

Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 104

bast

Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse

von

André Borrmann
Oliver Fischer
Gergö Dori
Matthias Wild

Technische Universität München,
Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation
Lehrstuhl für Massivbau

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

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0538/2011/ARB:
Intelligente Bauwerke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse

Fachbetreuung
Tabea Neumann

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-089-2

Bergisch Gladbach, Mai 2014

Kurzfassung – Abstract

Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse

Die Erhaltung des Brückenbestandes des Bundes hat hohe Priorität, um eine uneingeschränkte Mobilität im Bundesfernstraßennetz gewährleisten zu können. Die Planung des Einsatzes finanzieller Mittel erfordert unter anderem eine genaue Kenntnis des Zustandes der jeweiligen Brückenbauwerke. Die Bauwerksprüfung erfolgt derzeit „handnah“ in festen Intervallen mit einem nach DIN 1076:1999-11 festgelegten Prüfungsumfang. Man spricht von einem zustands- bzw. schadensbasiertem Erhaltungsmanagement. Auf Basis der festgestellten Schadensintensität und des Schadensumfangs wird durch einen Algorithmus die sog. Zustandsnote eines Teilbauwerks berechnet. Erhaltungsstrategien werden in Abhängigkeit des festgestellten Zustands erarbeitet.

Das aktuelle Vorgehen der Bauwerksprüfung bzw. die Entscheidung über finanzielle Aufwendungen ist zum einen die zeitliche Festlegung von festen Prüfzyklen unabhängig vom tatsächlichen Zustand des Bauwerks, was im Laufe der Nutzungsdauer zu erheblichen Kosten allein für die Prüfung der Bauwerke führt. Zudem ist die Bewertung durch einzelne Personen aus Behörden bzw. Ingenieurbüros subjektiv. Das derzeitige Verfahren beschreibt den IST-Zustand ohne detaillierte Rückschlüsse auf die Entstehung von Schäden zu liefern. Strukturelle Abhängigkeiten bzw. gegenseitige Beeinflussung von Schädigungsmechanismen werden bisher nicht berücksichtigt. Das Ziel des Themenschwerpunktes „intelligente Bauwerke“ ist daher, ein verbessertes Konzept für herausragende, bedeutende Brücken zu entwickeln. Von der reinen Datensammlung soll ein Übergang zu einem Brückenmodell erfolgen, welches Informationen direkt weiterverarbeiten kann.

Das Konzept des im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Modellierungsansatzes ist die Erstellung eines Systemmodells, welches sowohl strukturelle Abhängigkeiten als auch Interaktionen zwischen Schädigungen berücksichtigt. Das Modell fungiert nicht als „Black-Box“, sondern erlaubt es, Rückschlüsse auf die Schadensursachen zu ziehen sowie Informationen über die Relevanz der Schäden bzw. deren Wirkungen auf die einzelnen Bauteile und das Gesamtsystem zu erhalten.

Ein neuer Modellierungsansatz für die Bauwerksprüfung und Zustandsbewertung für Brückenbauwerke wurde entwickelt, der so genannte Einflussbaum. Der Einflussbaum ermöglicht eine detaillierte Abbildung

von Schädigungsmechanismen durch die Einführung flexibler Logischer Verknüpfungen. Im Gegensatz zu reinen Boole'schen Verknüpfungen herkömmlicher Modellierungsmethoden kann dieses Element auf verschiedene Arten die komplexen Zusammenhänge des Einflusses von Schäden abbilden. Die Verknüpfungen können frei definierte Gleichungen bzw. Vorschriften beinhalten. Auf diese Weise können sowohl einfache grenzwertbasierte als auch vollprobabilistische (zuverlässigkeitsbasierte) Zustandsbewertungen abgebildet werden.

Der konzipierte Einflussbaum besteht aus drei Modellebenen: der Strukturebene, der Ebene der Schadensbilder und der Parameterebene. Im Zuge des Ausarbeitens eines Einflussbaumes wird das Bauwerk in einzelne Bauteile strukturiert zerlegt und die entstehenden Elemente hierarchisch angeordnet. Die einzelnen Elemente geben auf einer zugeordneten Skala ihren Zustand aus. Eine Nachverfolgbarkeit verschiedener Einflüsse ist somit gegeben. Für die Beschreibung aller Ebenen des Einflussbaums kommt die grafische Notationssprache Systems Modeling Language (SysML) zum Einsatz. SysML ermöglicht die Modularisierung benutzerdefinierter Strukturteile des Einflussbaums. Die Module können in das Gesamtmodell unkompliziert eingefügt werden. Der Modellierungsprozess wird dadurch stark beschleunigt.

Das Hauptergebnis des Projekts FE15.038 ist ein neues, systemmodellbasiertes Bauwerkszustandsermittlungssystem (Einflussbaum), welches die Berechnung des Zustands nicht nur für das Gesamttragwerk, sondern auch für dessen einzelne Komponenten ermöglicht. Mithilfe des Einflussbaums können zum einen bestehende Schädigungen modelliert und zum anderen Schädigungsabläufe simuliert werden. Der Einflussbaum kann somit im Rahmen der Zustandsbewertung von Bauwerken eingesetzt werden und darüber hinaus als Prognosetool zur Ermittlung des künftigen Bauwerkszustands herangezogen werden. In der Planungsphase ermöglicht das Systemmodell mit einer Parameterstudie kritische Bauteilkomponenten, sog. HotSpots, zu lokalisieren. Die gewonnenen Erkenntnisse können als Entscheidungshilfe für die Platzierung von Sensorik dienen.

Im Vergleich der neuen systemmodell-basierten Methode und einer herkömmlichen Bauwerksbewertung liegt der Hauptunterschied darin, dass eine Systemanalyse mit einem Einflussbaum den zugrundeliegenden Schädigungsmechanismus aufzeigt. Es werden detailliert die Eingangsparameter für Schädigungen, die jeweiligen vorherrschenden Schädigungsprozesse und die betroffenen strukturellen Komponenten ermittelt. Dies trägt zu einem tieferen Verständnis der Zustandsentwicklung von Bauwerken bei und ermöglicht

einerseits eine realitätsnahe Zustandsbeurteilung und andererseits auch eine Berücksichtigung des Erkenntnisgewinns in der Planung von Neubauten hinsichtlich potentieller Schwachstellen bzw. eines effektiven Einsatzes von Monitoringkonzepten.

