstiefe $X_c(t)$ zum Zeitpunkt t ermittelt. Dieses Modell gilt für die Beschreibung der Einleitungsphase im ungerissenen Beton, vgl. Bild 5.

$$X_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)} \quad (1)$$

mit

$$k_e = \frac{\left[1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e} \right]^{g_e}}{\left[1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e} \right]} \quad (2)$$

$$k_c = a_c \cdot t_c^{b_c} \quad (3)$$

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}} \quad (4)$$

Die Bedeutung der Variablen sind Tabelle 2 zu entnehmen, siehe auch [19] sowie [26].

Im Wesentlichen umfassen die Variablen in Tabelle 2 die Umgebungs- bzw. Betonfeuchtigkeit, die Widerstandsfähigkeit des Betons gegenüber eindringendem Kohlendioxid, den Beton angreifenden Schadstoffgehalt sowie die Beanspruchungsdauer.

4.3.2 Chloridinduzierte Depassivierung

Die Chloridkonzentration $C(x,t)$ in der Tiefe x zum Zeitpunkt t kann mit Hilfe der Gleichungen (5) bis (8) ermittelt werden. Das vorliegende Modell beschreibt die Einleitungsphase in einem ungerissenen Beton [19].

Die Modellvariablen sowie deren Bedeutung sind Tabelle 3 zu entnehmen, siehe auch [19] und [26].

$$C(x,t) = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{eff,C} \cdot t}} \right] \quad (5)$$

mit

$$D_{app,C} = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (6)$$

$$k_e = \exp \left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right) \quad (7)$$

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad (8)$$

Variable	Bedeutung/Bezug
$X_c(t)$	Karbonatisierungstiefe [mm]
k_e	Übertragungsparameter Umwelt [-]
RH_{real}	relative Feuchtigkeit in der karbonatisierten Randschicht [%]
RH_{ref}	Referenzwert der relativen Feuchtigkeit, hier $RH_{ref} = 65\%$ [%]
g_e	Exponent, hier 2,5 [-]
f_e	Exponent, hier 5,0 [-]
k_c	Übertragungsparameter Ausführungsqualität [-]
b_c	Regressionsexponent [-]
a_c	Regressionsparameter [-]
t_c	Nachbehandlungsdauer [d]
k_t	Übertragungsparameter Materialwiderstand-Testmethode [-]
$R^{-1}_{ACC,0}$	inverser effektiver Karbonatisierungswiderstand von Beton [(mm ² /a)/(kgCO ₂ /m ³)]
ε_t	Errorterm zur Berücksichtigung prüftechnisch bedingter Fehler [(mm ² /a)/(kgCO ₂ /m ³)]
C_s	Parameter der Umwelteinwirkung [kgCO ₂ /m ³]
t	Betonalter [a]
t_0	Referenzzeitpunkt [a]
$W(t)$	Witterungsfunktion [-]
ToW	Regenhäufigkeit [-]
b_w	Regressionsexponent [-]
p_{SR}	Schlagregenwahrscheinlichkeit [-]

Tab. 2: Erläuterung der Bedeutung der Variablen des Schädigungsmodells gemäß Gleichungen (1) bis (4) und ihre Bedeutung

Variable	Bedeutung/Bezug
$C(x,t)$	Chloridgehalt in der Tiefe x zum Zeitpunkt t [M.-%/Z]
a	Altersexponent [-]
C_0	Ausgangschloridkonzentration im Beton [M.-%/Z]
$C_{s,\Delta x}$	Parameter der Umwelteinwirkung [M.-%/Z]
Δx	Tiefe der Konvektionszone [mm]
$D_{eff,C}$	Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton [mm ² /a]
k_t	Übertragungsparameter Testmethode [-]
$D_{RCM,0}$	Chloridmigrationskoeffizient [mm ² /a]
$A(t)$	Alterungsfunktion [-]
k_e	Übertragungsparameter Umwelt [-]
T_{ref}	Referenztemperatur [K], hier zu 293 K gesetzt
T_{real}	Temperatur der Umgebungsluft bzw. Bauteiltemperatur [K]
b_e	Regressionsparameter [K]
t	Betonalter [a]
t_0	Referenzzeitpunkt [a]

Tab. 3: Variablen des Schädigungsmodells gemäß Gleichung (5) und ihre Bedeutung

Die aus Tabelle 3 ersichtlichen Einflussgrößen beinhalten im Wesentlichen den im Beton befindlichen sowie am Stahl anstehenden Chloridgehalt, die Widerstandsfähigkeit des Betons gegenüber eindringendem Chlorid, die Temperaturabhängigkeit sowie die Beanspruchungsdauer.

4.3.3 Kritischer Sättigungsgrad, Frost

Zur Beschreibung der Schädigungsphase infolge eines Frostangriffs liegen in der internationalen Literatur verschiedene Modelle vor [13, 31, 32]. Beim Ansatz von VESIKARI [13] sowie von LOWKE und BRANDES [31] erfolgt die Schädigungsmodellierung über einen Produktansatz. Die Parametrisierung wird entsprechend den Umweltbedingungen (z. B. Temperatur, Feuchtigkeit, Tausalze) und betontechnologischen Randbedingungen (z. B. Druckfestigkeit, Porosität) vorgenommen.

FAGERLUND [32] stellt ein Modell zur Beschreibung des reinen Frost-Tauangriffs vor, welches eng an die ablaufenden physikalischen Prozesse angelehnt ist, siehe Gleichungen (9) bis (12). Dieses Schädigungsmodell beschreibt die zeitabhängige Sättigung $S_{cap}(t)$ des Betons. Dabei tritt per Definition eine Schädigung ein, wenn die tatsächliche Betonsättigung den kritischen betonspezifischen Sättigungsgrad erreicht. FAGERLUND teilt die Wasseraufnahme in zwei unterschiedliche Vorgänge ein: die schnelle kapillare Wasseraufnahme und die wesentlich langsamer fortschreitende Wasseraufnahme, bei der die im Beton eingeschlossene Luft langsam im eindringenden Wasser gelöst wird.

$$S_{cap}(t) = \frac{1}{\varepsilon} \left[\varepsilon_0 + k \cdot \left(\frac{w}{z} \right)^2 \cdot V_p \cdot \log t \right] \quad (9)$$

mit

$$\varepsilon = \frac{Z}{1000} \left(\frac{w}{z} - 0,19 \cdot \beta \right) + a_0 \quad (10)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{Z}{1000} \left(\frac{w}{z} - 0,19 \cdot \beta \right) \quad (11)$$

$$V_p = \frac{Z}{1000} \left(\frac{w}{z} + 0,32 \right) + a_0 \quad (12)$$

In der Tabelle 4 sind die Modellvariablen des oben dargestellten Schädigungsmodells aufgeführt sowie deren Bedeutung kurz erläutert. Eine detaillierte Beschreibung der Modellvariablen kann [32] entnommen werden.

Variable	Bedeutung/Bezug
$S_{cap}(t)$	kapillare Sättigung zum Zeitpunkt t [-]
$\varepsilon, \varepsilon_0$	Variablen zur Berücksichtigung der Porosität [-]
k	Variable zur Berücksichtigung der Zementart [-]
w/z	Wasserzementwert [-]
V_p	Gesamtporenvolumen [-]
Z	Zementgehalt [kg/m ³]
β	Hydratationsgrad [-]
a_0	Luftgehalt im Beton [-]

Tab. 4: Variablen des Schädigungsmodells gemäß Gl. (9) und ihre Bedeutung

Zum oben aufgeführten Schädigungsmodell ist anzumerken, dass dieses Modell für die reine Frostbeanspruchung gilt, d. h. ohne Anwesenheit von Tausalz. Der Frost-Tausalzangriff stellt einen kombinierten Angriff aus Chlorid und Frosteinwirkung dar.

4.4 Parameterreduzierte Schädigungsmodelle

Die Schädigungsmodelle gemäß [19] bilden die tatsächlichen Prozesse im Bauwerk relativ wirklichkeitsnah ab. Die Eingangsparameter erfordern jedoch in der Regel umfangreiche Vor-Ort- und Laboruntersuchungen, die für eine ökonomische und schnelle erste Einschätzung einen unverhältnismäßigen Aufwand bedeuten. Es ist daher sinnvoll für ein flächendeckendes Bauwerks-Risikoanalyse-System zunächst auf parameterreduzierte Modelle zurückzugreifen, um an allen Bauwerken schnell durchzuführende, weniger aufwändige Beurteilungen zu treffen.

Die Anwendung der im Bauwerks-Management-System eingebundenen auf wenige Parameter reduzierten Modelle ist daher für eine erste Einschätzung von Verkehrsbauwerken sinnvoll [10]. Die Eingangsparameter liegen für die standardmäßig verwendeten Betone mit ihren Mittelwerten vor, sodass zunächst auf Laboruntersuchungen an Probekörpern verzichtet werden kann. Über sehr vereinfachte Betrachtungen können dabei auch Risse über ihre Rissbreiten im Beton berücksichtigt werden. Modelle zur Beschreibung der Frostbeanspruchung liegen jedoch nicht vor.

Die entsprechenden Modelle sowie Kennwerte sind dem Leitfaden des Bauwerks-Management-Systems zu entnehmen [10].

4.5 Singuläre Risiken

Bei den in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Schädigungsmechanismen handelt es sich um dauerhaftigkeitsrelevante Prozesse, die im Wesentlichen auf Einwirkungen aus der Umwelt beruhen. In der Regel werden sie über die gesamte Fläche des Bauteils auftreten und entsprechend wird eine Analyse der Schädigungsrisiken vollflächig am gesamten Bauwerk vorgenommen.

Darüber hinaus treten bei Massivbrücken lokal begrenzte Probleme auf, die ebenfalls die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen und gegebenenfalls mit den zuvor genannten Einwirkungen interagieren. Diese Probleme können beispielsweise aus konstruktiven bauwerksspezifischen Mängeln resultieren [20, 21, 22]. Die so genannten singulären Risiken können bedingt sein durch

- die gewählte Konstruktionsart,
- noch fehlende Erfahrung im Umgang mit dem Baustoff Beton zur Bauzeit,
- die Ausführungsart bzw. Ausführungsfehler sowie
- eine gegenüber dem Planungsstand stark erhöhte Verkehrsbelastung.

Die daraus resultierenden Schäden können nach ihrem Einfluss auf die Tragfähigkeit oder auf die Dauerhaftigkeit unterschieden werden. Der Übergang ist jedoch oftmals fließend, und insofern ist eine klare Trennungslinie häufig nicht zu ziehen.

Risse im Beton als Folge singulärer Risiken stellen einen wesentlichen dauerhaftigkeitsbeeinflussenden Faktor dar. Daher ist der Einfluss von Rissen auf die Dauerhaftigkeit bei der Beanspruchung durch Chloride, Karbonatisierung und Frost-Tauwechsel zu berücksichtigen.

Probleme der Gebrauchstauglichkeit müssen nicht zwingend zu einem Nutzungsausfall des Bauwerks führen. Ihre Folgen sollten jedoch in einer Dauerhaftigkeitsanalyse mit Blick auf die Beton- und Bewehrungskorrosion berücksichtigt werden.

Schadhafte Abdichtungen oder nicht funktionsfähige Entwässerungen sind hingegen in erster Linie für Dauerhaftigkeitsbetrachtungen relevant, da sie zu einem unplanmäßigen Feuchtigkeits- und/oder Chlorideintrag führen und damit die Gefahr einer Schädigung durch Frost oder chloridinduzierte Be-

wehrungskorrosion erhöhen. Darüber hinaus führt oftmals die Erneuerung von Verschleißbauteilen (z. B. Fahrbahnübergängen) zu einem temporären Ausfall der Bauwerke. Werden die Verschleißbauteile rechtzeitig erneuert, ist nicht mit erheblichen Beeinträchtigungen für das Gesamtbauwerk zu rechnen. Zu den Verschleißbauteilen zählen neben den Fahrbahnübergängen zum Beispiel auch Lager und Kappen, aber auch andere Brückeneinrichtungen wie der Fahrbahnbelag, das Geländer oder Entwässerungseinrichtungen [10].

Die Besonderheit der oben genannten singulären Risiken und der Verschleißbauteile ist, dass sie sich im Unterschied zu den systematischen Schädigungsvorgängen (derzeit) nicht durch zeitvariante Schädigungsmodelle auf der Grundlage von Materialeigenschaften beschreiben lassen. Ähnliches gilt für singuläre Risiken mit unmittelbarem Einfluss auf die Tragsicherheit wie Schäden im Bereich der Koppelfugen von Spannstählen oder Spannungsrisskorrosion.

Bei einer probabilistischen Lebensdauerbetrachtung auf der Grundlage dynamischer Schädigungsmodelle müssen die singulären Risiken daher gegebenenfalls gesondert betrachtet werden. Für die folgenden Überlegungen zur Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen werden zunächst nur die Einflüsse aus Rissen mitberücksichtigt.

5 Interaktionen zwischen den Einwirkungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde auf die einzelnen Schädigungsmechanismen eingegangen. Da diese am Bauwerk in der Regel nicht isoliert, sondern immer in Kombination miteinander auftreten – siehe hierzu z. B. [33] –, werden im Folgenden die Interaktionen der im Kapitel 4 aufgezeigten Schädigungen untereinander näher beleuchtet. Als Interaktionen werden hier Veränderungen der Werkstoffeigenschaften infolge kombinierter Einwirkung verstanden, durch die sich auch der Schädigungsverlauf ändern kann – zum Positiven oder Negativen.

Das komplexe Themengebiet der singulären Risiken findet hier Berücksichtigung durch das Aufnehmen von Rissen in die Liste der möglichen Interaktionen. Mit Hilfe der nachfolgenden Schädigungsmatrix, werden die möglichen Kombinationen zwi-

	Karbonatisierung	Chloride	Frost	Risse
Karbonatisierung	-	A	B	C
Chloride	A	-	D	E
Frost	B	D	-	F
Risse	C	E	F	-

Tab. 5: Interaktionsmatrix: Interaktionen A bis F zwischen den dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsarten

schen den zuvor identifizierten dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsarten aufgezeigt, siehe Tabelle 5.

Bisherige Erkenntnisse sowie die aktuellen Forschungstätigkeiten hinsichtlich der Interaktionen zwischen dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsarten einschließlich der Folgen singulärer Risiken in Form von Rissen werden kurz aufgeführt. Die entsprechenden Bezeichnungen sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

STARK und WICHT [23] unterscheiden Risse in erster Linie hinsichtlich der Rissart. Unterschieden wird dabei zwischen Normalrissen (trocken oder immer wassergefüllt) oder wasserführenden Rissen, die eine Korrosion begünstigen. Rissbreiten sind dabei nur von untergeordneter Bedeutung.

Anzumerken ist, dass in Bezug auf kombinierte Einwirkungen die zeitliche Abfolge der Angriffe von Einfluss ist und gegebenenfalls beachtet werden muss.

5.1 Fall A: Karbonatisierung – Chloride

Durch die Karbonatisierung erfolgen grundlegende Veränderungen des Aufbaus und damit der physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften des Zementsteins [39]. In Versuchen hat sich gezeigt, dass sich karbonatisierte und nicht-karbonatisierte Betone hinsichtlich der Chloridpenetration unterschiedlich verhalten. Dabei spielt insbesondere die Reihenfolge des Auftretens der jeweiligen Beanspruchung eine Rolle.