Smart bridge – Concept of a modular designed evaluation model and system analysis

The ongoing maintenance of state-owned bridge structures has a high priority to ensure the continued free flow of traffic on Germany's national motorways and highways. To effectively plan the disposition of finances, one needs precise data on the condition of the respective structures. Bridge inspections currently take form of close-up manual evaluations undertaken at regular intervals according to a standardised procedure as defined in the DIN 1076:1999-11. Based on the degree and extent of damage, a so-called damage score for a construction element is calculated according to an algorithm. Maintenance strategies are then developed based on the condition of the structure.

A key criticism of this approach is that the inspection takes place at predefined intervals regardless of the actual condition of the respective structure. In addition, the assessment conducted by government agencies or engineering firms is very subjective. The current procedure describes the actual state without recording details on the cause of the damages. Structural dependencies or mutual influences are not considered. The aim of the "intelligent structures" focal area is therefore to develop an improved concept. The intention is to progress beyond just collecting data and to effect a transition to a bridge information model that holds information for further processing.

The concept of the modelling approach developed as part of this project is to create a system model which can represent structural dependencies as well as interactions between damages. The model is more than simply a "black box" container of information: the intention is to make it possible to draw conclusions about the cause of damages as well as their relevance and effects on the respective parts of the construction and the structure as a whole.

A new modelling approach for bridge inspections and condition assessment for bridge structures is proposed, the so-called impact tree. The impact tree diagram makes it possible to describe damage mechanisms in detail by introducing logical connections. In contrast to the purely Boolean links used in conventional modelling approaches, these logical connections are able to represent different

kinds of complex relationships and dependencies between damages and their influences. These connections can take the form of freely definable equations or regulations. This makes it possible to model both simple threshold-value-based assessments as well as fully probabilistic (reliability-based) assessments of the conditions of a construction.

The impact tree concept is comprised of three modelling levels: the structural level, the level of the damage patterns and a parametric level. When developing an impact tree, the structure is broken down into individual construction elements which are then organised hierarchically. The condition of the individual elements is recorded on an according scale. This makes it possible to trace the path of the different influences. To describe the levels of the impact tree, the Systems Modeling Language (SysML) graphical notational language is used. SysML makes it possible to modularise user-defined parts of the structure of the impact tree. These modules can then easily be incorporated into the overall model, speeding up the modelling process considerably.

The principal outcome of the FE15.038 project is a new, system-based building condition evaluation system (impact tree) which makes it possible to record not just the condition of the structure as a whole but also of its individual component parts. Using the impact tree, an existing damage pattern can be modelled and future damage patterns can be simulated. As a consequence, the impact tree can be used not only to assess the condition of bridge structures but also as a prognostic tool to predict possible changes to its condition in future. In the planning phase, this system model can be used in conjunction with a parameter study to localise critical components and so-called hot-spots. This in turn can be used to help determine where to place sensors in the structure.

Compared with conventional bridge inspection and assessment methods, the new system-model-based method makes it possible to employ systems analysis using an impact tree to identify the underlying damage mechanisms. Detailed input parameters are determined for the damages, the respective prevailing damage processes and the affected structural components. This helps to provide a better understanding of the development of the condition and damage patterns of bridge structures and provides on the one hand a realistic assessment of the condition of the structure and on the other the ability to employ this knowledge in the planning of new bridge structures to minimise potential weak points and to design effective monitoring concepts.

Inhalt

Abkürzungen		4	Anwendung des Modellierungsansatzes auf die Beispielbrücke	30	
1	Einleitung	8	4.1 Strukturelle Modellierung der Beispielbrücke	30	
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	8	4.1.1 Strukturmodell des Widerlagers	30	
1.2	Gliederung des Schlussberichts	9	4.1.2 Strukturmodell des Auflagerungssystems	32	
2	Systemmodellierung von Brückenbauwerken	9	4.1.3 Strukturmodell des Überbauquerschnitts	33	
2.1	Modellierungsansätze aus der Literatur	9	4.1.4 Zusammenführung der Bauteile - Gesamtstrukturmodell	35	
2.2	Vorgeschlagener Modellierungsansatz	17	4.1.5 Strukturmodell der Schadensbilder	37	
2.2.1	Konzept des Modellierungsansatzes	17	4.2 Parameter	38	
2.2.2	Strukturebene	18	4.3 Logische Verknüpfungen	39	
2.2.3	Schadensebene	19	4.4 Einflussbaum	40	
2.2.4	Parameterebene	19	4.5 Schadensbeispiele	40	
2.2.5	Verknüpfungen	20	4.5.1 Senkung einer Stütze	40	
2.2.6	Funktionsweise des Einflussbaums	21	4.6 Modularisierung	42	
2.2.7	Berücksichtigung von Redundanzen	23	5	Aufbau und Simulation eines Einflussbaums für ein einfaches Brückenbauwerk (Einfeldträger)	44
2.2.8	Interaktion von Schädigungsmechanismen	23	5.1 Allgemeine Angaben	44	
3	Systems Engineering	24	5.2 Schädigungsmechanismen	44	
3.1	Anwendung von Systems Engineering	24	5.2.1 Karbonatisierung	44	
3.2	Modell-basiertes Systems Engineering	25	5.2.2 Eindringen von Chloriden	44	
3.2.1	System-Modell	25	5.2.3 Bewehrungskorrosion	44	
3.3	Systems Modeling Language	25	5.3 Zielsetzung	46	
3.3.1	Unified Modeling Language	25	5.4 Aufbau des Einflussbaumes	46	
3.3.2	SysML Diagramme	26	5.4.1 Strukturebene	46	
3.3.3	Umsetzung der Modellierung von Schädigungen und Brückenkonstruktionen mit SysML	27	5.4.2 Schadensebene	47	
3.3.4	SysML-Modellierungssoftware	28	5.4.3 Parameterebene	47	
			5.4.4 Verknüpfungselemente	47	
			5.5 Aufbau der Verknüpfungen	47	
			5.5.1 Logik 6	48	
			5.5.2 Logik 5	49	

5.5.3	Logik 4	49
5.5.4	Logik 3	50
5.5.5	Logik 2	50
5.5.6	Logik 1	50
5.6	Simulieren mit SysML	51
5.6.1	Simulation eines Querschnitts	53
5.6.1.1	Identifizierung des kritischen Querschnitts	53
5.6.1.2	Parametrische Untersuchung des kritischen Querschnitts	55
5.6.2	Simulation des Gesamtbauwerks . . .	56
5.6.2.1	Prognose für das Gesamtbauwerk . . .	58
5.6.3	Einbezug probabilistischer Ansätze	58
5.7	Vergleich der Ergebnisse mit herkömmlichen Methoden der Bauwerksprüfung	59
6	Zusammenfassung und Ausblick	61
7	Literatur	63
8	Anhang	65