Die Chloridionen dringen in karbonatisierten Betonen sehr viel schneller ein, da die Cl-Bindekapazität

des karbonatisierten Betons geringer ist als bei nicht karbonatisiertem Beton [34, 35, 36].

Wird jedoch chloridbelasteter Beton karbonatisiert, so werden durch den Karbonatisierungsprozess große Teile der im Beton gebundenen Chloride freigesetzt und an die Porenlösung abgegeben [23, 24, 25, 37].

Die Eindringgeschwindigkeit von Chloriden in karbonatisierten Betonen ist wesentlich höher als in nichtkarbonatisierten Betonen. Der Chloridgehalt nach Eintreten des Gleichgewichtszustandes ist in karbonatisierten Betonen geringer. Des Weiteren wirken sich im Gegensatz zum nichtkarbonatisierten Beton die Zementart bzw. das Zement-Zusatzstoff-Gemisch in karbonatisiertem Beton auf die Eindringgeschwindigkeit von Chloriden nur geringfügig aus [34].

Aufgrund des bei einer Karbonatisierung von Hochofenzementbetonen entstehenden gröberen Porengefüges wird die Bewehrung anfälliger für eine flächige Korrosion der Bewehrung [40].

5.2 Fall B: Karbonatisierung – Frost

Die infolge der Karbonatisierung veränderte Porenstruktur des Zementsteins führt ebenso zu einem veränderten Verhalten gegenüber einer Frost-Taubeanspruchung [38, 39, 41]. Grundsätzlich gilt, dass mit zunehmender Dichte des Porengefüges auch der Frostwiderstand des Betons zunimmt [23]. Hochofenzementbetone werden im Gegensatz zu Portlandzementbetonen durch die Karbonatisierung jedoch poröser [42, 43], die Dichtigkeit sinkt also. Mangels Untersuchungsergebnissen kann dieser Effekt bislang nicht quantifiziert werden.

Umgekehrt kann jedoch eine Auflockerung des Betongefüges infolge der Frostbeanspruchung zu einer schnelleren Karbonatisierung führen, da Gase, wie beispielsweise CO₂, schneller in den Beton eindringen können [40].

5.3 Fall C: Karbonatisierung – Risse

Risse im Beton, wie sie in zugbeanspruchten Bereichen planmäßig auftreten, führen zu einer beschleunigten Karbonatisierung, da sie die Gasdiffusion erleichtern [23, 39]. Jedoch hängt die Karbonatisierungsgeschwindigkeit in den Rissen stark von der Rissweite ab. In klaffenden Rissen dringt

die Karbonatisierung genauso schnell vor wie an der Betonoberfläche.

SCHIEßL [44] stellt fest, dass der Endwert der Karbonatisierung entlang der Rissufer bei einer Rißbreite von 0,1 bis 0,15 mm weiter ins Betoninnere reicht als bei ungerissenen Betonen. Kleinere Risse mit einer Rissweite $< 0,2$ mm haben einen geringeren Einfluss auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit, da das CO_2 nur durch Diffusion in den Rissgrund vordringen kann [23, 44]. Spannungsrisse, die nicht durchgehend sind, können durch Schmutz, Produkte der Stahlkorrosion oder Versinterung durch CaCO_3 zuwachsen, wodurch die Karbonatisierung weiter verlangsamt oder vollständig gestoppt wird [24].

5.4 Fall D: Chloride – Frost

Dieser kombinierte Angriff wird auch als Frost-Tausalz-Angriff bezeichnet. Die Taumittel verstärken nur die durch reinen Frost hervorgerufene äußere Schädigung [45]. Es treten im Allgemeinen keine nennenswerten inneren Schädigungen auf [23]. Durch die größere kapillare Steighöhe des salzhaltigen Wassers wird dieses schneller vom Beton aufgenommen. Zusätzlich wird die Feuchtigkeitsabgabe an die Umgebung durch die hygroskopische Wirkung des Tausalzes verzögert [23, 24]. Dadurch wird die Feuchte im Beton erhöht und der kritische Sättigungsgrad schneller erreicht. Die Schädigung des Betons setzt somit früher ein als bei reiner Frostbeanspruchung.

LI und TANG [46] beschreiben zwei gegenläufige Effekte bei gleichzeitigem Chlorid- und Frostangriff. Zum einen dringen die Chloride durch die Funktion der Mikroeislinsepumpe bei einer Frost-Tauwechsel-Beaufschlagung schneller in den Beton ein. Zum anderen wird das Eindringen von Chloriden durch tiefe Temperaturen und kurze Auftauphasen verzögert. Bei Portlandzementbetonen und Betonen ohne Luftporen dominiert das beschleunigte Eindringen.

5.5 Fall E: Chloride – Risse

Durch Zugbeanspruchung planmäßig aufgetretene Risse führen generell zu einem verstärkten Eindringen von Chloridionen [23, 24, 47, 48, 49]. Sie dringen in gerissenem Beton etwa zehnmals schneller zur Bewehrung vor als in ungerissenem Beton. In

[48] konnte ein direkter Einfluss zwischen Rissbreite und Chlorideindringtiefe bei einer Rissweite von 0 bis 0,1 mm nachgewiesen werden. Zwischen 0,1 mm und 0,2 mm hat die Rissbreite jedoch gemäß [43] keinen Einfluss mehr auf die Eindringtiefe.

HARTL und LUKAS [50] konnten keinen direkten Einfluss der Rissbreite auf die Höhe der Chloridkonzentration in der Risswurzel nachweisen. Vielmehr wurde bei ausreichender Beaufschlagungsdauer immer eine kritische korrosionsauslösende Chloridkonzentration an der Risswurzel erreicht. Das Konzept der zulässigen Rissbreite ist hier somit nicht anwendbar [50, 51]. Die Chloridkonzentration ist vor allem abhängig von der Art der Beaufschlagung. Man kann im Sprühnebelbereich und unter bestimmten Beschränkungen auch im Spritzwasserbereich davon ausgehen, dass eine schädigende Chloridkonzentrationsgrenze bei hohem Widerstand der Betondeckung nicht überschritten wird [51].

5.6 Fall F: Frost – Risse

Die Frage, inwieweit sich in Beton befindliche Risse auf die Stärke des Frost- und Frost-Taumittelwiderstandes auswirken, konnte im Rahmen der bisherigen Literaturrecherche nicht beantwortet werden, da hierzu keine Ergebnisse vorliegen.

5.7 Mehrfachkombinationen

Neben den oben aufgeführten „einfach“ kombinierten Angriffen, gibt es auch „mehrfach“ kombinierte Angriffe, wie z. B.

- Karbonatisierung – Frost-Tausalzangriff und
- Karbonatisierung – Chloride – Risse.

Dazu kann auch zählen, dass durch Gefügeschädigungen der Betonrandzone infolge einer dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkung Vorschub geleistet werden kann. Zum Beispiel reduziert sich durch Betonabplatzungen infolge von Frost-Tausalzbeanspruchungen die wirksame Betondeckung über der Bewehrung. Die durch den Frost-Tausalzangriff eintretende Betonkorrosion begünstigt somit eine Bewehrungskorrosion [40].

Die Ergebnisse zur Interaktion von Chloriden und Karbonatisierung (siehe Fall A) lassen sich prinzipiell auch auf die 3fach-Einwirkung Karbonatisie-

rung-Chloride-Frost übertragen, da durch die Karbonatisierung maßgeblich das Eindringverhalten von Chloriden und Feuchtigkeit verändert wird.

Vertiefend wird auf die Mehrfachinteraktionen im Rahmen des vorliegenden Berichts nicht eingegangen. Dieser Aspekt sollte jedoch in weiteren Forschungsvorhaben verfolgt werden und müsste bei der Implementierung der Interaktionen in ein Bauwerks-Management-System in jedem Fall berücksichtigt werden.

6 Konzepte zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit

6.1 Dauerhaftigkeitsbemessung

6.1.1 Deskriptives Konzept

Die Dauerhaftigkeit eines Tragwerks gilt dann als sichergestellt, wenn u. a. die Anforderungen an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Betons, aber auch notwendige konstruktive Maßnahmen gemäß DIN EN 206-1 [52] und DIN 1045-1/-2/-3 [53, 54, 55] sowie gemäß ZTV-ING [56] eingehalten werden, siehe auch [57, 58, 59]. Diese Anforderungen werden dadurch erfüllt, dass für die zu erwartenden Umgebungsbedingungen eines Bauteils die zutreffenden Expositionsklassen gemäß o. g. Regelwerke vom erfahrenen Planer festgelegt und die den Expositionsklassen zugeordneten beton-technologischen und konstruktiven Maßnahmen angewandt werden. Die Bemessung der Dauerhaftigkeit gilt gemäß den o. g. Regelwerken für einen Nutzungszeitraum von 50 Jahren [60].

Die klimatischen Bedingungen spielen bei der Bemessung eine entscheidende Rolle. Wie aus den in Kapitel 4 dargestellten Schädigungsarten und -mechanismen ersichtlich wird, ist die Betonfeuchte der maßgebende Parameter zur Beurteilung der Schadensintensität. Darüber hinaus sind es Einflüsse aus der Atmosphäre (Luft, Temperatur etc.) und der Nutzung (insbesondere Streusalze), die zum Schaden führen können.

Vor diesem Hintergrund ist es zur zielsicheren Einordnung der unterschiedlichen Umwelteinwirkungen notwendig, die klimatischen Bedingungen zu differenzieren, siehe Tabelle 6.

Für die Beurteilung einer dauerhaftigkeitsrelevanten Beanspruchung ist eine genaue Kenntnis des Mikroklimas notwendig, das seinerseits nicht nur

durch das Makroklima beeinflusst wird, sondern insbesondere durch die Lage eines Bauteils. Zu berücksichtigen sind dabei z. B. exponierte Lagen mit Schlagregengefahr und direkter Sonneneinstrahlung auf die Betonoberfläche [40]. Diese Klassifizierungen sind in den relevanten Normen DIN 1045-2 [54] und DIN EN 206-1 [52] entsprechend verankert. In Ergänzung dazu sind für die Bemessung neuer Bauteile in der ZTV-ING [56] ergänzende Angaben zu den Expositionsklassen im Speziellen definiert [20, 21, 22, 52, 54]. In Tabelle 7 sind die für die Bemessung von Brückenbauteilen maßgeblichen Expositionsklassen nach DIN-Fachbericht 100 [57] unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen der ZTV-ING [56] aufgeführt.

Die möglichen, an einer Straßenbrücke auftretenden Einwirkungen aus der Umwelt sind exemplarisch dem Bild 7 zu entnehmen.

Sollten auch die Expositionsklassen XS (Bewehrungskorrosion durch Meerwasser) oder die Expositionsklassen XM (Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchungen) relevant werden, so ist eine Bemessung gemäß DIN-Fachbericht 100 [57] vorzunehmen.

Wie bereits geschildert sind für Verkehrsbauwerke spezielle Anforderungen in der ZTV-ING [56] fest-

Klassifizierung	Definition, Erläuterung
Makroklima	Klima in der Region, in der das Bauwerk errichtet wird, z. B. mitteleuropäisches Klima mit durchschnittlichen Niederschlagsmengen, Windverhältnissen und Frost-Tauwechseln
Mesoklima	Spezifische Bedingungen am Ort des Bauwerks, z. B. Straßenverkehr mit Tausalzbeaufschlagung im Fall einer Straßenbrücke
Mikroklima	Spezifische Bedingungen an der Betonoberfläche, z. B. Spritzwasser oder Sprühnebel

Tab. 6: Differenzierung umweltbedingter Einwirkungen [22]

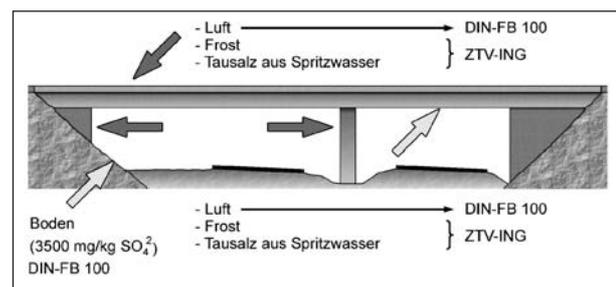


Bild 7: Einwirkungen aus der Umwelt nach [61]

gelegt. Diese berücksichtigt neben den mikroklimatischen Bedingungen auch die bauteilspezifischen Eigenschaften, z. B. die der Kappen. Die Expositionsklassen, die im Bemessungsfall ausschlaggebend werden und die zu projektierende Betonzusammensetzung vorgeben, können einzelnen Brückenbauteilen aufgrund ihrer Lage zugeordnet werden, siehe Tabelle 8.

Für die zu verwendende Betonzusammensetzung geben in der Regel die Expositionsklassen für Chloride oder Frost die entscheidenden Eigenschaften vor, da sie die jeweils höchsten Anforderungen an die Betonrezeptur und die Ausführung stellen und somit zur Erhöhung des Widerstands maßgeblich beitragen. Diese konservative Vorgehensweise bildet die in der Praxis vorliegenden Verhältnisse nicht vollständig ab.

Die kombiniert auftretenden Einwirkungen interagieren untereinander und können genau genommen nicht separat voneinander betrachtet werden. So wird beispielsweise die Karbonatisierung bei einer Einwirkung von Chloriden und Frost nicht bemessungsrelevant. Dennoch ist i. d. R. mit einer Karbonatisierung der oberflächennahen Bereiche zu rechnen. Diese hat in jedem Fall auch einen Ein-

fluss auf die Einwirkungen durch Chloride und Frost, die jedoch in der bisherigen Form in der Bemessung nicht berücksichtigt werden können.

Der Detaillierungsgrad zur Stärke der Expositionsklassen sowie die damit verbundenen Zuordnungen zum jeweiligen Betonbauteil entsprechen nicht

Bauteil	Expositionsklassen
Kappen	XD3 + XF4*)
Betonschutzwände	XD3 + XF4
Flächen ausschließlich im Sprühnebelbereich, z. B. Überbauten, Pfeiler unter hohen Talbrücken	XD1 + XF2
nicht vorwiegend horizontale Flächen im mittelbaren Spritzwasserbereich, z. B. Widerlager, Pfeiler	XD2 + XF2
Trogsohlen mit außen liegender Folienabdichtung	XD1
Trogsohlen als WU-Konstruktion	XD2
Gründungen	XD2
*) Anforderungen an den Beton abweichend von dem DIN-FB 100	

Tab. 8: Zuordnung der Bauteile und Bauwerkszonen nach Expositionsklassen gemäß ZTV-ING [56]

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)
Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung		
XC4	wechselnd nass und trocken	Außenbauteile mit direkter Beregnung
Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser		
XD1	mäßige Feuchte	Bauteile im Sprühnebelbereich von Straßenverkehrsflächen; Einzelgaragen
XD2	nass, selten trocken	Solebäder; Bauteile, die chloridhaltigen Industrieabwässern ausgesetzt sind
XD3	wechselnd nass und trocken	Teile von Brücken mit häufiger Spritzwasserbeanspruchung; Fahrbahndecken; direkt befahrene Parkdecks
Frostangriff mit und ohne Taumittel		
XF1	mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel	Außenbauteile
XF2	mäßige Wassersättigung, mit Taumittel	Bauteile im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, soweit nicht XF4; Betonbauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser
XF3	hohe Wassersättigung, ohne Taumittel	offene Wasserbehälter; Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser
XF4	hohe Wassersättigung, mit Taumittel	Verkehrsflächen, die mit Taumitteln behandelt werden; überwiegend horizontale Bauteile im Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen; Räumlerlaufbahnen von Kläranlagen; Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone
Betonkorrosion durch chemischen Angriff		
XA2	chemisch mäßig angreifende Umgebung	Bauteile in betonangreifenden Böden

Tab. 7: Expositionsklassen für die Bemessung von Brückenbauteilen hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit gemäß DIN FB 100 [57]

den tatsächlich in der Realität vorherrschenden Umweltbedingungen. Die Zonierung der Bauwerksbereiche hinsichtlich der zu erwartenden Expositionen sind als erste Bemessungshilfe zweckdienlich, können jedoch die tatsächlichen Bedingungen am Bauteil nur grob abschätzen.