Abkürzungen

ASB-ING	ASB-ING, 2008-03; siehe Literaturverzeichnis
BDD	Block Definition Diagramm
D	Schadensbewertung Dauerhaftigkeit
FE	Finite Elemente
FORM	First-Order-Reliability Method
$h(\mathbf{p})$	Ausfallwahrscheinlichkeit
N_i	aufnehmbaren Lastwechsel
n_i	vorhandene Lastwechsel
p_{ij}	Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente ij
SORM	Second-Order-Reliability Method
RI-EBW-PRÜF	RI-EBW-PRÜF, 2007-11; siehe Literaturverzeichnis
S	Schadensbewertung Standicherheit
SysML	Systems Modeling Language
UML	Unified Modeling Language
V	Schadensbewertung Verkehrssicherheit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
\mathbf{Z}	Zustandsvektor
Z_{ij}	Zustandsvariable der Komponente ij
$\varphi(\mathbf{Z})$	Strukturfunktion
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Der aktuelle Brückenbestand des Bundes weist eine Gesamtfläche von ca. 30 Mio. m² auf. In Anlagevermögen ausgedrückt handelt es sich hierbei um einen Wert von ca. 45 Mrd. € (HAARDT 2010). Die Erhaltung dieses Brückenbestandes, der zu großen Teilen aus den 1960/70er Jahren stammt, hat hohe Priorität, um eine uneingeschränkten Mobilität im Bundesfernstraßennetz gewährleisten zu können. Die benötigten Investitionen müssen aus wirtschaftlicher Sicht gezielt aufgewendet werden. Die Planung des Einsatzes finanzieller Mittel erfordert unter anderem eine genaue Kenntnis des Zustandes der jeweiligen Brückenbauwerke.

Die Zustandsbewertung ist in der „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076“ (RI-EBW-PRÜF, 2007-11) geregelt. Die Bauwerksprüfung erfolgt derzeit nach (DIN 1076 (1999-11)), und die Dokumentation gemäß „Anweisung Straßeninformationsbank Teilsystem Bauwerksdaten“ (ASB-ING, 2008-03) über das Programmsystem SIB-Bauwerke (WPM-Ingenieure). Das Vorgehen schreibt Bauwerksprüfungen in festen Intervallen vor:

- Hauptprüfung: jedes sechste Jahr
- einfache Prüfung: drei Jahre nach einer Hauptprüfung
- Prüfung aus besonderem Anlass: situationsbedingt.

Die Durchführung der Prüfungen erfolgt „handnah“ mit einem nach (DIN 1076 (1999-11)) festgelegten Prüfungsumfang durch einen Bauwerksprüfungingenieur. Man spricht von einem zustands- bzw. schadensbasiertem Erhaltungsmanagement. Die Zustandsbewertung erfolgt in den drei Kategorien Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit (S/V/D) mit einer Bewertungsskala von 0 bis 4. Auf Basis der festgestellten Schadensintensität und des Schadenumfanges wird durch einen Algorithmus die sog. Zustandsnote eines Teilbauwerks berechnet (HAARDT 1999). Erhaltungsstrategien werden in Abhängigkeit des festgestellten Zustands erarbeitet.

Die aktuelle Tendenz der Verschlechterung des Bauwerkszustandes ist auf den Einsatz stark begrenzter finanzieller Mittel zurückzuführen. Die wirtschaftlichen Planungen zeigen, dass es essentiell ist, über den IST-Zustand informiert zu sein und einen künftigen Zustand prognostizieren zu

können, um Finanzmittel gezielt einzusetzen und somit mit limitierten Ausgaben den Brückenbestand in einem vertretbaren Zustand zu erhalten. Häufig ist eine frühzeitige Behebung eines Schadens ökonomischer als ein fortdauernder Betrieb des Bauwerks ohne Investitionen, was zu einer kostenintensiven Generalinstandsetzung führen kann.

Das aktuelle Vorgehen der Bauwerksprüfung bzw. die Entscheidung über finanzielle Aufwendungen ist zum einen die zeitliche Festlegung von festen Prüfzyklen unabhängig vom tatsächlichen Zustand des Bauwerks, was im Laufe der Nutzungsdauer zu erheblichen Kosten allein für die Prüfung der Bauwerke führt. Zudem ist die Bewertung durch einzelne Personen aus Behörden bzw. Ingenieurbüros subjektiv. Trotz Kategorisierung der Schäden anhand des Schadensbeispielkatalogs des Anhangs der (RI-EBW-PRÜF, 2007-11) wird eine bundesweit einheitliche Auswertung der Zustandsdaten dadurch erschwert. Das Programm SIB-Bauwerke beschreibt den IST-Zustand und liefert wenig Rückschlüsse auf die Entstehung von Schäden bzw. über Schädigungsprozesse. Strukturelle Abhängigkeiten bzw. gegenseitige Beeinflussung von Schädigungsmechanismen werden im Rahmen der aktuellen Bauwerksbewertung nicht berücksichtigt.

Um diesen Einschränkungen zu begegnen, wurde das Forschungsprogramm „Intelligente Bauwerke“ initiiert, dessen Ziel es ist, das Konzept der Bauwerksprüfung auf Basis des Einsatzes moderner Datenerfassungs- und Verarbeitungsverfahren weiterzuentwickeln. Ein Grundbaustein bildet hierbei die Schaffung eines Systemmodells zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Schädigungsmechanismen und deren Auswirkungen auf den Zustand des Gesamtbauwerks. Ein derartiges Systemmodell soll unter Berücksichtigung struktureller Abhängigkeiten bzw. Redundanzen und Schadensinteraktionen zur Analyse von Messdaten und zur Identifikation von Gefährdungspotenzialen herangezogen werden.

Eine Schwierigkeit liegt in der Wahl geeigneter Abbildungen von Schädigungsprozessen. Für einige Prozesse liegen detaillierte Untersuchungen und ausgearbeitete physikalische Beziehungen vor. Eine Vielzahl anderer Zusammenhänge kann jedoch noch nicht wirklichkeitsgetreu abgebildet werden. Darauf wird im Rahmen des Projekts im entwickelten Systemmodell Rücksicht genommen, indem Verknüpfungen sowohl über probabilistische als auch über einfache grenzwertbezogene Ansätze definiert werden können, um den Zustand eines

Bauwerkssystems anhand erfasster Messwerte zu bewerten.