Ein weiteres grundsätzliches Problem liegt in den deskriptiven Eigenschaften des vorgestellten Bemessungskonzeptes. Die Expositionsklassen sollen gewährleisten, dass das Bauteil mit einem ausreichenden Widerstand bemessen wird, der verhindert, dass innerhalb der festgelegten Nutzungsdauer ein Schaden am Bauteil eintritt. Das deskriptive „Bemessungskonzept“ nach DIN-Fachbericht 100 [57] und ZTV-ING [56] beruht in Bezug auf die betontechnologischen Angaben jedoch auf Erfahrungswerten, sodass dem planenden Ingenieur nicht ersichtlich ist, mit welcher Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit ein Bemessungswert über- oder unterschritten wird.

Zudem liegt diesem deskriptiven „Konzept“ hinsichtlich des Bemessungszeitraums eine erwartete mittlere Nutzungsdauer von 50 Jahren – bei Berücksichtigung eines „angemessenen“ Instandhaltungsaufwands – zugrunde. Eine ingenieurmäßige Bemessung auf Dauerhaftigkeit, d. h. der rechnerische Nachweis der Dauerhaftigkeit für eine bestimmte Lebensdauer, ist hierbei nicht vorgesehen. Somit führt die Anwendung der Norm zu unwirtschaftlichen und/oder mangelhaften bautechnischen Lösungen, wenn die Nutzungsdauer eines Bauwerks z. B. nur 10 Jahre oder aber mehr als 100 Jahre betragen soll.

Grundsätzlich dient das deskriptive Konzept nur der Bemessung für zu erstellende Bauwerke. Für Instandsetzungsmaßnahmen und Beurteilungen der Lebensdauer bestehender Betonbauwerke liefert dieses Konzept nur begrenzt nutzbare Ansatzpunkte. Die in der Bemessung vorgesehenen Widerstände können im Nachhinein nur teilweise überprüft werden und Abweichungen davon sind schwer zu bewerten.

Zusammenfassend gilt, dass zu den in Normenwerken (z. B. [52] und [54]) vorzufindenden Angaben zur Stärke der Exposition und der darauf aufbauenden Zonierung des Bauwerks sinnvolle Erweiterungen hinsichtlich der oben genannten Punkte festgelegt werden sollten.

6.1.2 Probabilistisches Konzept

Bei Baukonstruktionen wie Brücken, die einem hohen Risikopotenzial ausgesetzt sind, reichen die deskriptiven Konzepte zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit nicht aus. Die Forderung nach einer ingenieurmäßigen Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauwerken – in Analogie zur klassischen Tragwerksbemessung – hat zur Folge, dass eine zukünftige Dauerhaftigkeitsbemessung quantitative Aussagen über die geforderte oder vorhandene Bauteil- bzw. Bauwerkslebensdauer beinhalten muss. Um diese Forderung rechnerisch berücksichtigen zu können, ist es notwendig, probabilistische Methoden unter Festlegung eines definierten Grenzzustandes, den das betrachtete Bauteil innerhalb der vorgesehenen Nutzungsdauer nicht überschreiten darf, anzuwenden. Das Erreichen des Grenzzustands wird als „Versagen“ eingestuft. In diesem Zusammenhang handelt es sich i. d. R. nicht um ein tatsächliches Versagen der Konstruktion im statischen Sinne, sondern um einen ungewollten Bauteilzustand, der aus ökonomischen Gründen nicht überschritten werden sollte, siehe Kapitel 4.1.2.

Ob ein festgelegter Grenzzustand erreicht, über- oder unterschritten wird, soll mit Hilfe von Zuverlässigkeitsbetrachtungen (Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten) beurteilt werden. Darüber hinaus müssen in Verbindung mit quantifizierbaren Bauteilbeanspruchungen und Materialwiderständen (Modellparameter) weitgehend abgesicherte Stoffgesetze zur Modellierung des Schadensfortschritts vorliegen. Diese Art von Dauerhaftigkeitsbemessung entspricht dem so genannten probabilistischen Konzept.

Der Unterschied zwischen deskriptivem und probabilistischem Konzept wird im Bild 8 und Bild 9 deutlich. Dem Anwender des deskriptiven Konzeptes bleibt verborgen, welcher Sicherheitsabstand zwischen Einwirkung und Widerstand zum Zeitpunkt „50 Jahre“ vorliegt. Abweichend von den 50 Jahren kann die Entwicklung des Sicherheitsabstandes zwischen Einwirkung E und Widerstand R nicht eingeschätzt werden, siehe hierzu Bild 8.

Im Gegensatz dazu lassen sich im probabilistischen Konzept das Bauteilalter und die Entwicklung des Bauteilwiderstands und der Bauteileinwirkung quantitativ berücksichtigen.

Der zeitlich veränderliche Zustand des Bauteils lässt sich anhand einer für den jeweiligen Schä-

digungsprozess gültigen Einwirkungs- und Widerstandsfunktion (E bzw. R) beschreiben, siehe Bild 9.

Da sowohl die Einwirkungen als auch die Widerstände Streuungen unterliegen (hier angedeutet durch die Verteilungskurven), müssen die jeweiligen physikalischen Modelle probabilistisch formuliert sein. Die Größe des mit der Zeit zunehmenden Überschneidungsbereichs der beiden Verteilungskurven bildet ein Maß für die Schädigungswahrscheinlichkeit (Versagenswahrscheinlichkeit P_f). Die einzelnen Schritte zur Durchführung einer probabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessung können z. B. aus [62] entnommen werden.

Die Möglichkeit zur Anwendung einer probabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessung ist durch das leistungsbezogene Entwurfsverfahren gemäß Anhang J der DIN EN 206-1 gegeben [63]. Beispiele hierzu sind der Literatur [64] zu entnehmen.

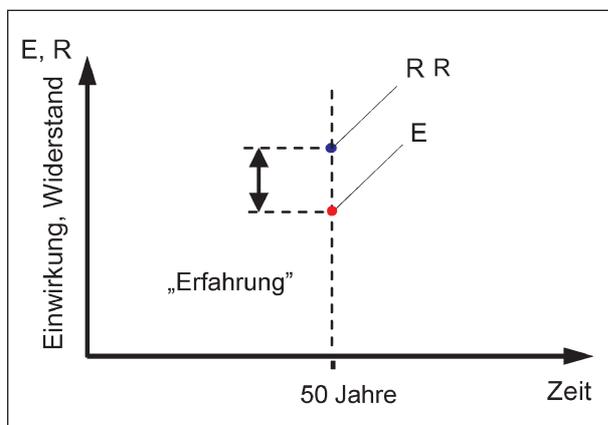


Bild 8: Schema des deskriptiven Bemessungskonzepts

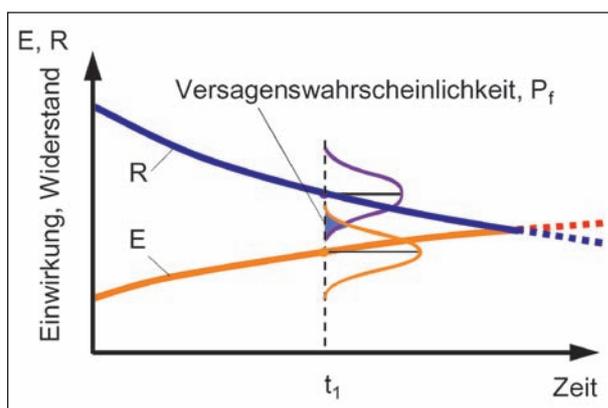


Bild 9: Schema des probabilistischen Bemessungskonzepts

7 Risikoanalyse – Bewertung des Risikos für Systeme

Für eine umfassende Beurteilung des Versagens- oder Schädigungsrisikos eines Gesamtbauwerks auch über die Bemessungsphase hinaus sind Risikoanalysen sinnvoll.

Die Methode der Risikoanalyse findet hierbei Anwendung bei der Untersuchung des Einflusses von einzelnen Komponenten auf das Systemverhalten [65]. Dabei wird im Wesentlichen die Sicherheit komplexer Systeme durch Erfassung des Zusammenwirkens der Systemkomponenten untersucht.

Zunächst wird die Zustandsentwicklung der einzelnen Bauteile unter den maßgebenden Einwirkungen losgelöst vom Gesamtsystem prognostiziert. Anschließend müssen zur Abschätzung der Restlebensdauer eines komplexen Gesamtbauwerks die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bauteilen sowie die Bedeutung der Bauteile für das Gesamtsystem erfasst werden, siehe Tabelle 9.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Untersuchung der Bauwerkszuverlässigkeit ist die Beurteilung des möglichen Versagens (Betriebsversagens) der einzelnen Bauteile in Verbindung mit den dazugehörigen Schadensfolgen. Die wesentlichen Elemente einer Risikoanalyse gemäß Tabelle 9 werden nachstehend kurz aufgezeigt.

7.1 Systemanalyse

Die Systemanalyse untersucht das Zusammenwirken der Systemkomponenten untereinander. Zur Systemanalyse gehören die Schritte Systembeschreibung, Ausfalleffektanalyse und Fehlerbaumanalyse, die nachfolgend erläutert werden.

7.1.1 Systembeschreibung

Zunächst müssen im Zuge einer Systembeschreibung die tabellarische Auflistung und grafische Dar-

I	Durchführung einer Systemanalyse: Systembeschreibung Ausfalleffektanalyse Fehlerbaumanalyse
II	Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten der Systemelemente und Analyse des Systemversagens
III	Quantifizierung des Risikos

Tab. 9: Arbeitsschritte zur Durchführung einer Risikoanalyse

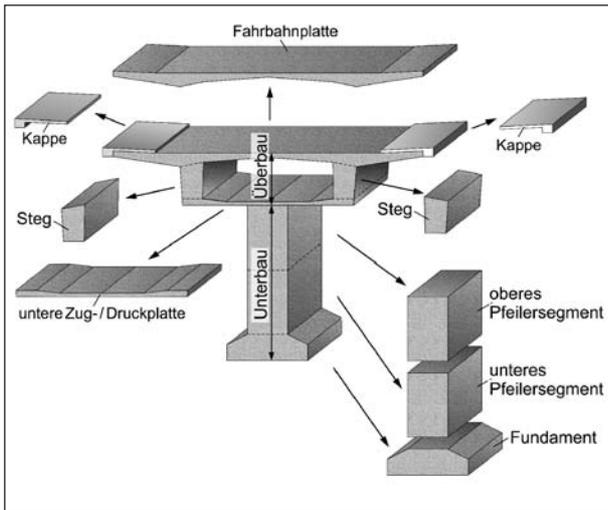


Bild 10: Prinzip der Untergliederung eines Brückenbauwerks

stellung („Untergliederung“) der wesentlichen Systemelemente eines Bauwerks (in der einschlägigen Fachliteratur wird auch der Begriff Systemkomponenten verwendet) durchgeführt werden. Die Darstellung in Bild 10 zeigt eine mögliche Untergliederung des Systems „Brücke“ in seine wichtigsten Systemelemente (Bauteile) bzw. Bauteilbereiche, die unterschiedlichen dauerhaftigkeitsrelevanten Beanspruchungen und singulären Risiken ausgesetzt sein können.

Den Systemelementen nach Bild 10 sind die jeweiligen maßgebenden dauerhaftigkeitsrelevanten Betonschädigungen zuzuordnen. Eine Einordnung kann beispielsweise analog zur im Kapitel 6.1.1 vorgestellten Tabelle 8 erfolgen. Der erforderliche Detaillierungsgrad der Systembeschreibung hängt u. a. von der Schädigung einzelner Systemelemente ab und kann auch bei großen Bauwerken oftmals vergleichsweise einfach gewählt werden. Vereinfachend werden hier nur die dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsmechanismen von Betonbauteilen betrachtet.

7.1.2 Ausfalleffektanalyse

Das Bauwerk als System besteht aus einer Vielzahl von Systemelementen, die miteinander in einer funktionalen Beziehung stehen. Das jeweilige (planmäßige oder unplanmäßige) Zusammenwirken der einzelnen Systemelemente entscheidet über die Funktionsfähigkeit des Bauwerks.

Abhängig von der Art und Weise der funktionalen Verbindung der Systemelemente kann ein vereinzelt oder kombiniertes Versagen der Elemente

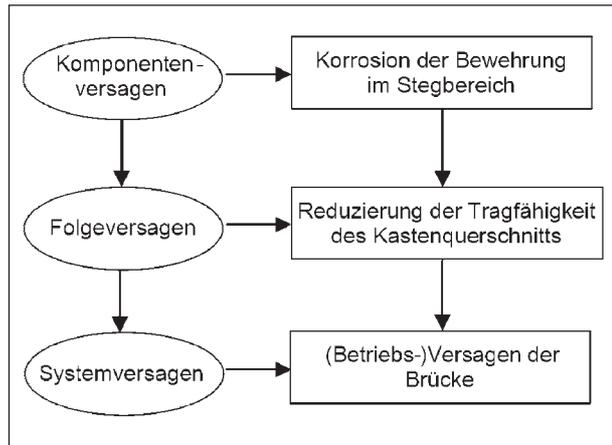


Bild 11: Schema einer Ausfalleffektanalyse mit Beispiel

zum Systemversagen bzw. zum Versagen bestimmter Systembereiche führen. Um sich über diesen Sachverhalt Klarheit zu verschaffen, muss im nächsten Schritt eine Ausfalleffektanalyse durchgeführt werden, siehe Bild 11.

Das wesentliche Ziel der Ausfalleffektanalyse ist die Untersuchung des Systemverhaltens beim Versagen einzelner Systemelemente, d. h. die Untersuchung der Auswirkungen möglicher Versagensmechanismen.

7.1.3 Fehlerbaumanalyse

Der Zweck einer Fehlerbaumanalyse liegt in der systematischen, deduktiven Identifikation aller möglichen Ursachen, die zu dem unerwünschten Ereignis führen, siehe Bild 12 und Bild 13.

Die Fehlerbaumanalyse stellt bereits einen wesentlichen Baustein zur Ermittlung des Gesamtversagens des Systems dar. Innerhalb der Verknüpfung der Ereignisse E_i (Versagen einzelner Systemelemente) wird grundsätzlich zwischen zwei Elementaranordnungen – dem Seriensystem und dem Parallelsystem – unterschieden [66]. Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Seriensystems liegt in den nachfolgend aufgeführten Grenzen, siehe Gl. (13).

$$\max [P_{fi}] \leq P_{f,serie} \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{fi}) < \sum_{i=1}^n P_{fi} \quad (13)$$

Unter Verwendung von Gl. (14) können die obere und untere Grenze der Versagenswahrscheinlichkeit für Parallelsysteme ermittelt werden. Darin sind $P_{f,serie}$ bzw. $P_{f,parallel}$ die Versagenswahrscheinlichkeiten des Serien- bzw. Parallelsystems und P_{fi} die Versagenswahrscheinlichkeiten der entsprechenden Systemelemente [67].

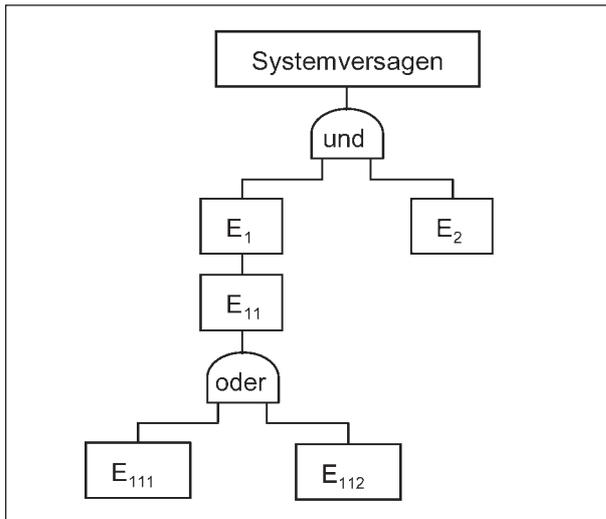


Bild 12: Schema einer Fehlerbaumanalyse (E_i = Ereignis i)

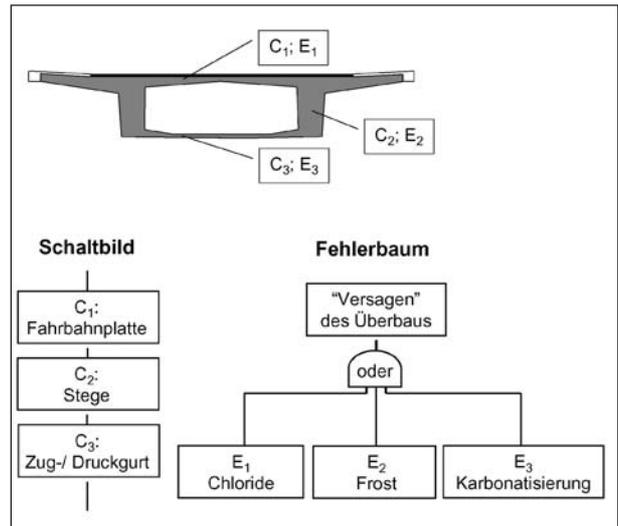


Bild 14: Schema einer Fehlerbaumanalyse (C_i = Element i, E_i = Ereignis i)

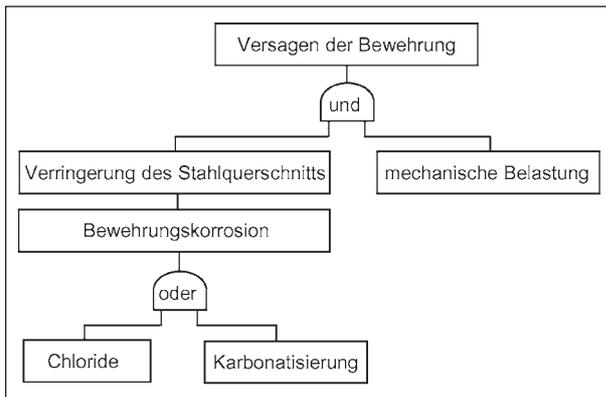


Bild 13: Beispiel einer Fehlerbaumanalyse für karbonatisierungs- bzw. chloridinduzierte Bewehrungskorrosion

$$\prod_{i=1}^n P_{fi} \leq P_{f,Parallel} \leq \min [P_{fi}] \quad (14)$$

Im Nachfolgenden wird beispielhaft das Fehlerbaum-Schema der Systemzuverlässigkeit für die Kombination der dauerhaftigkeitsrelevanten Beanspruchungen chloridinduzierte Bewehrungskorrosion (Fahrbahnplatte, C₁), Frostbeanspruchung (Kastenstege, C₂) und karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion (untere Zug-/Druckplatte, C₃) aufgezeigt, siehe Bild 14.

Bei diesem Beispiel sei angenommen, dass je Element nur eine Einwirkung maßgebend wird und dass die Systemelemente zu einem System „zusammengeschaltet“ sind, ohne die genauen Abhängigkeiten zwischen den Elementen zu kennen, sodass die Versagenswahrscheinlichkeit P_{f,Serie} für das System „Überbau“ innerhalb der elementaren Grenzen gemäß Gl. (13) ermittelt werden muss. Für diesen Fall tritt ein Systemver-

sagen dann ein, wenn Element C₁ oder Element C₂ oder Element C₃ versagt. Das in Bild 14 dargestellte Schaltbild, in Verbindung mit dem dazugehörigen Fehlerbaum, verdeutlicht diesen Sachverhalt.

7.2 Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten der Systemelemente und Analyse des Systemversagens

Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit (Versagenswahrscheinlichkeit) für das Eintreten eines Bauteilschadens, resultierend aus nutzungs- und/oder umweltbedingten Einwirkungen, kann im Wesentlichen auf der Basis zweier unterschiedlicher Ansätze erfolgen:

- dem statischen Ansatz und
- dem dynamischen Ansatz.

Beide Ansätze werden im Folgenden vorgestellt.

7.2.1 Statischer Ansatz

Den statischen Ansatz kennzeichnet, dass konstante Werte für das Eintreten definierter Versagenswahrscheinlichkeiten einzelner Systemelemente verwendet werden, siehe z. B. [18] oder [70]. Die gewählten Wahrscheinlichkeiten sind Ergebnisse langjähriger Erfahrung oder Statistiken.

7.2.2 Dynamischer Ansatz

Der dynamische Ansatz wurde im Software-Paket STRUREL [68] realisiert. Es bietet die Möglichkeit, die zeitabhängige grenzzustandsbezogene Versagenswahrscheinlichkeit für einen ungewollten Bauteilzustand zu ermitteln. Den auf diese Weise berechneten Wahrscheinlichkeiten sind baustofftechnologische Eigenschaften zugrunde gelegt. Alle Parameter können anhand von Bauwerksuntersuchungen angepasst und die Versagenswahrscheinlichkeit entsprechend aktualisiert werden (Bayesisches Updating).

7.3 Quantifizierung des Risikos

Unabhängig davon, auf welche Weise die Versagenswahrscheinlichkeit eines Systems ermittelt wird, kann das Risiko bzw. Gesamtrisiko R_{ges} eines ungewollten Ereignisses im System mit Hilfe der Gl. (15) berechnet werden:

$$R_{\text{ges}} = \sum (P_i \cdot K_{vi}) \cdot e \cdot b \quad (15)$$

Darin ist P_i die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses i und K_{vi} sind die Schadenskosten für das Ereignis i . Die Variable e beinhaltet die Erfahrung des Unternehmers und b die Anforderungen des Bauherrn. Unter Verwendung der Gl. (15) ist eine Verknüpfung der berechneten Versagenswahrscheinlichkeit (Ausfallwahrscheinlichkeit) des Gesamtsystems bzw. der Systemelemente mit den zu erwartenden Schadenskosten möglich.

8 Berücksichtigung von kombinierten Einwirkungen im Rahmen einer Risikoanalyse

8.1 Grundsätzliche Überlegungen

Die in [62] exemplarisch aufgezeigte Modellierung kombiniert auftretender Einwirkungen stellt einen ersten zielführenden Ansatz dar. Verschiedene Grenzzustände werden über mathematische Betrachtungen miteinander verknüpft, siehe Gl. (13). Hierbei erfolgt die Modellierung der unterschiedlichen Einwirkungen als Seriensystem, d. h., es liegt eine „Oder“-Verknüpfung vor. Abhängig davon, wie viele Parameter der miteinander korrelierenden Grenzzustandsfunktionen voneinander abhängig oder unabhängig sind, erhöht oder reduziert sich

die Systemsicherheit. Baustofftechnologische Interaktionen in Form von beschleunigenden oder retardierenden Einflüssen auf den Bauteilwiderstand durch einen jeweils anderen Schädigungsmechanismus werden hierbei zunächst nicht berücksichtigt.

Es besteht die Möglichkeit, baustofftechnologische Gesetzmäßigkeiten mit mathematischen Betrachtungen zu verknüpfen, um eine realitätsnahe Quantifizierung der Lebensdauer vornehmen zu können. Eine modifizierte und erweiterte Fehlerbaumanalyse in der Kombination mit dem Softwarepaket STRUREL [68] erscheint hierbei viel versprechend.

8.2 Anwendbarkeit der Fehlerbaumanalyse im System Brückenbauwerk

Die Fehlerbaumanalyse wird im Bereich der Bauwerkserhaltung bereits eingesetzt und auch im Bereich der Infrastrukturbauwerke bzw. Brückenbauwerke in der Literatur thematisiert [9, 18, 69, 70, 71].

Eine Lebensdauerprognose mit Hilfe der Fehlerbaumanalyse nach DIN 25424, Teil 1 und 2 [72, 73] lässt erste Approximationen über die zu erwartende Lebensdauer eines Brückenbauwerkes zu. Die Fehlerbaumanalyse weist jedoch neben den genannten Vorteilen auch einige Nachteile auf. Viele der Nachteile sind bekannt, weshalb in Forschung und Literatur Alternativdarstellungen und Erweiterungen diskutiert werden, die der komplexen Systemstruktur eines Brückenbauwerkes Rechnung tragen. Mängel und bestehende Ansätze hinsichtlich einer Mangelbehebung werden hier im Folgenden kurz vorgestellt.

8.2.1 Modellierung der Schädigungsmechanismen als Ereignisse

Gemäß einem logischen Aufbau wird die Systemstruktur in ihre Systemelemente unterteilt und die dazugehörigen Versagenswahrscheinlichkeiten zugeordnet. Die Versagenswahrscheinlichkeit einzelner Systemsubstrukturen oder -elemente kann dabei jedoch im Allgemeinen nur auf der Grundlage von empirischen Daten erfolgen, z. B. anhand von Erfahrungswerten. Materialspezifische Schädigungs-Zeit-Gesetze finden in einer solchen Fehlerbaumstruktur bislang kaum oder gar keinen Eingang. Bei einer baustofftechnologischen Dauerhaf-

tigkeitsbetrachtung stehen jedoch die Schädigungsmechanismen im Vordergrund, die eine Aussage über die Schädigungsentwicklung über die Zeit ermöglichen und sich durch technologische Parameter abbilden lassen, siehe Kapitel 4.3. Das Eintreten eines „singulären“ Ereignisses ist dafür oftmals nur die Ursache (z. B. eine nicht funktionierende Entwässerung oder Undichtigkeiten in der Abdichtung).

ZHU [18] entwickelt ausgehend von einem Fehlerbaum des Gesamtsystems jeweils einen Sub-Fehlerbaum für die unterschiedlichen Systemelemente, der die Ursachen eines möglichen Systemversagens abdecken soll. Den unteren Abschluss des Fehlerbaums stellen dabei nicht die Basis-Ereignisse dar, sondern vom Autor eingeführte „House“-Symbole, die so genannten „Input“-Events (Eingangs-Ereignisse), siehe Tabelle 10. ZHU [18] wählt in diesem Beispiel die Einwirkungen Chloride, Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Karbonatisierung und

Schwinden. Mit diesen Eingangs-Ereignissen ist eine Möglichkeit gegeben, nicht nur Systemelemente und ihr Versagen im Fehlerbaum zu berücksichtigen, sondern auch die dafür verantwortlichen Schädigungsmechanismen. Hierbei verwendet ZHU [18] für das Eintreten eines Schadens infolge der genannten Schädigungsmechanismen konstante Versagenswahrscheinlichkeiten.

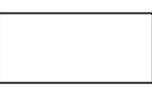
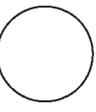
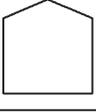
Die Verwendung des „House“-Symbols ist jedoch nicht eindeutig. HENLEY und KUMAMOTO [69] verstehen zum Beispiel unter dem Symbol ein Ereignis, das entweder eintritt oder nicht eintritt, ein so genanntes Schaltereignis. In der DIN-Norm für Fehlerbäume DIN 24424-1 [72] und 24424-2 [73] ist dieses Symbol nicht erfasst, sodass es keine eindeutige Definition zu geben scheint. Daher muss hier zunächst eine einheitliche Vorgehensweise gewählt und dann auch konsequent beibehalten werden.

8.2.2 Modellierung der kombinierten Einwirkungen

Die einzelnen dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen, die einzeln oder kombiniert auftreten, können innerhalb einer Fehlerbaumstruktur nur durch „Und“- oder „Oder“-Gates miteinander verknüpft werden, siehe Tabelle 10 (im Nachfolgenden werden die „Und“/„Oder“-Gates über die Symbole definiert). Gerade die Interaktionen von Schädigungsmechanismen haben jedoch einen Einfluss auf die Ablaufgeschwindigkeit einer Schädigung. Zwar kann bereits ein einziger Schädigungsmechanismus allein zu einem Schadensereignis führen (z. B. Chloridangriff), in Kombination mit einem weiteren Schädigungsmechanismus kann das Schadensereignis unter Umständen jedoch bereits früher oder auch erst später eintreten (z. B. infolge zusätzlicher Karbonatisierung). Die Interaktion verschiedener Schädigungsmechanismen ist für eine zuverlässige Lebensdauerprognose in jedem Fall zu berücksichtigen, da ein auftretender Schädigungsprozess abhängig davon, ob er allein oder in Kombination auftritt, in seiner Intensität, Auftretenswahrscheinlichkeit und Fortschritts-geschwindigkeit beeinflusst wird. Erste Überlegungen in diese Richtung stellen SIANIPAR und ADAMS [70] vor, siehe Bild 15.

Die Bedeutung der Abkürzungen in Bild 15 sind der Tabelle 11 zu entnehmen.