1.2 Gliederung des Schlussberichts

Im Kapitel 2 dieses Berichtes werden die verschiedenen bekannten Ansätze zur Systemmodellierung von Brückenbauwerken dargestellt. Im Abschnitt 2.1 werden die derzeit geltenden Normen und Richtlinien aufgeführt und verwandte Ansätze aus der Literatur diskutiert. Im Speziellen wird hierbei auf die Abbildung logischer Strukturen, welche als Basis für Wahrscheinlichkeitsberechnungen dienen, eingegangen.

Kapitel 3 stellt die graphische Modellierungssprache Systems Modeling Language (SysML) vor. Für die Modellierung ausgewählte Software und die Kriterien für unsere Auswahl werden im Kapitel 3.3.4 diskutiert. SysML ermöglicht die Modellierung und Umsetzung des vorgestellten Konzepts, welches im Kapitel 4 diskutiert wird. Die Umsetzung wird anhand eines Beispiels erläutert.

Im Kapitel 5 wird die Simulation eines Einflussbaums präsentiert. Dabei werden die notwendige Anpassungen der Systemstruktur diskutiert und die Umsetzung anhand eines Beispiels erläutert. Hierbei wird ein einfaches Beispiel für HotSpot Identifizierung und parametrische Untersuchung eines Längsträgers vorgestellt und eine Simulation des Gesamtsystems durchgeführt. Anschließend wird die Anwendung von stochastischen Formeln in den Logikelementen diskutiert.

Zusätzlich wird auf die Möglichkeit eingegangen, über eine Modularisierung der Systemmodellierung durch eine Art Baukastenprinzip vereinfacht verschiedene Systemmodelle abzubilden.

In Abschnitt 6 wird eine kurze Zusammenfassung dieses Forschungsprojekts gegeben.

2 Systemmodellierung von Brückenbauwerken

2.1 Modellierungsansätze aus der Literatur

Grundvoraussetzung für die Systemmodellierung von Brückenbauwerken ist die Abbildung realer Strukturen, also des Brückenbauwerks, mithilfe verschiedener Methoden. Dabei wird prinzipiell das Bauwerk in einzelne Bauwerkskomponenten untergliedert und diese mittels logischer Verbindungen miteinander zu einem Modell zusammengeführt, das die Einwirkungen von Schäden auf den

Zustand des Gesamtbauwerks abbildet. In der Literatur gibt es hierzu verschiedene Modellierungsansätze, welche in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Die Modelle können als Basis für zuverlässigkeitsbasierte Berechnungen herangezogen werden.

Die Analyse von Objekten kann hinsichtlich unterschiedlicher Fragestellungen erfolgen und erfordert jeweils eine Abbildung der zu untersuchenden Betrachtungseinheiten in Abhängigkeit der gewünschten Analysetiefe. Der Grad der Detaillierung ist hierbei nach der Relevanz einzelner Komponenten zu wählen, um für das Bauwerk ein geeignetes Systemmodell zu generieren. Die Bezeichnung Objekt kann hierbei ganz allgemein für einen Prozess (Funktionssystem), eine Maschine (technisches System) oder in unserem Fall ein Bauwerk stehen (Begriffe gemäß DIN 25 424-1:1981-09). Im Bauingenieurwesen übliche Interessen sind die Untersuchung der Standsicherheit/Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit und – im Rahmen der Betrachtung von Verkehrsbauwerken – der Verkehrssicherheit von Bauwerken. Der Einsatz probabilistischer Methoden zur Auswertung logischer Systeme, z.B. zur Zuverlässigkeitsberechnung technischer Systeme, erfordert hierbei die Kenntnis von:

- strukturellen Zusammenhängen
- Redundanzen
- Ausfallarten (Art und Weise, auf die eine Einheit ausfällt)
- Ausfallauswirkungen (Folge einer Ausfallart hinsichtlich des Zustands einer Einheit)
- Zuverlässigkeit einzelner Komponenten.

Viele der folgenden Modellierungsmöglichkeiten wurden daher im Rahmen von Zuverlässigkeitsbetrachtungen aufgegriffen bzw. verfeinert. Der Begriff der Redundanz findet häufig im Maschinenbau bzw. der Elektrotechnik Anwendung und wird nach VDI 4001-Blatt2:2006-07 als „Vorhandensein von mehr als einem Mittel in einer Einheit zur Ausführung einer geforderten Funktion“ definiert. Die Behandlung von Redundanzen in der Systemmodellierung von Brückenbauwerken wird in diesem Abschnitt und für den von uns gewählten Modellierungsansatz im folgenden Abschnitt 2.2 diskutiert.

Im Folgenden wird auf die die derzeit verfügbaren Methoden zur Modellierung logischer Systeme eingegangen:

Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Eine Möglichkeit der Systemmodellierung stellt das Zuverlässigkeitsblockdiagramm dar. Die prinzipielle Anwendung und die Verknüpfung von Zuverlässigkeitsblockdiagrammen mit Boole'schen Operatoren ist in DIN EN 61078:2006-10 normativ geregelt. Die bildhafte Darstellung ist in der genannten Norm als logische Verknüpfung von Komponenten, welche für den erfolgreichen Betrieb des Systems erforderlich sind, definiert. Unter Anwendung einer binären Beschreibung kann eine Komponente die beiden Zustände „in Betrieb“ und „ausgefallen“ annehmen. Ein System muss aus allen relevanten Komponenten erstellt werden. Die Relevanz einer Komponente hängt von der jeweiligen Fragestellung und dem Aufbau eines Systems ab. Die einzelnen Komponenten sind je nach ihrer Aufgabe im System anzuordnen und miteinander zu verknüpfen (Bild 1). Eine durchgezogene Linie stellt in der Darstellung eine direkte Verbindung dar. Ist über diese Linie eine durchgehende Verbindung zwischen dem Diagrammeingang und dem Ausgang gegeben, so spricht man von einem Erfolgspfad (DIN EN 61078:2006-10) bzw. Operationspfad (VDI 4008-Blatt2:1998-05). Für die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit eines Systems muss mindestens ein Erfolgspfad vorhanden sein. Liegen mehrere Erfolgspfade vor, spricht man von einem redundanten System. Ist die Verbindung zwischen Diagrammeingang und –ausgang durch eine ausgefallene Komponente unterbrochen, so ist das System nicht mehr funktionsfähig.

Zuverlässigkeitsblockdiagramme können neben ihrer graphischen Darstellung auch durch Strukturfunktionen abgebildet werden. Die Strukturfunktion $\varphi(\mathbf{Z})$ stellt eine zweiwertige Funktion des Zustandsvektors $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ eines Systems aus n Komponenten zur binären Kennzeichnung seiner Funktionsfähigkeit in Abhängigkeit von der Funktionsfähigkeit seiner Komponenten dar. Z_i entspricht hierbei einer zweiwertigen Zustandsvariablen der Komponente i (VDI 4008-Blatt2:1998-05). In der sogenannten Negativlogik steht 1 für den Zustand „ausgefallen“ und 0 für „in Betrieb“. In allgemeiner Form lautet die Strukturfunktion:

$$\varphi(\mathbf{Z}) = \varphi(Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \quad (2.1)$$

mit

$\varphi(\mathbf{Z})$ Strukturfunktion

\mathbf{Z} Zustandsvektor

Z_i Zustandsvariable der Komponente i

Ein einfaches System besteht aus einer Serienschaltung von n Komponenten (vgl. Bild 1). Der Ausfall einer einzigen Komponente der Serienschaltung führt zu einem kompletten Systemversagen. In manchen Literaturquellen (z.B. VDI 4008-Blatt2:1998-05) wird die Serienschaltung auch mit Reihenanzordnung bzw. Reihenschaltung bezeichnet.

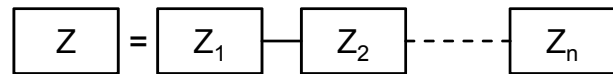


Bild 1: Zuverlässigkeitsblockdiagramm – Serienschaltung (nach VDI 4008-Blatt2:1998-05)

Die Strukturfunktion für dieses System lautet:

$$\varphi(\mathbf{Z}) = Z_1 \cdot Z_2 \cdot \dots \cdot Z_n \quad (2.2)$$

Die Strukturfunktion sagt aus, dass der Ausfall einer Komponente Z_i zum Ausfall des gesamten Systems führt (Disjunktion).

Die Strukturfunktion für eine Serienschaltung mit n Komponenten kann auch mittels Operatoren wie folgt geschrieben werden:

$$\varphi(\mathbf{Z}) = \prod_{i=1}^n Z_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Z_i) \quad (2.3)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $h(\mathbf{p})$ für Serienschaltungen ergibt sich zu:

$$h(\mathbf{p}) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (2.4)$$

mit

$h(\mathbf{p})$ Ausfallwahrscheinlichkeit

p_i Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente i

Das zweite Grundmodell wird durch eine Parallelschaltung bzw. Parallelanzordnung dargestellt (vgl. Bild 2). Hierbei sind alle n Komponenten parallel angeordnet, was zu n unterschiedlichen Erfolgspfaden führt. Man spricht von einem redundanten

System, da nach Ausfall von $n - 1$ Komponenten immer noch ein Erfolgspfad vorhanden ist und folglich das System noch intakt ist.

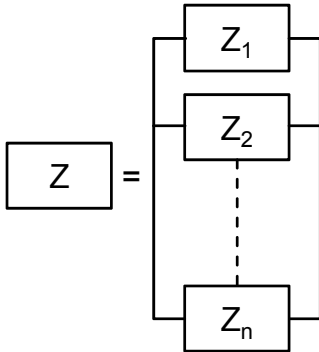


Bild 2: Zuverlässigkeitsblockdiagramm – Parallelschaltung (nach VDI 4008-Blatt2:1998-05)

Die Strukturfunktion für dieses System lautet:

$$\varphi(\mathbf{Z}) = Z_1 \cdot Z_2 \cdot \dots \cdot Z_n \quad (2.5)$$

Die Strukturfunktion sagt aus, dass erst der Ausfall aller Komponenten Z_i zum Ausfall des gesamten Systems führt (Konjunktion).

Die Strukturfunktion für eine Parallelschaltung mit n Komponenten kann auch mittels Operatoren wie folgt geschrieben werden:

$$\varphi(\mathbf{Z}) = \bigwedge_{i=1}^n Z_i = \prod_{i=1}^n Z_i \quad (2.6)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $h(\mathbf{p})$ für Parallelschaltung ergibt sich zu:

$$h(\mathbf{p}) = \prod_{i=1}^n p_i \quad (2.7)$$

Parallel- und Serienschaltungen lassen sich im Rahmen der Erstellung von Zuverlässigkeitsblockdiagrammen beliebig miteinander kombinieren. Auf eine reine Parallel- bzw. Serienschaltung folgen durch Erhöhung der Komplexität um einen Grad eine Parallel-Serien-Schaltung und eine Serien-Parallel-Schaltung.

Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm einer Parallel-Serien-Schaltung ist in Bild 3 gegeben.

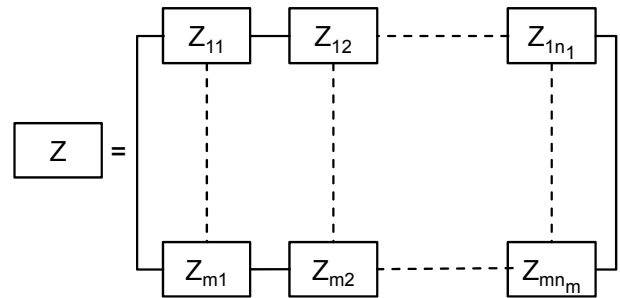


Bild 3: Zuverlässigkeitsblockdiagramm – Serien-Parallel-Schaltung (nach VDI 4008-Blatt2:1998-05)

Die zugehörige Strukturfunktion lautet:

$$\varphi(\mathbf{Z}) = \prod_{i=1}^m \left[1 - \prod_{j=1}^{n_i} (1 - Z_{ij}) \right] \quad (2.8)$$

mit

- m Anzahl der parallelen Operationspfade
- n_i Anzahl der Operationspfade in Serie
- Z_{ij} Zustandsvariable der Komponente ij

Die Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt sich somit zu:

$$h(\mathbf{p}) = \prod_{i=1}^m \left[1 - \prod_{j=1}^{n_i} (1 - p_{ij}) \right] \quad (2.9)$$

mit

- p_{ij} Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente ij

Bild 4 zeigt das Zuverlässigkeitsblockdiagramm einer Serien-Parallel-Schaltung.