Von SIANIPAR und ADAMS [70] wurde exemplarisch für die beschleunigte Schädigung einer Fahr-

Logische Tore („Gates“)		
Symbol	Bezeichnung	Zweck
	„Und“-Gate	Ausgangs-Ereignis erfolgt, wenn alle Eingangs-Ereignisse eintreten
	„Oder“-Gate	Ausgangs-Ereignis erfolgt, wenn eines der Eingangs-Ereignisse eintritt
	Verbindung	Verknüpfungslinie zur Verbindung von Symbolen
Ereignisse („Events“)		
Symbol	Bezeichnung	Zweck
	Rechteck	Ereignis zwischen Ursache und Folge
	Kreis	Basis-Ereignis
	Fünfeck („House“-Symbol)	Eingangs-Ereignis
	Dreieck	Transfer

Tab. 10: Erklärung der bei der Fehlbaumanalyse zu verwendenden Symbole

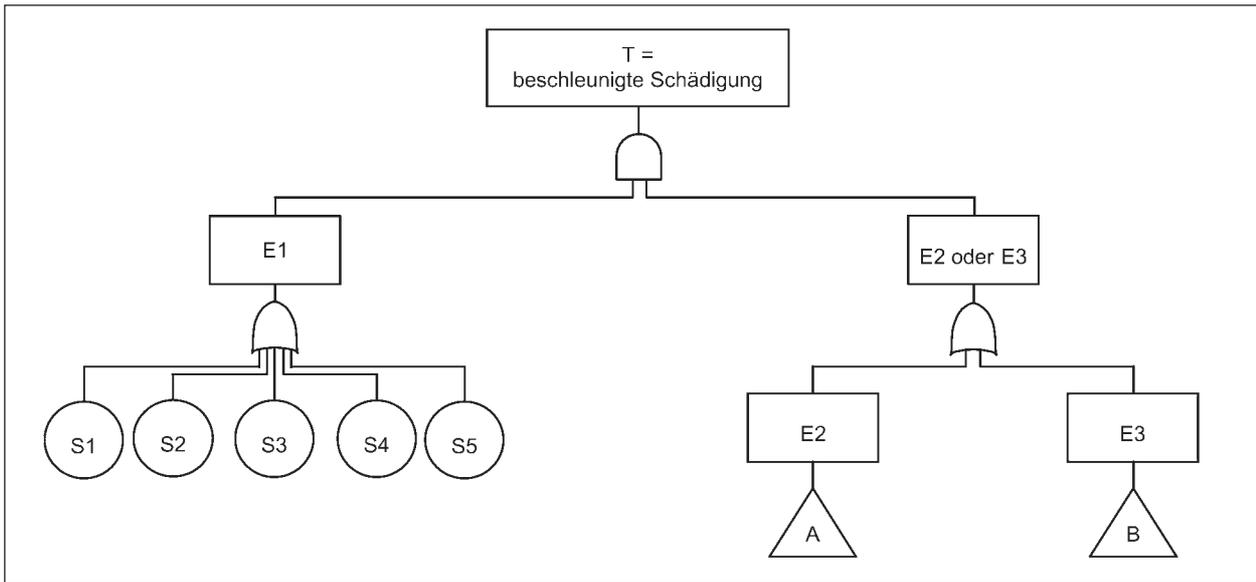


Bild 15: Fehlerbaum für eine beschleunigte Schädigung einer Fahrbahn aus Beton [nach 70]

Abkürzung	Bedeutung
T	Beschleunigte Schädigung der Betonfahrbahnplatte
E1	Schädigung der Betonfahrbahnplatte
E2	Versagen der Lager
E3	Versagen der Fahrbahnübergänge
S1	Schaden an dem Verkehr ausgesetzten Zonen (Ablagerungen, Verschleiß, Ablösungen, Abplatzungen)
S2	Schaden im Bereich der Entwässerung (allgemeine Schädigung des Betons)
S3	Schaden an Lagern und in schubbeanspruchten Bereichen (Ausbrüche, Abplatzungen)
S4	Risse infolge Biegebeanspruchung (oben oberhalb der Auflager und unten zwischen den Auflagern der Platte)
S5	Querverlaufende Risse infolge Biegebeanspruchung (in den Zugbereichen der Platte)
A	Transfer zu möglicher Substruktur von E2
B	Transfer zu möglicher Substruktur von E3

Tab. 11: Bedeutung der in Bild 15 verwendeten Abkürzungen [70]

bahnplatte eine spezielle Fehlerbaumstruktur entwickelt. Hierbei wird berücksichtigt, dass bei einer beschleunigten Schädigung bestimmte Ereignisse miteinander interagieren und der Ausfall eines einzelnen Systemelements andere Systemelemente beeinflusst bzw. zwei voneinander zunächst unabhängige Schädigungen auftreten müssen, die erst bei kombiniertem Auftreten zu einer beschleunigten Schädigung führen. Für die Abbildung einer umfassenden Interaktion von Schädigungsmechanismen

wird eine derartig angelegte Fehlerbaumstruktur jedoch zu umfangreich und unübersichtlich.

8.2.3 Modellierung der Zeitvarianz

Die verwendeten (empirischen) Versagenswahrscheinlichkeiten, die bislang in eine Fehlerbaumstruktur eingegliedert werden können, werden als zeitinvariant angenommen, siehe z. B. [18, 70]. Tatsächlich steht jedoch bei einer Betrachtung der Lebensdauer eines Bauwerks die zeitliche Entwicklung der zu erwartenden Zuverlässigkeit im Zentrum des Interesses. Mit festen Werten, die eine jährliche Ausfallwahrscheinlichkeit wiedergeben, kann über einen längeren Betrachtungszeitraum keine Aussage über eine Entwicklung der Systemzuverlässigkeit getroffen werden.

FRANGOPOL [71] verwendet eine solche Überlegung der Zeitvarianz zwar nicht in einer Fehlerbaumanalyse, implementiert jedoch einen zeitvarianten Zuverlässigkeitsindex in einen Entscheidungsbaum für oder gegen Erhaltungs- bzw. Reparaturmaßnahmen während der Bauwerkslebensdauer. Das Prinzip eines Entscheidungsbaums ist zwar ein anderes als das eines Fehlerbaums, die Idee, zeitvariante Wahrscheinlichkeiten bzw. Zuverlässigkeiten auf diese Weise in ein Fehlerbaummodell einzubinden, sollte jedoch prinzipiell weiterverfolgt werden. Die Modellierung der zeitvarianten Systemzuverlässigkeit ist unter Anwendung des Programmpaketes STRUREL [68] möglich.

9 Modellierung der Interaktion kombiniert auftretender Einwirkungen

9.1 Prinzipielles Vorgehen

Ziel einer umfassenden Lebensdauerbetrachtung ist es, die Eintretenswahrscheinlichkeit des jeweiligen Schädigungsmechanismus entsprechend den Anforderungen zeitvariant abzubilden und mit Hilfe einer modifizierten Fehlerbaumanalyse die Schadensentwicklung für zukünftige Ereignisse zu prognostizieren. Dazu ist ein zuverlässiges Modell zur Bestimmung eines definierten Grenzzustandes zu entwickeln, das die Zeitvarianz, die baustofftechnologischen Schädigungsmodelle und deren Interaktionen und somit die Verknüpfung und Erweiterung der im vorangegangenen Kapitel erläuterten Lösungsansätze berücksichtigt.

Als übergeordnete Struktur kann ein Fehlerbaum für das Gesamtsystem „Brücke“ entwickelt werden, in den alle möglichen Ausfallsszenarien einzelner Systemkomponenten des Bauwerks Eingang finden. In Bild 16 ist ein solches Gesamtsystem schematisch dargestellt.

Die dreieckigen Transfersymbole bedeuten dabei die Schädigung eines Systemelements C_i , das Ereignis E_i , das entweder bereits bei alleinigem Auftreten (Bild 16, rechts) oder erst gemeinsam mit der Schädigung eines anderen Systemelemente, wie im Beispiel die Ereignisse E_1 und E_2 , (Bild 16, links), zu einem Ausfall des Gesamtsystems führt.

Jeder Ausfall eines Systemelements kann als Substruktur dargestellt und dessen Versagenswahrscheinlichkeit ermittelt werden.

Für ein Betonbauteil als Systemelement könnte eine solche Fehlerbaum-Substruktur, wie in Bild 17 gezeigt, erstellt werden. Die Tabelle 10 dient der Erläuterung der in Bild 17 verwendeten Symbole.

Um neben den Einwirkungen aus der Umgebung singuläre Risiken berücksichtigen zu können, erscheint die Anwendung des Konzepts einer beschleunigten Schädigung nach SIANIPAR und ADAMS [70] zielführend. Hierzu wird deren Vorgehensweise aufgegriffen und verallgemeinert, indem für jedes beliebig klein oder groß gewählte Systemelement allgemeingültige Schadensursachen in einen Fehlerbaum eingetragen und die Versagenswahrscheinlichkeiten individuell an das jeweilige Systemelement angepasst werden. Hierbei werden die nachfolgend aufgeführten Schadensursachen unterschieden.

Ohne Einfluss singulärer Risiken

Eine Schädigung durch ausschließlich dauerhaftigkeitsrelevante Mechanismen ohne Einfluss singulärer Risiken ist möglich, siehe Bild 17 linker Strukturstrang. Die Interaktionen und die dadurch bedingten dauerhaftigkeitsrelevanten Mechanismen untereinander sind berücksichtigt, indem die jeweils anderen Mechanismen an den im Einzelfall hauptsächlich wirkenden Schädigungsmechanismus gekoppelt werden. In Bild 17 ist diese Überle-

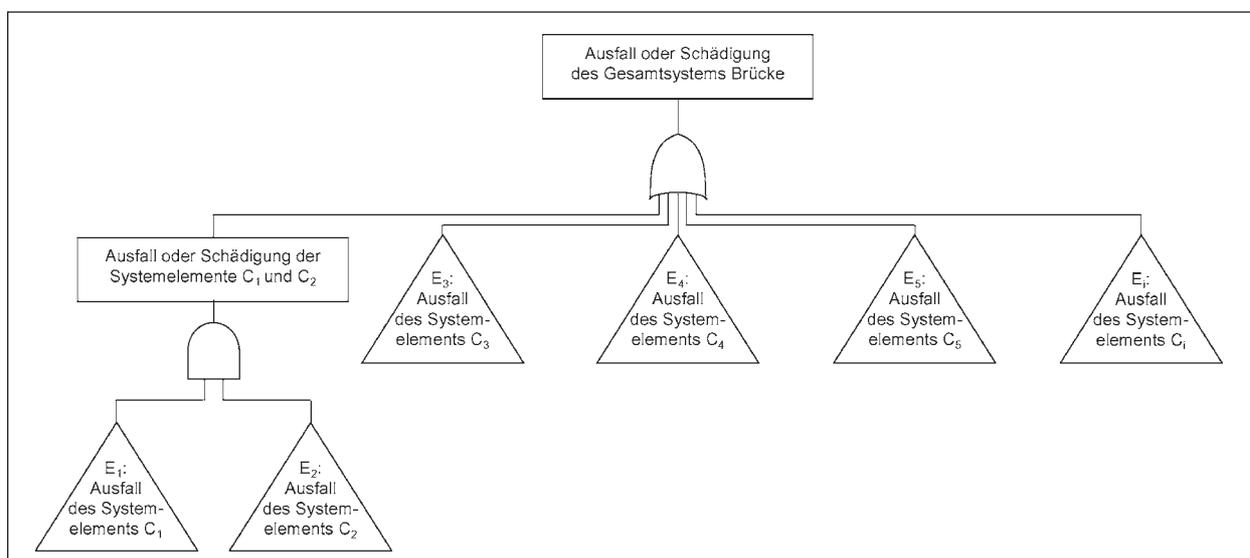


Bild 16: Schematische Darstellung einer Fehlerbaumstruktur für das Gesamtsystem „Brücke“

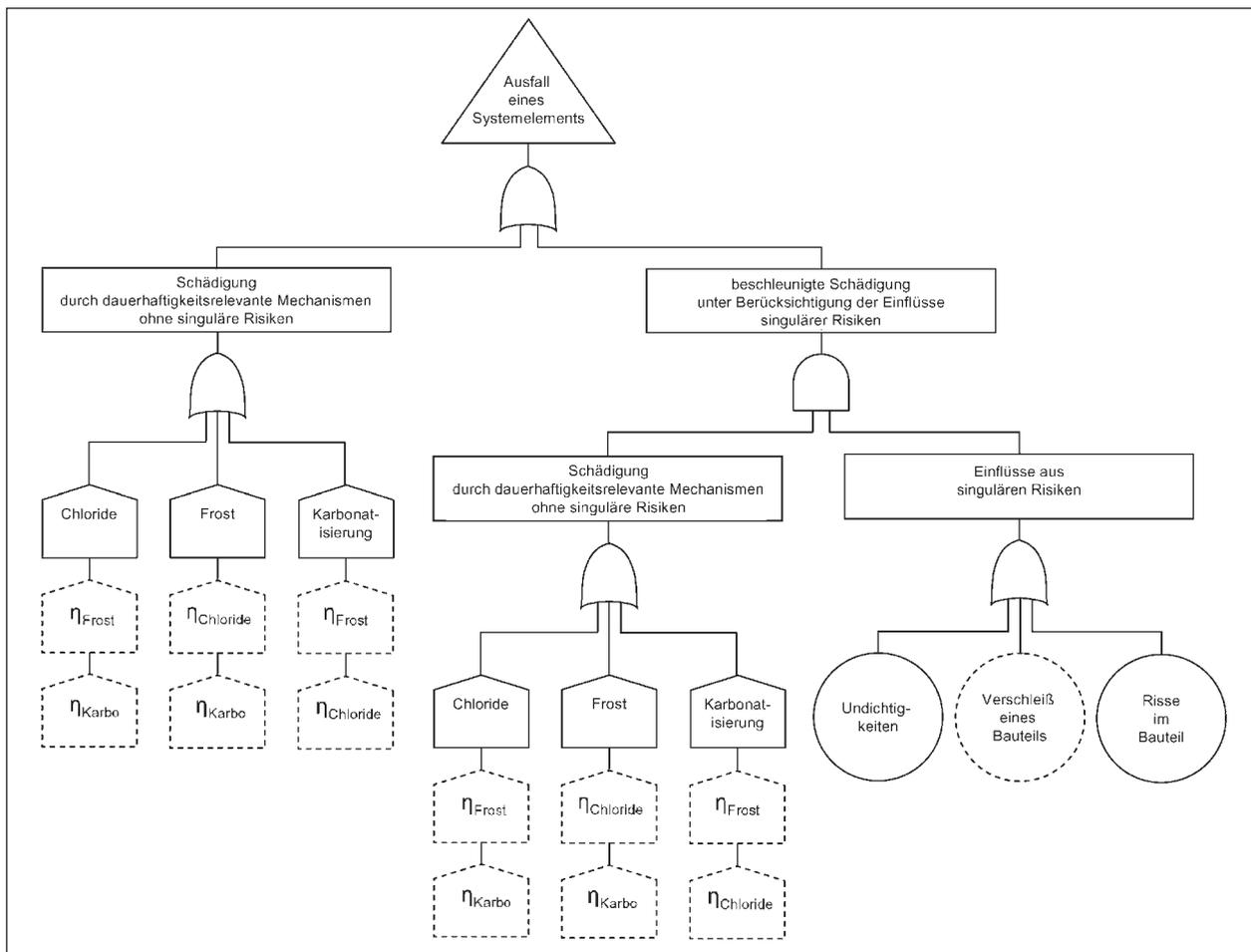


Bild 17: Mögliche Ausbildung einer Substruktur eines Fehlerbaumes unter Berücksichtigung der verschiedenen Einwirkungskombinationen an einer Systemkomponente

gung schematisch durch die gestrichelten und mit einem Faktor η bezeichneten House-Symbole angedeutet. Bislang hat die Literaturrecherche keine Anhaltspunkte für die Verwendung von solchen Faktoren zur Modellierung kombinierter (beschleunigter oder retardierender) Schadensereignisse geliefert. Insofern wird hier ein neuartiger Weg eingeschlagen.

Mit Einfluss singulärer Risiken

Vielfach muss darüber hinaus auch den singulären Risiken als beschleunigenden Schädigungsfaktoren Rechnung getragen werden, siehe Bild 17, rechter Strukturstrang. Dabei werden die dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsmechanismen mit den Einflüssen aus singulären Risiken (z. B. Undichtigkeiten in der Abdichtung) über eine „AND“-Verknüpfung miteinander verbunden. Der Verschleiß einzelner Bauteile muss u. U. differenzierter betrachtet werden, weshalb dieses Basis-Element in der Darstellung zunächst nur gestrichelt dargestellt wurde.