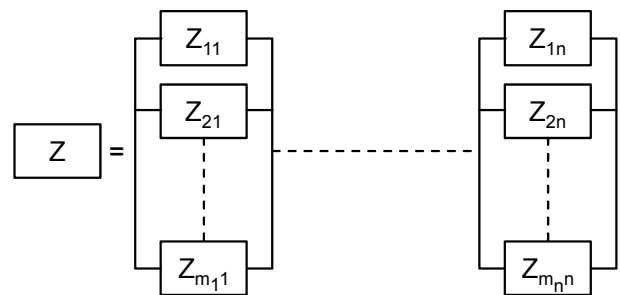


Bild 4: Zuverlässigkeitsblockdiagramm – Serien-Parallel-Schaltung (nach VDI 4008-Blatt2:1998-05)

Die zugehörige Strukturfunktion lautet:

$$\varphi(\mathbf{Z}) = 1 - \prod_{j=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^{m_j} Z_{ij} \right) \quad (2.10)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt sich somit zu:

$$h(\mathbf{p}) = 1 - \prod_{j=1}^n \left[1 - \prod_{i=1}^{m_j} p_{ij} \right] \quad (2.11)$$

Die Strukturfunktion und die Ausfallwahrscheinlichkeit können analog für weitere Modellierungsmethoden, welche in Zuverlässigkeitsblockdiagramme überführbar sind, angegeben werden.

Detaillierte Modellierungen von komplexen Strukturen erfordern eine Vielzahl von Parallel- und Serienanordnungen, welche miteinander kombiniert werden müssen. Zudem müssen die Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Komponenten und die Strukturfunktion bekannt sein.

Die Anwendung von Zuverlässigkeitsblockdiagrammen im Rahmen der Systemmodellierung von Brückenbauwerken unterliegt gewissen Einschränkungen, welche aus der Norm DIN EN 61078:2006-10 und den VDI-Richtlinien VDI 4003:2007-03 hervorgehen. Eine wesentliche Einschränkung stellt die Reduzierung von komplexen Zusammenhängen auf ein binäres Verhalten dar. Einzelne Komponenten können somit nur „in Betrieb“ oder „ausgefallen“ als Zustand aufweisen. Die Möglichkeit der Abbildung von teilweise geschädigten Bauteilkomponenten besteht in dieser Darstellungsform nicht. Auch eine Modellierung in Abhängigkeit der Zeit, wie sie für die Abbildung von Schädigungsprozessen, z.B. Korrosionsabtrag, erforderlich sind, ermöglicht diese Art der Darstellung nicht. Zudem können laut VDI 4003:2007-03 und VDI 4008-Blatt1:1986-05 bei der Verknüpfung von Zuverlässigkeitsblockdiagrammen mit Boole'schen Verfahren Abhängigkeiten zwischen einzelnen Komponenten nur mangelhaft berücksichtigt werden.

Fehlerbaum / Fehlerbaumanalyse

Zuverlässigkeitsblockdiagramme lassen sich mit identischem Inhalt in Form von Logikdiagrammen darstellen (VDI 4008-Blatt2:1998-05 und DIN EN 61078:2006-10). Hierbei ist die Betrachtungsrichtung horizontal. Die Zustandsvariablen Z_i gehen links in das Diagramm ein und der Zustand Z des

Gesamtsystems steht rechts am Ende des Pfades. Beispiele eines Blockdiagramms für eine Serienschaltung, äquivalent zum Zuverlässigkeitsblockdiagramm in Bild 1, und eine Parallelschaltung, äquivalent zu Bild 2, sind in Bild 5 und Bild 6 dargestellt.

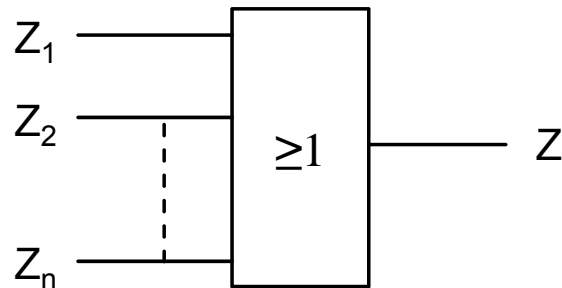


Bild 5: Logikdiagramm – Serienschaltung (nach VDI 4008-Blatt2:1998-05)

Das in Bild 5 verwendete Bildzeichen ≥ 1 bedeutet, dass der Zustand Z den Wert 1 (= ausgefallen) annimmt, sobald mindestens eine Zustandsvariable Z_i im ausgefallenen Zustand ist. Im Folgenden wird ≥ 1 , welches für eine ODER-Verknüpfung steht, durch das Zeichen ≥ 1 dargestellt.

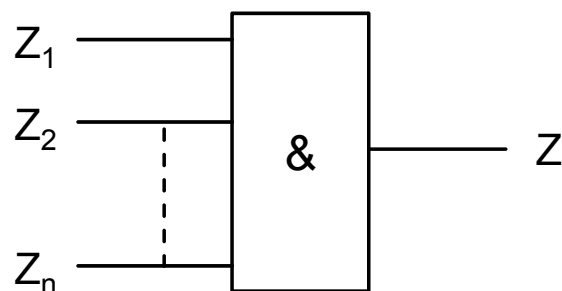


Bild 6: Logikdiagramm – Parallelschaltung (nach VDI 4008-Blatt2:1998-05)

Das in Bild 6 verwendete Bildzeichen $\&$ gibt eine Parallelschaltung wieder. Alle Zustandsvariable Z_i müssen ausfallen, damit sich der Zustand Z von 0 auf 1 ändert. Eine in der Literatur übliche Schreibweise für eine UND-Verknüpfung ist das Zeichen $\&$.

Komplexere Zuverlässigkeitsblockdiagramme lassen sich unter Kombination der Verknüpfungen mit den entsprechenden Bildzeichen analog als Logikdiagramm darstellen.

Eine verbreitete Art der Darstellung von Systemen, ähnlich der beschriebenen Logikdiagramme, stellt der Fehlerbaum dar. Ziel von Zuverlässigkeitsblockdiagrammen bzw. Fehlerbäumen ist eine systematische Ermittlung sämtlicher logischer Verknüpfungen einzelner Komponenten- bzw. Teilsystemausfälle, welche in einem vorgegebenen unerwünschten Ereignis resultieren. Normativ ist die Fehlerbaumanalyse in DIN 25 424-1:1981-09 und DIN 25 424-2:1990-04 geregelt. Bei der Erstellung eines Fehlerbaumes geht man von einem unerwünschten Ereignis (TOP), welches dem Versagen des zu untersuchenden Systems (z.B. Gesamtsystem eines Brückenbauwerks) entspricht, und stellt alle Ausfallarten dieses Ereignisses als „Äste“ (sog. Pfade) des Fehlerbaums dar. Diese einzelnen Pfade geben die Ursachen für den Schadensfall wieder. Der Betrachtungsweg ist somit gegenläufig zur Ereignisablaufanalyse, welche im Folgenden behandelt wird. Ein Fehlerbaum eines technischen Systems setzt sich aus einzelnen Komponenten und deren Verknüpfungen zusammen. In einem Fehlerbaum müssen alle möglichen Versagenspfade des Systems abgebildet werden. Die wichtigsten Bildzeichen, welche zur Erstellung von Fehlerbäumen Anwendung finden sind gemäß DIN 25 424-1:1981-09 die UND-Verknüpfung und die ODER-Verknüpfung. Eine ODER-Verknüpfung kann hierbei beliebig viele Eingänge haben. Zusätzlich besteht nach DIN 25 424-2:1990-04 die Möglichkeit der Verwendung von sogenannten m/n -Toren, welche einer „ m aus n Verknüpfung“ entsprechen (z.B. 2/3-Tor: zwei aus drei Eingänge müssen im Zustand 1 sein, damit der Ausgang den Zustand 1 annimmt). Über diese Verknüpfungen werden die logischen Zusammenhänge des Systems abgebildet. Sie bestehen aus binären Ein- und Ausgängen, wobei wiederum entsprechend der Negativlogik 1 für „ausgefallen“ und 0 für „in Betrieb“ steht.

Die graphische Darstellung einer Serienschaltung wird mittels einer ODER-Verknüpfung umgesetzt, vgl. Bild 7.

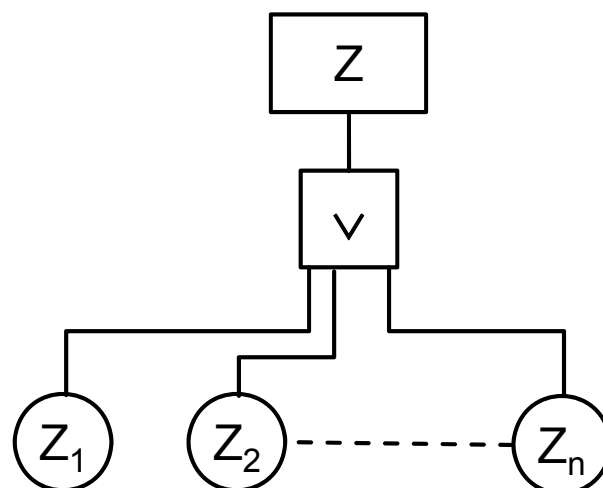


Bild 7: Fehlerbaum – Serienschaltung

Eine Parallelschaltung enthält eine UND-Verknüpfung, vgl. Bild 8.

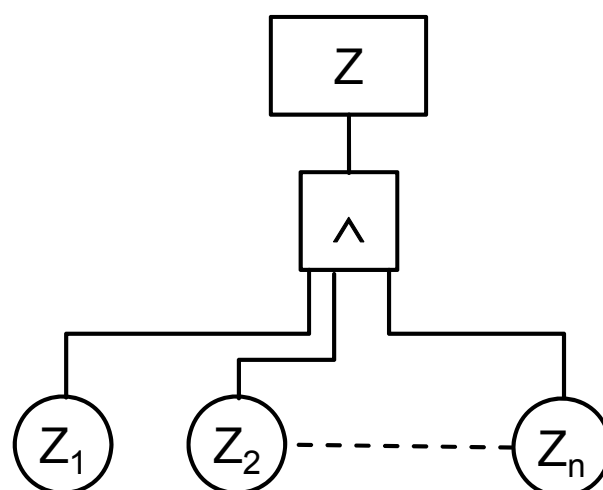


Bild 8: Fehlerbaum – Parallelschaltung

Über Kombinationen dieser beiden Verknüpfungstypen können weitere Systeme abgebildet werden. Im Folgenden sind die beiden erweiterten Grundmodelle der Parallel-Serien-Schaltung aus Bild 3 und der Serien-Parallel-Schaltung (Bild 4) in Fehlerbaumdarstellung aufgeführt, siehe Bild 9 und Bild 10.

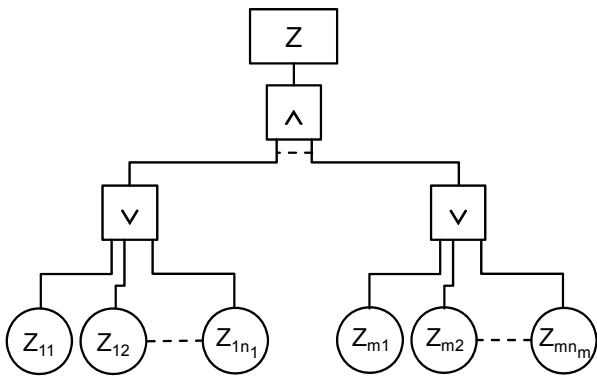


Bild 9: Fehlerbaum – Parallel-Serien-Schaltung

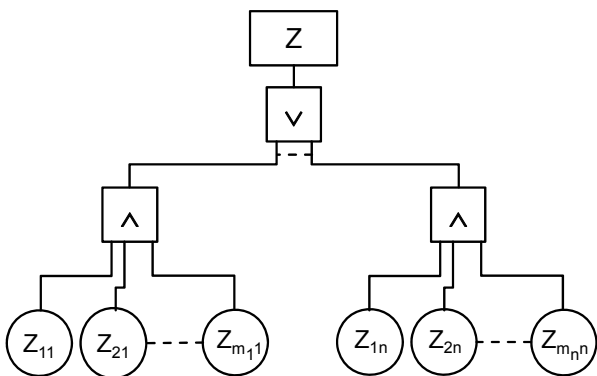


Bild 10: Fehlerbaum – Serien-Parallel-Schaltung

Zuverlässigkeitsblockdiagramme lassen sich ohne Informationsverlust in Fehlerbäume überführen. Somit gelten auch für die Fehlerbaumdarstellung die oben beschriebenen Zusammenhänge.