Die Überlegung, das „House“-Symbol als Eingangs-Ereignis in den Fehlerbaum aufzunehmen, erscheint hinsichtlich der logischen und konsequenten Struktur eines Fehlerbaumes sinnvoll. Damit kann eindeutig zwischen Basisereignissen infolge singulärer Mängel, die keinem bekannten oder erfassbaren Schädigungs-Zeit-Gesetz unterliegen und Schädigungs-Zeitmechanismen unterschieden werden. Die Basisereignisse können weiterhin als konstante Wahrscheinlichkeiten auf der Grundlage z. B. empirischer Daten in der Fehlerbaumanalyse berücksichtigt werden. Welche Wahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Ereignisse und Schädigungsmechanismen anzunehmen sind, muss Bestandteil weiterer Forschung sein.

In Bild 17 wurden exemplarisch die singulären Risiken Undichtigkeiten, Verschleiß eines Bauteils und Risse im Bauteil als Basis-Ereignisse gewählt. Weitere singuläre Risiken, zum Beispiel herstellungsbedingte Mängel wie eine unzureichende Verdichtung oder unvollständiger Verbund in Arbeitsfugen, können analog ergänzt werden.

Weitere singuläre Risiken, die nicht direkt auf die Dauerhaftigkeit Einfluss nehmen, wie Schäden aufgrund höherer Gewalt (Sturmschäden oder Verkehrsunfälle etc.), werden hier nicht berücksichtigt.

Die zeitliche Entwicklung einer Versagenswahrscheinlichkeit könnte mit Hilfe der Software STRUREL [68] über die jeweiligen Schädigungsmodelle errechnet und zu einem beliebigen Zeitpunkt der Lebensdauer in einen grafisch übersichtlicheren Fehlerbaum übertragen werden. Entscheidend ist, dass so die Möglichkeit gegeben wird, die Versagenswahrscheinlichkeiten über die Lebensdauer zu verfolgen und damit die Zuverlässigkeitsentwicklung des Brückenbauwerks ständig zu aktualisieren.

Eine erste Beispielrechnung zur Überprüfung der Machbarkeit wurde durchgeführt. Kapitel 9.2 stellt das Vorgehen und die Ergebnisse der exemplarischen Berechnung vor.

9.2 Programmtechnische Umsetzung

9.2.1 Allgemeines

Mit Hilfe einer exemplarischen Berechnung wird die prinzipielle Möglichkeit einer Modellierung interagierender kombinierter Einwirkungen vorgestellt.

Mit der partiellen Betrachtung eines Brückenüberbaus wird für die Modellierung nur ein Ausschnitt des Gesamtsystems „Brücke“ herangezogen. Die Übertragbarkeit auf das Gesamtsystem bzw. andere Bauteile ist prinzipiell gegeben, weshalb das Beispiel zur Überprüfung der Machbarkeit ausreichend ist.

9.2.2 Berechnung innerhalb mathematischer Grenzen

Betrachtet wird für das nachfolgende Beispiel die Schädigung eines Brückenüberbaus mit möglichen Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit. Für die Schädigung werden vereinfachend vier mögliche Einwirkungen vorgeben. Chloridangriff und Karbonatisierung sind zwei dauerhaftigkeitsrelevante Einwirkungen, die einander beeinflussen können. Die dritte Einwirkung ist mit der Schädigung durch eine Alkali-Silika-Reaktion ebenfalls ein Problem der Dauerhaftigkeit. Von der Dauerhaftigkeit des Betons unabhängig wird die vierte Schädigung gewählt. Dabei könnte es sich beispielsweise um konstruktive Mängel infolge einer mangelhaften Ver-

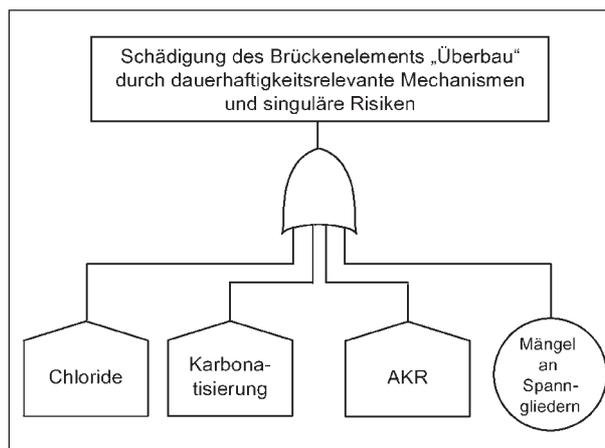


Bild 18: Fehlerbaum des Brücken-Teilsystems „Überbau“ mit vier möglichen Schädigungseinflüssen

pressung der Hüllrohre der Spannstähle und damit einhergehender Schädigung der Konstruktion handeln. Der Schadensfall infolge der Einwirkung aus Frost bleibt in diesem Beispiel unberücksichtigt.

Zunächst werden alle vier Einwirkungen in einer ODER-Verknüpfung miteinander verbunden, siehe Bild 18. Die baustoffbedingten Interaktionen untereinander bleiben hier zunächst unberücksichtigt.

Zur Beurteilung der Bauteilzuverlässigkeit sind die Eintretenswahrscheinlichkeiten der vier genannten Einwirkungen zu quantifizieren. Die Wahrscheinlichkeiten sind für die ersten beiden Einwirkungen, Karbonatisierung und Chloride, durch die Materialgesetze zeitvariant definiert. Für die Beispielrechnungen wurden dafür die Modelle des fib Model Code [19], siehe Kapitel 4.3, verwendet und auf deren Grundlage grenzzustandsbezogene Wahrscheinlichkeiten ermittelt (siehe dazu [62]). Die notwendigen Modellparameter wurden anhand von in der Literatur genannten plausiblen Werten festgelegt [12, 74, 75].

Für die beiden noch zu definierenden Wahrscheinlichkeiten der Angriffe durch AKR und mangelhafter Spannglieder werden aufgrund fehlender Kenngrößen konstante Wahrscheinlichkeiten angenommen, die für dieses Beispiel in Anlehnung an ZHU [18] gewählt wurden. Die Wahrscheinlichkeiten für die Alkali-Kieselsäure-Reaktion wurden zu $5 \cdot 10^{-3}$ ($P_{f,AKR} = 0,5 \%$) und die für die mangelhaften Spannglieder zu $2 \cdot 10^{-2}$ ($P_{f,Sp} = 2,0 \%$) gewählt.

Diese vier Einwirkungen werden mit den oben genannten Annahmen in das Programm SYSREL [68] implementiert, um die Systemzuverlässigkeit des Teilsystems „Brückenüberbau“ zu ermitteln. Be-

trachtet man die Entwicklung der Zuverlässigkeit über einen Zeitraum von 100 Jahren, ergibt sich im hier gewählten Beispiel ein im Bild 19 dargestellter zeitabhängiger Verlauf des Zuverlässigkeitsindex β . Wird der Berechnungszeitpunkt $t = 50$ Jahre betrachtet, so ergeben sich mittels Gl. (13) berechnete Grenzen der Zuverlässigkeit, die zwischen 1,60 und 1,89 liegen.

9.2.3 Berechnung unter Einbezug baustofftechnologischer Interaktionen

Im Rahmen einer weiterführenden Modellierung wurden die zuvor unter baustofftechnologischen Gesichtspunkten unabhängig voneinander betrachteten Einwirkungen Chloride und Karbonatisierung im Folgenden miteinander kombiniert. Über die Einführung des Faktors η_{Karbo} kann die Annahme berücksichtigt werden, dass die Veränderung des Zementsteins aufgrund der Karbonatisierung eine Änderung des Chloriddiffusionskoeffizienten zur Folge hat. Der eingeführte Parameter η_{Karbo} soll daher eine durch die Karbonatisierung bedingte Veränderung des Chloriddiffusionskoeffizienten berücksichtigen, siehe Bild 20.

Bei Annahme einer karbonatisierungsbedingten Veränderung (z. B. Verdichtung) des Betongefüges kann mittels des η_{Karbo} -Faktors die hierdurch resultierende Beeinflussung des Chloriddiffusionskoeffizienten berücksichtigt werden. Bei sinkendem η_{Karbo} ($\eta_{Karbo} < 1,0$) verringert sich der Chloriddiffusionskoeffizient, sodass die Zuverlässigkeit des

Systems steigt. Wird der Widerstand des Betons gegen das Eindringen von Chloriden jedoch reduziert, sinkt entsprechend die Zuverlässigkeit.

Die Parameterstudie für den Faktor η_{Karbo} wird zwischen 0,8 und 1,2 geführt. Der Betrachtungszeitpunkt für die Studie beträgt $t = 50$ Jahre. Der Wert $\eta_{Karbo} = 1,0$ entspricht einem von der Karbonatisierung unabhängigen Chloriddiffusionskoeffizienten, vgl. Bild 19.

Die im Rahmen der Parameterstudie erzielten Wahrscheinlichkeiten P_f und Zuverlässigkeitsindi-

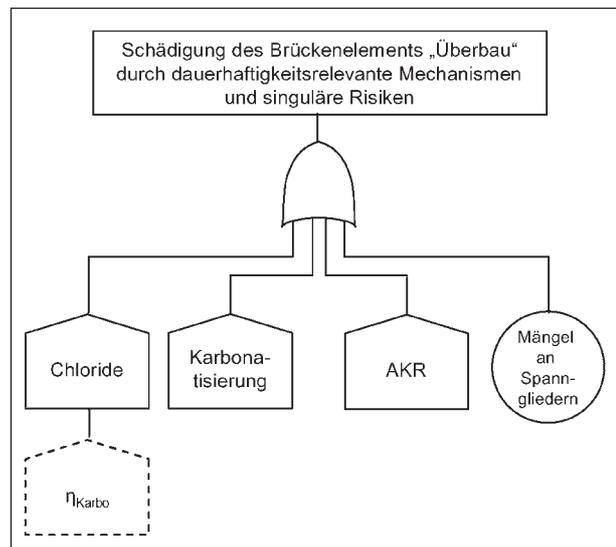


Bild 20: Fehlerbaum des Brücken-Teilsystems „Überbau“ mit vier möglichen Schädigungseinflüssen unter Berücksichtigung des Einflusses der Karbonatisierung auf das Eindringen von Chloriden über η_{Karbo}

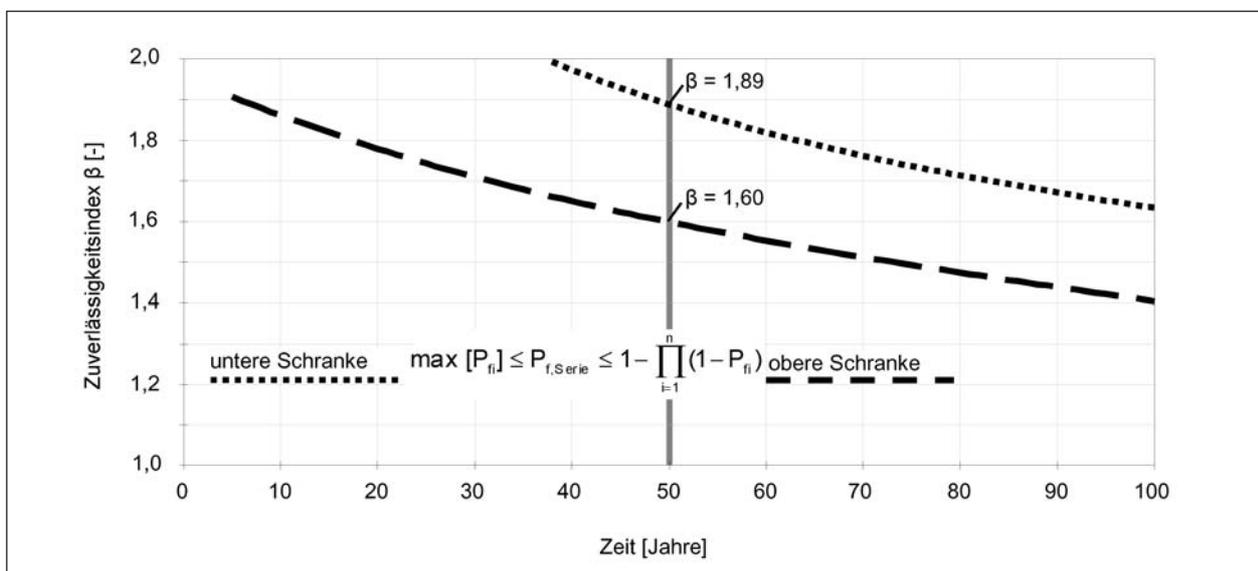


Bild 19: Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex über die Zeit für kombinierte Einwirkungen (Karbonatisierung, Chloride, AKR und mangelhafte Spannglieder) in ihren mathematischen Grenzen

zes β in Abhängigkeit vom Faktor η_{Karbo} sind in der Tabelle 12 zusammengefasst.

Das Diagramm in Bild 21 zeigt die Ergebnisse graphisch. Die Pfeile kennzeichnen die Bereiche, innerhalb derer der Mittelwert des Chloriddiffusionskoeffizienten durch den Faktor η_{Karbo} erhöht bzw. erniedrigt wird.

Wie sich der Chloriddiffusionskoeffizient bei vorangehender Karbonatisierung tatsächlich verhält, muss im Rahmen experimenteller Versuchsprogramme zukünftiger Forschung ermittelt werden. Die exemplarisch durchgeführte Parameterstudie zeigt jedoch deutlich, dass der Einfluss einer sol-

η_{Karbo} [-]	Lower Bound		Upper Bound	
	P_f [%]	β [-]	P_f [%]	β [-]
0,80	2,1	2,03	4,7	1,68
0,84	2,3	2,00	4,8	1,66
0,88	2,5	1,97	5,0	1,65
0,92	2,6	1,94	5,2	1,63
0,96	2,8	1,91	5,3	1,61
1,00	3,0	1,89	5,5	1,60
1,04	3,1	1,86	5,7	1,58
1,08	3,3	1,84	5,8	1,57
1,12	3,5	1,82	6,0	1,55
1,16	3,7	1,79	6,2	1,54
1,20	3,8	1,77	6,4	1,53

Tab. 12: Wahrscheinlichkeiten und Zuverlässigkeiten in Abhängigkeit vom Parameter η_{Karbo}

chen Interaktion auf die Systemzuverlässigkeit entsprechend groß sein kann. Somit muss eine wirklichkeitsnahe Betrachtung der Einwirkungen die Wechselwirkung zwischen Chloriddiffusion und Karbonatisierung berücksichtigen.

10 Forschungsbedarf

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie sollte nicht nur das Potenzial der vorgestellten und erarbeiteten Methode zur Risikoanalyse herausgestellt, sondern auch der noch erforderliche Forschungsbedarf auf diesem Gebiet aufgezeigt werden.

Der Wissensstand über die einzelnen Schädigungsmechanismen im Allgemeinen ist zwar recht umfangreich, im Bereich der Interaktionen besteht jedoch noch ein großer Forschungsbedarf. Dies betrifft sowohl die Entwicklung von geeigneten Stoffgesetzen zur Beschreibung des zeitabhängigen Schädigungsfortschritts als auch die Entwicklung geeigneter Konzepte, diese Stoffgesetze miteinander (z. B. in Fehlerbäumen) zu verknüpfen.

10.1 Rechnergestützte Untersuchungen

Das Hauptaugenmerk liegt auf der Erfassung der gegenseitigen Abhängigkeit der Modellparameter (z. B. Chloriddiffusionskoeffizient), sodass die Möglichkeit geschaffen wird, die gemessenen Veränderungen der Baustoffeigenschaften mit Hilfe

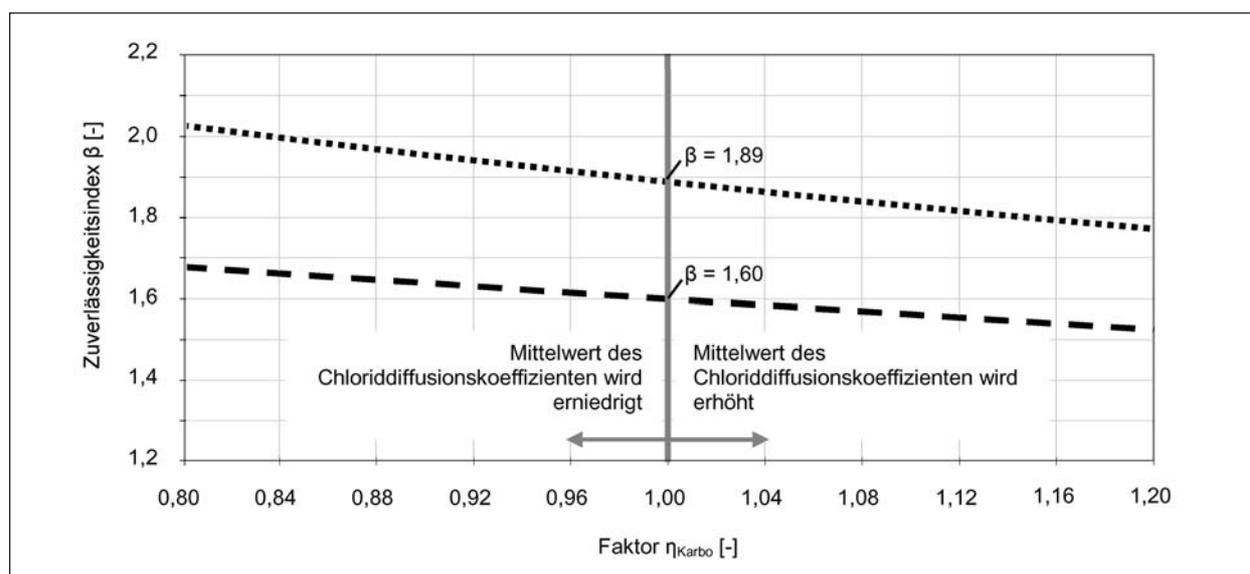


Bild 21: Parameterstudie über den Faktor η_{Karbo} zum Zeitpunkt 50 Jahre

eines Interaktions-Faktors auf die vorhandenen Schädigungs-Zeit-Modelle [19] zu übertragen. Dafür ist es wichtig, näher zu beleuchten, welche Modellparameter sich gegenseitig maßgeblich beeinflussen und miteinander interagieren. Die Spannweiten der in den Modellen verwendeten statischen Kennwerte muss zunächst über eine umfangreiche Literaturrecherche ermittelt werden. Der Literaturrecherche sollte eine computergestützte Untersuchung (z. B. mittels des Programmpakets STRUREL [68]) in Form einer systematischen Sensitivitätsanalyse der Modellparameter folgen. Eine Analyse der Auswirkungen der Modellparameter auf die Entwicklung des Schadens ist eine Voraussetzung für die Einführung eines Interaktionsfaktors zur Simulation der identifizierten Interaktionen.

10.2 Experimentelle Untersuchungen

Für die Umsetzung des in Kapitel 9 formulierten Ansatzes der Modellierung einer baustofftechnologischen Interaktion über den Faktor η müssen jedoch als weitere Voraussetzung auch baustofftechnologische quantitative Nachweise der tatsächlich vorhandenen Interaktion geschaffen werden, z. B. bezüglich der Wechselwirkung Karbonatisierung – Chloride. Dass eine gegenseitige Beeinflussung der dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsmechanismen gegeben ist, wurde durch die erzielten Ergebnisse der durchgeführten Literatursichtung bestätigt. Baustofftechnologische Laborversuche unter wirklichkeitsnahen Randbedingungen müssen durchgeführt und einer detaillierten Bewertung unterzogen werden (z. B. mit Hilfe der Schnellkarbonatisierungsmethode und der Chloridmigrationsprüfung). Die zuvor durchgeführte Sensitivitätsanalyse der Modellparameter soll dabei helfen, die aus den Experimenten gewonnenen Erkenntnisse in den gesuchten η -Faktor zu übersetzen.

10.3 Methodische Untersuchungen

Des Weiteren müssen die Grundlagen der Methodik zur System- und Risikoanalyse weiter und tiefer gehend ausgearbeitet werden. Die verschiedenen Ansätze zur Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit diesen Methoden sind umfassend zu analysieren und zu bewerten. Die Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Softwareprogramme müssen in Hinblick auf die Modellierung von Interaktionen untersucht werden. Die

ausschließliche Anwendung von Fehlerbaum-Analysesoftware ist unter Umständen nicht zielführend, eine Erweiterung mit anderen Programmen – wie bereits innerhalb der Machbarkeitsstudie gezeigt – wäre denkbar und weiter zu verfolgen. Daran anschließend kann für die neue Methode ein Rahmen erarbeitet werden, welcher das programmtechnische Vorgehen beschreibt. Ziel sollte es sein, einen Leitfaden für dieses Vorgehen zu entwerfen.

10.4 Systemerweiternde Untersuchungen

Über die genannten Forschungsschwerpunkte hinaus sollte eine allgemeine Erweiterung der bislang vorgestellten Risikoanalyse berücksichtigt werden.

Bisher lässt sich nur die Einleitungsphase zielicher mittels Schädigungs-Zeit-Gesetzen beschreiben. Die Beschreibung der weiteren Schadensentwicklung – von der Einleitungsphase in die Schädigungsphase hinein – mit Hilfe eines Schädigungsmodells ist bereits Gegenstand aktueller Forschung und sollte auch weiterhin als wichtiges Ziel verfolgt werden, um in Zukunft die Verbindung von dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungen mit Aspekten der Tragsicherheit erschließen zu können.

Unter Verwendung geeigneter Modelle zur Beschreibung des Korrosionsfortschritts kann z. B. der zeitabhängige Querschnittsverlust des Bewehrungsstahls abgeschätzt werden. Werden solche Modelle mit Bemessungsgleichungen verknüpft, die die Berechnung der Grenzzustände der Tragfähigkeit ermöglichen, können Aussagen über den Einfluss dauerhaftigkeitsrelevanter Beton- und/oder Betonstahlschädigungen auf die Bauteil- oder Bauwerkstragfähigkeit getroffen werden.

Einen möglichen Ansatz dazu liefern die Untersuchungen von OH et al. [76]. Ein erster Zusammenhang zwischen dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen und Tragwerksverhalten wurde auf diese Weise hergestellt, jedoch noch nicht ausreichend vertieft. In Zukunft wäre auf diesem Gebiet auch eine engere Zusammenarbeit mit Tragwerksplanern sinnvoll.

Schäden, für die keine bekannten Schädigungsmodelle vorliegen, beispielsweise Schäden an Spanngliedern, sollten durch Erfahrungswerte mit

konstanten Versagenswahrscheinlichkeiten oder Ausfallraten in einer rechnergestützten Lebensdauerprognose Berücksichtigung finden. Gleiches gilt für den Ausfall von Verschleißbauteilen (z. B. Fahrbahnübergänge, Lager etc.), die beispielsweise zunächst über ihre mittleren Nutzungsdauern erfasst werden könnten. Ein möglicher Ansatz, diese Arten der Bauwerksschäden mittels probabilistischer Methoden zu erfassen, besteht z. B. in der Anwendung von Markovketten [8, 9].

Die bislang in der Normung verankerten Expositionsklassen sind deutschlandweit gültig [52]. Eine Berücksichtigung bauwerkspezifischer Eigenschaften oder regionaler Einflüsse ist hierbei nicht möglich. Eine detaillierte Klassifizierung der unterschiedlichen dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen auf Bauwerke – in Analogie zur Bemessung der Schneezonen gemäß DIN 1055-5 [77] – wäre eine wertvolle Hilfe zur wirklichkeitsnahen Beurteilung der Umwelteinwirkung in Abhängigkeit vom Standort. Ein Beispiel hierzu kann der Literatur [78] entnommen werden.

Ziel der genannten Teilaspekte künftiger Forschung sollte es sein, mit Hilfe der Ergebnisse eine gesamtheitliche Empfehlung für die Praxis zu entwickeln. Beispielsweise kann diese eine geeignete Erweiterung bestehender Bauwerks-Management-System beinhalten, sodass der Detaillierungsgrad dieser Systeme den Bedürfnissen des jeweils zu betrachtenden Bauwerks angepasst werden kann.

11 Zusammenfassung

Im vorliegenden Schlussbericht mit dem Arbeitstitel „Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse“ werden die erzielten Ergebnisse der Machbarkeitsstudie vorgestellt.

Im Rahmen der Studie konnten neue Ansätze der Lebensdauerprognose unter besonderer Beachtung von Interaktionen dauerhaftigkeitsrelevanter Schädigungsmechanismen an Betonbauteilen aufgezeigt werden.

11.1 Untersuchung der Einwirkungen auf Brücken

In einer umfangreichen Literaturrecherche wurden die möglichen Einwirkungen auf Brückenbauwerke

untersucht. Dabei standen im Besonderen die dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen aus Umgebungseinflüssen im Fokus des Interesses: karbonatisierungs- und chloridinduzierte Depassivierung sowie der Frost- und Frost-Taumittelangriff. Schädigungsphasen und Grenzzustände wurden herausgestellt und durch die zugehörigen im fib Model Code for Service Life Design [19] festgelegten Schädigungs-Zeit-Gesetze eingehend beschrieben.

Über die Literaturrecherche hinausgehend wurde der Begriff der singulären Risiken eingeführt, welche einen direkten oder indirekten Einfluss auf die dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsmechanismen ausüben (beispielsweise der Ausfall von Verschleißbauteilen oder lokal auftretende Rissbildung infolge unzureichender Bemessung). Der Einfluss singulärer Risiken auf dauerhaftigkeitsrelevante Schädigungsmechanismen ist in der Regel schwer zu beurteilen. Eine Erfassung dieser Einwirkungen in Form von Schädigungsmodellen erscheint kaum möglich. Häufig gehen sie mit einer Rissbildung einher, welche gegebenenfalls im Zusammenhang mit dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen berücksichtigt werden könnte.

11.2 Untersuchung der Interaktionen zwischen Einwirkungen

Die weiterführende Literatursichtung galt der Untersuchung kombiniert einwirkender Beanspruchungen von Betonbauteilen und deren Interaktionen, d. h. der Veränderungen von Baustoffeigenschaften infolge einer ersten Einwirkung und einer damit einhergehenden Veränderung des Schädigungsgesetzes einer zweiten ebenfalls auftretenden Einwirkung. Die an Brückenbauwerken relevant werdenden Interaktionen wurden anschaulich in Form einer Interaktionsmatrix dargestellt. Es konnte mit Hilfe der Literatur belegt werden, dass die maßgeblichen Schädigungsmechanismen der Dauerhaftigkeit einen nachweisbaren Einfluss aufeinander haben. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass nach aktuellem Stand der Forschung die Einflüsse der Interaktion unter baustofftechnologischen Aspekten noch nicht quantitativ beurteilt werden können. Vor dem Hintergrund der Literaturstudie ist die Einbindung der beschriebenen Interaktionen in ein Schädigungs-Zeit-Modell derzeit (noch) nicht umsetzbar.

11.3 Untersuchungen zur Berücksichtigung der Interaktionen von kombinierten Einwirkungen im Rahmen der Risikoanalyse

In der Literatur finden sich einige Ansätze, wie kombinierte Einwirkungen betrachtet werden können. Insbesondere über die Anwendung von Fehlerbäumen können mehrere potenzielle Schädigungsmechanismen miteinander in einen Zusammenhang gestellt und unmittelbar miteinander verknüpft werden. Interaktionen kombinierter Einwirkungen können jedoch bislang noch nicht adäquat berücksichtigt werden. Es existieren erste Ansätze zur Berücksichtigung von Interaktionen – zum Beispiel über eine beschleunigte Schädigung infolge mehrerer Einwirkungen [70]. Des Weiteren existieren auch Ansätze zur zeitvarianten Risikoentwicklung bei Entscheidungsbäumen, siehe hierzu [71]. Beispiele mit zeitvarianten baustofftechnologischen Schädigungsmodellen, d. h. Modellen, welche die Veränderung der Einwirkungen mit voranschreitendem Bauwerksalter über Materialgesetze berücksichtigen, konnten im Rahmen der Literatursichtung im Hinblick auf interagierende kombinierte Einwirkungen nicht gefunden werden.

11.4 Untersuchungen zur Modellierung von Interaktionen

Aufbauend auf der Literaturrecherche wurde nach Ansätzen einer Modellierung von Interaktionen in Anlehnung an bereits bestehende System- und Risikoanalyse-Methoden gesucht, die die zeitliche Entwicklung des Schädigungsfortschritts berücksichtigen können. Der Fokus lag auf dauerhaftkeitsrelevanten Schädigungsmechanismen und ihrer Interaktion.

Als prinzipiell zielführend konnte die Modellierung von Interaktionen dauerhaftkeitsrelevanter Schädigungen über die Einführung eines Faktors η herausgearbeitet werden. Das Prinzip der Fehlerbaumstruktur bleibt erhalten. Die jeweils bauteilrelevanten Schädigungsmechanismen der Dauerhaftigkeit wurden mittels der Schädigungs-Zeitgesetze des fib Model Code [19] abgebildet. Innerhalb eines beliebig definierten Zeitraums wurden über die mathematische Korrelation der Schädigungs-Zeitgesetze der miteinander kombinierten Einwirkungen zunächst die Ober- und Untergrenzen der Zuverlässigkeit bestimmt.

Im Gegensatz zur bisherigen Risikoanalyse kann nun zusätzlich über die Einführung des Faktors η die baustofftechnologische Interaktion Berücksichtigung finden, da durch den Faktors η die Veränderung der Baustoffeigenschaften innerhalb der bestehenden Schädigungs-Zeitgesetze abgebildet werden kann, beispielsweise der Einfluss einer Veränderung des Gefüge auf maßgebende Einflussparameter anderer Schädigungsmechanismen. Eine quantitative Festlegung der Werte für den Faktors η muss mit Hilfe baustofftechnologischer Untersuchungen erfolgen.

Ein weiterer Vorteil der Methode liegt in der Flexibilität und ihrer Erweiterungsmöglichkeit. Der Detaillierungsgrad kann beliebig erhöht werden und die Lebensdauerprognose über die implementierten dauerhaftkeitsbezogenen Modelle hinaus auf die in der Tragsicherheit begründeten Versagensrisiken erweitert werden.

Für den Fall der chloridinduzierten Korrosion in karbonatisiertem Beton und zusätzlichen Risiken durch Alkali-Kieselsäurereaktion oder einen Mangel infolge unzureichender Verpressung der Hüllrohre um die Spannglieder wurde exemplarisch eine prinzipielle computergestützte Berechnung mit dem Software-Programm STRUREL [68] durchgeführt, welche die Umsetzbarkeit des erarbeiteten Konzepts stützen konnte.

Die Machbarkeitstudie hat den umfangreichen Forschungsbedarf aufzeigen können. Der erarbeitete Ansatz der Risikoanalyse miteinander interagierender Einwirkungen ist viel versprechend. Jedoch ist für eine vollständige Implementierung in ein funktionierendes Bauwerks-Management-System noch erhebliche Forschungsarbeit zu leisten.

12 Literatur

- [1] FRIEBEL, W.-D.: Prüfung und Instandsetzung von Brücken. Grundlagen – Bedeutung – Organisation. In: Tagungsband Instandsetzung massiver Brücken, VSVI Seminar, Friedberg/Hessen, 25. April 2007
- [2] http://www.bast.de/cln_007/nn_42748/DE/Aufgaben/abteilung-b/referat-b4/bms/downloads/infolyer-bauwerkserhaltung_templateld=raw,property=publicationFile.pdf/infolyer-bauwerkserhaltung.pdf

-
- [3] HEYMEL, D.: Erhaltungsmanagement von Brücken. Methodische Analyse möglicher Strategien zur Optimierung des Lebenszyklus von Brücken. VDM Verlag Dr. Müller, 2008
- [4] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung. Beuth Verlag, November 1999
- [5] NÜESCH, R.: Life-Cycle-Management von Baustoffen und Bauwerken – ein Großforschungsthema. 6th International Conference on Material Science and Restoration, MSR-VI, Aedificatio Publishers, 2003
- [6] SCHIEßL, P., MAYER, T. F.: Lebensdauermanagementsystem – Teilprojekt A2, Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltiges Bauen mit Beton“. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 572, 2007, S. 48-100
- [7] FRANGOPOL, D. M., NEVES, L. C.: Probabilistic Performance Prediction of Deteriorating Structures Under Different Maintenance Strategies. Condition, Safety and Cost. Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures – Assessment, Design and Management. American Society of Civil Engineers, 2004
- [8] VESIKARI E.: Statistical Condition Management and Financial Optimisation in Lifetime Management of Structures. LIFECON-Project: Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability, Technical Research Centre of Finland (VTT), 2003
- [9] SARJA, A.: Predictive and Optimised Life Cycle Management – Buildings and Infrastructure. Taylor & Francis (2006), Nr. 1, S. 75-84
- [10] HAARDT, P.: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufe 1 und 2. Schlussbericht zum AP-Projekt 99 245, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2002
- [11] KUNZ, C., BÖDEFELD, J.: Von der Bauwerksinspektion zum Bauwerksmanagement. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 83, 2001
- [12] Durable and reliable tunnel structures (darts) – The Reports (CD ROM) CUR Gouda, May 2004
- [13] SARJA, A., VESIKARI, E.: Durability Design of Concrete Structures. Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E & FN Spon, London, 1996
- [14] KRÄTZIG, W. B., MONTAG, U., PETRYNA, Y.: Schädigung, Dauerhaftigkeit und (Rest-)Nutzungsdauer von Tragwerken. In: Bauingenieur, Band 78 (2003), Springer Verlag, S. 553-561
- [15] BREITENBÜCHER, R., GEHLEN, C., SCHIEßL, P., van den HOONAARD, J., SIEMENS, T.: Service Life Design for the Western Scheldt Tunnel. Durability of Building and Components 8, Volume One, NRC Research Press, 1999, S. 3-15
- [16] FABER, M.: Reliability based assessment of existing structures. Progress in structural engineering and materials, Wiley and Sons, West Sussex, 2000, pp. 247-253
- [17] SCHNETGÖKE, R.: Zuverlässigkeitsorientierte Systembewertung von Massivbauwerken als Grundlage für die Bauwerksüberwachung (Dissertation). Heft 204, Braunschweig, 2008
- [18] ZHU, W.: An Investigation into Reliability based Methods to include Risk of Failure in Life Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Bridge Rehabilitation (Master Thesis). School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Science, Engineering and Technology Portfolio, RMIT University, July 2008
- [19] Model code for service life design. fib Bulletin 34, Fédération Internationale du Béton (fib), Lausanne, 2006
- [20] BRÜHWILER, E., MENN, C.: Stahlbetonbrücken. Springer Verlag, 2003
- [21] KEUSER, M.: Einwirkungen auf Brücken. In: Handbuch Brücken, MEHLHORN, G. (Hrsg.), Springer Verlag, 2007
- [22] SCHIEßL, P., GEHLEN, C., SODEIKAT, C.: Dauerhafter Konstruktionsbeton für Verkehrsbauwerke. In: Beton-Kalender, Teil 2, Ernst & Sohn Verlag, 2004

- [23] STARK, J., WICHT, B.: Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser Verlag, 2001
- [24] JUNGWIRTH, D., BEYER, E., GRÜBL, P.: Dauerhafte Betonbauwerke. Beton-Verlag, 1986
- [25] RICHARDSON, M. G.: Fundamentals of Durable Reinforced Concrete. Spon Press, 2002
- [26] GEHLEN, C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 510, Beuth Verlag, 2000
- [27] BREIT, W.: Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt – Sachstand und neuere Untersuchungen, Critical corrosion inducing chloride content – State of the art and new investigation results. In: Betontechnische Berichte – Concrete Technology Reports 1998-2000, THIELEN, G. (Hrsg.) Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, S. 145-167
- [28] SETZER, M. J.: Frostscha den – Grundlagen und Prüfung. In: Beton- und Stahlbetonbau, 97 (2002), Heft 7, S. 350-359
- [29] HAIST, M., DJURIC, Z., MÜLLER, H. S.: Betontechnologische Grundlagen zur Herstellung frostbeständiger Betone. In: Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung, 6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 12. März 2009
- [30] AUBERG, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, SETZER, M. J. (Hrsg.), Heft 6, Essen, 1999
- [31] LOWKE, D., BRANDES, C.: Prognose der Schädigungseinwirkung von Betonen bei einem Frost-Tausalz-Angriff. In: 8. Münchner Baustoffseminar, Centrum für Baustoffe und Materialprüfung der TU München, 2008
- [32] SENTLER, L.: Stochastic Characterization of Concrete Deterioration. In: Durability of Concrete Structures, CEB-RILEM, International Workshop, 18th-20th May 1983, Copenhagen
- [33] HOLT, E. E., KOUSA, H. P., LEIVO, M. T., VESIKARI, E. J.: Deterioration by Frost, Chloride and Carbonation Interactions Based on Combining Field Station and Laboratory Results, In: 2nd International RILEM Workshop on Concrete Durability and Service Life Planning, 2009, pp. 123-130
- [34] WIERIG, H.-J., LANGKAMP, H.: Über die Chloridpenetration in nicht karbonatisierte und karbonatisierte Betone. Zement Kalk Gips International, 48 Jhg., (1995). Nr. 3, S. 184-191
- [35] VOLKWEIN, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. Bericht aus dem Baustoffinstitut, Heft 1/1991, Technische Universität München
- [36] JUNG, S. H., CHOI, Y. J., LEE, B. C.: Influence of Carbonation on the Chloride Diffusion in Concrete. In: Proceedings of the International Conference on Sustainable Building Asia, 27-29 June 2007, Seoul, Korea
- [37] GRÜBL, P., WEIGLER, H., SIEGHART, K.: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften. Ernst & Sohn Verlag, 2001
- [38] KROPP, J.: Struktur und Eigenschaften karbonatisierter Betonrandzonen. In: Bautenschutz und Bausanierung, 9 (1986), S. 33-39
- [39] KOELLIKER, E.: Die Carbonatisierung von Stahlbeton – ein Überblick. In: Beton- und Stahlbetonbau 85 (1990), Heft 6, S. 148-153
- [40] TAUSCHER, F.: Spezielle Anforderungen an Beton für Brücken. In: Beton-Kalender 2010, BERGMEISTER, K., FINGERLOOS, F., WÖRNER, J.-D. (Hrsg.), Ernst und Sohn, Berlin, 2009, S. 439-456
- [41] CHI, J. M., HUANG, R., YANG, C. C.: Effects of Carbonation on Mechanical Properties and Durability of Concrete using Accelerate Testing Method. In: Journal of Marine Science and Technology, Vol. 10, No. 1 (2002), pp. 14-20
- [42] BIER, T. A.: Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton. Dissertation, Heft 4, Schriftenreihe des Instituts für

- Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe, 1988
- [43] NEVILLE, A. M.: Properties of Concrete. Pitman, 1977
- [44] SCHIEßL, P.: Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung in Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 255, 1976
- [45] WESCHE, K.: Baustoffe für tragende Bauteile – Teil 2: Beton und Mauerwerk, Bauverlag, 1993
- [46] LI, B., TANG, L.: The effects of mineral additions on chloride penetration into concrete under the frost action. In: Life-Cycle Engineering – BIONDINI & FRANGOPOL, 2008, pp. 189-194
- [47] GEHLEN, C., SODEIKAT, C.: Gerissener Stahlbeton: Wie korrosionsgefährdet ist die Bewehrung? In: Materials and Corrosion 54, (2003), pp. 424-429
- [48] AUDENAERT, A., de SCHUTTER, G., MARSAVINA, L.: Influence of Cracks on Chloride Penetration and Corrosion Initiation Time, In: 2nd International RILEM Workshop on Concrete Durability and Service Life Planning, 2009, pp. 80-84
- [49] PHETKAYSONE, A., ISHIDA, T., SATO, R.: Corrosion Cracks and Deflection of RC Beams Subjected to Salty Water Spray under Sustained Load. In: 2nd International RILEM Workshop on Concrete Durability and Service Life Planning (ConcreteLife '09), 2009, pp. 55-62
- [50] HARTL, G., LUKAS, W.: Untersuchungen zur Chlorideindringung in Beton und zum Einfluss von Rissen auf die chloridinduzierte Korrosion der Bewehrung. In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 53 (1987), Nr. 7, S. 497-506
- [51] SPECHT, M.: Grundlagen der Dauerhaftigkeit von Stahlbeton. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Technische Universität Berlin, Heft 11, 1990
- [52] DIN EN 206-1: Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206-1: 2000, Juli 2001
- [53] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, August 2008
- [54] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, August 2008
- [55] DIN 1045-3: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung, August 2008
- [56] Bundestanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – ZTV-ING. Verkehrsblatt- Verlag Borgmann, Dortmund, Dezember 2007
- [57] DIN-Fachbericht 100 – Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Herausgeber: DIN, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, März 2010
- [58] DIN-Fachbericht 101 – Einwirkungen auf Brücken, Herausgeber: DIN, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, 2009
- [59] DIN-Fachbericht 102 – Betonbrücken, Herausgeber: DIN, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, 2009
- [60] TAUSCHER, F.: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen – Beanspruchung, Beurteilung und Betonqualität, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2009
- [61] GROßMANN, F.: Das „neue“ Regelwerk für den Ingenieurbau und die Regelungen für Beton. In: beton (2004), Nr. 5, S. 234-39
- [62] MÜLLER, H. S., VOGEL, M.: Lebenszyklusmanagement im Betonbau. In: beton (2008), Heft 5, S. 206-214
- [63] GEHLEN, C., SCHIEßL, P., SCHIEßL-PECKA, A.: Hintergrundinformationen zum

- Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J, für dauerhaftigkeitsrelevante Problemstellungen. In: Beton- und Stahlbetonbau 103 (208), Heft 12
- [64] Positionspapier der DAfSTb zur Umsetzung des leistungsbezogenen Entwurfsverfahrens unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J. In: Beton und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 12
- [65] KLINGMÜLLER, O., BOURGUND, U.: Sicherheit und Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau. Vieweg Verlag, 1992
- [66] PLATE, E. J.: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. Ernst & Sohn Verlag, 1993
- [67] THOFT-CHRISTENSEN, P., BAKER, M. J.: Structural Reliability Theory and Its Applications. Springer Verlag, 1982
- [68] RCP GmbH: STRUREL, A Structural Reliability Analysis Program System, (STATREL Manual 1999; COMREL & SYSREL Manual, 2003). RCP Consulting GmbH München
- [69] HENLEY, E. J., KUMAMOTO, H.: Reliability Engineering and Risk Management. Prentice-Hall, 1981
- [70] SIANIPAR, P. R. M., ADAMS, T. M.: Fault-Tree Model of Bridge Element Deterioration Due to Interaction. In: Journal of Infrastructure Systems, No. 3, ASCE Press, 1997, pp. 103-110
- [71] FRANGOPOL, D. M., KALLEN, M.-J., van NOORTWIJK, J. M.: Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions. In: Progress in Structural Engineering and Materials, No. 4, John Wiley & Sons Ltd., 2004, pp. 197-212
- [72] DIN 24424-1: Fehlerbaumanalyse, Methode und Bildzeichen. Teil 1, Beuth Verlag, September 1981
- [73] DIN 24424-2: Fehlerbaumanalyse, Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes. Teil 2, Beuth Verlag, April 1990
- [74] The European Union Brite EURAM III: Modelling of Degradation. DuraCrete: Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R4-5, December 1998
- [75] The European Union – Brite EURAM III: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions, DuraCrete: Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R9, January 2000
- [76] OH, B. H., LEW, Y., CHOI, Y. C.: Realistic evaluation of durability and safety of reinforced concrete bridges under mechanical and environmental loads. In: Proceeding of an International Workshop on Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads – CMCL, ZHAO, T., WITTMANN, F. H., UEDE, T. (Hrsg.), Qingdao Technological University, Qingdao, China, 2005, pp. 27- 34
- [77] DIN 1055-5: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten, Juli 2005
- [78] WIE-LIANG, L., QING-FANG, L.: Study on the durability zonation standard of concrete structural design. In: Proceeding of an International Workshop on Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads – CMCL, ZHAO, T., WITTMANN, F. H., UEDE, T. (Hrsg.), Qingdao Technological University, Qingdao, China, 2005, pp. 35-42

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2001

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen Dünnelagen auf Stahl
Eilers € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutionsarme Spritzbetone
Heimbecher € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnelagen mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST
Eilers, Stoll € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitätskategorien aus Massenverlusten
Schröder € 11,50
- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnelagen als Fahrbahnbeläge auf einem D-Brücken-Gerät
Eilers, Ritter € 13,00

2002

- B 35: Bewehrung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbahnübergänge aus Asphalt
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Talbrücke Haiger
Krause, Wiggerhauser, Krieger € 17,00
- B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

- B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti von Wespennest
€ 11,50
- B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahnplatten beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Kühler, Quaas € 12,50
- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Städig, Krocker € 12,00
- B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50
- B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmer-Halswick, Ullrich € 12,50

2004

- B 45: Erfahrungssammlungen:
Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken

Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus wetterfesten Stählen

Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brückenseilen und -kabeln
Hemmer-Halswick € 13,00

B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

- B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken
Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann, Wiggerhauser € 15,00
- B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haftung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50
- B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50
- B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50
- B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staack € 14,50
- B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50
- B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähler € 12,50

2007

- B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50
- B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50
- B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Steinauer, Mayer, Kündig € 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, Staech € 13,00
- B 62: **Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff**
Eilers € 12,00
- B 63: **Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50
- B 64: **Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4**
Brameshuber, Spörel, Warkus € 12,50

2009

- B 65: **Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Frieße, Taffe, Wöstmann, Zoega € 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**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler € 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**
Weschpfennig, Kropf, von Witzhausen € 13,50
- B 73: **Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König € 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 Euro-codes**
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"

- Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier, Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann € 29,50
- B 78: **Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kuhlmann, Günther, Krauss € 18,50
- B 79: **Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbe-tonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik (in Vorbereitung)
- 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

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.