Die Systemanalyse mittels Fehlerbäumen erfordert eine genaue Definition der Fragestellung. Im Bereich des Brückenbaus muss festgelegt werden, ob ein Bauwerk hinsichtlich seiner Standsicherheit, Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit oder weiterer Aspekte analysiert werden soll. Dementsprechend sind unerwünschte Ereignisse und deren Ausfallkriterien zu definieren. Für diese sind wiederum relevante Zuverlässigkeitskenngrößen zu bestimmen. Bei komplexen Strukturen kann die Bestimmung verschiedener Ausfallarten mit Hilfe einer Ausfallart- und Effektanalyse erleichtert werden. Für die Auswertung eines Fehlerbaumes sind Kenntnisse über die Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Komponenten nötig.

Führen einzelne Ursachen zu Ausfällen verschiedener Komponenten, spricht man von gemeinsam verursachten Ausfällen oder „common mode failures“. In Bild 11 führt Z_2 zum Versagen in allen drei Pfaden des Fehlerbaums und stellt somit den Auslöser eines gemeinsam verursachten Ausfalls dar.

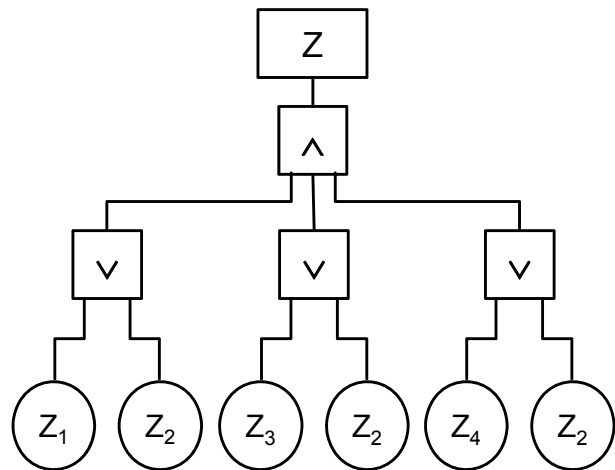


Bild 11: Gemeinsam verursachter Ausfall in der Fehlerbaumdarstellung (nach DIN 25 424-1:1981-09)

Hinsichtlich der Betrachtung der Redundanz von Systemen sind „common mode failures“ besonders kritisch zu betrachten, da eine gemeinsame Ursache das Versagen mehrerer Teilsysteme gleichzeitig zur Folge haben kann.

Die Auswertung eines Fehlerbaums nach (DIN 25 424-2:1990-04) führt zu folgenden Information über das System:

- maßgebende Ausfallkombination
- Eintrittshäufigkeit dieser Ausfallkombination
- Eintrittshäufigkeit des unerwünschten Ereignisses
- Nichtverfügbarkeit einer Betrachtungseinheit (= Wahrscheinlichkeit, dass eine Betrachtungseinheit zum Zeitpunkt t ausgefallen ist).

Die zur Auswertung erforderlichen Berechnungsgleichungen beruhen auf Boole'scher Algebra und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, sie können Tabelle 1 der DIN 25 424-2:1990-04 entnommen werden. Über die Berechnung der Zuverlässigkeitskenngrößen möglicher Ausfallkombinationen lassen sich besonders kritische Ereignisse bzw. Pfade identifizieren.

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Schädigung erfordert das Aufstellen einer Grenzzustandsgleichung für den betrachteten Schaden. Daraus kann über die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion die Schädigungswahrscheinlichkeit berechnet werden. Die Bestimmung der Systemversagenswahrscheinlichkeit erfordert hierbei das gemeinsame Wahrscheinlichkeitsintegral aller Basisvariablen (Eingangsgrößen der Grenzzustände auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite). Eine exakte Lösung des Wahrscheinlichkeitsin-

tegrals ist unter Einbezug vieler Basisvariablen häufig nicht möglich. In (THÖNS 2012) sind verschiedenen Verfahren zur näherungsweise Bestimmung dieses Integrals gegeben, auf die hier nicht weiter im Detail eingegangen wird, z.B. First-Order- und Second-Order Reliability Method (FORM / SORM) oder Monte-Carlo-Simulation (VDI 4008-Blatt6:1999-04).

Fehlerbäume unterliegen im Grunde einer Boole'schen Struktur und weisen daher die identischen Einschränkungen wie Zuverlässigkeitsblockdiagramme auf. Besonders hervorzuheben ist die Beschränkung auf binäre Zustandsbeschreibungen. Zudem werden Korrelationen zwischen Versagensereignissen und der Einfluss von Lastumlagerungen (Redundanzen) vernachlässigt. Nach (THÖNS 2012) ist deshalb die Modellierung eines Brückenbauwerks mittels Anwendung der klassischen Fehlerbaumanalyse unzureichend. Es besteht die Möglichkeit, dass die Systemversagenswahrscheinlichkeit unterschätzt wird.

Ereignisablaufanalyse

Im Gegensatz zur Fehlerbaumanalyse wird bei der Ereignisablaufanalyse (oder Störfallablaufanalyse) ausgehend von einem Anfangsereignis, der sog. Ursache, ermittelt, welche Ereignisse aus dem Anfangsereignis resultieren. Im Bereich des Brückenbaus kann ein Anfangsereignis zum Beispiel das Versagen einer Komponente eines Bauwerks darstellen. Das Haupteinsatzgebiet von Ereignisablaufanalysen ist die Untersuchung von Störungen in technischen Systemen. In DIN 25 419:1985-11 ist dieses Verfahren erläutert. Eine Ereignisablaufanalyse dient der Darstellung logischer Zusammenhänge und ermöglicht eine Wahrscheinlichkeitsberechnung von Ereignisabläufen bezogen auf einzelne Pfade des Diagramms.

Das Anfangsereignis, Zwischenzustände und der Endzustand werden graphisch in einem Rechteck dargestellt. Direkte Verknüpfungen werden durch eine Linie (Wirkungslinie) miteinander verbunden. Dies trifft z.B. für die Verknüpfung des Anfangsereignisses mit der ersten Verzweigung zu. Der wei-

tere Pfad eines Ereignisablaufdiagramms kann mit ausschließenden ODER-Verknüpfungen, JA/NEIN-Verzweigungen bzw. Mehrfachverzweigungen abgebildet werden. Diesen logischen Symbolen (dargestellt in Kreisen) müssen, um eine Wahrscheinlichkeitsbewertung des untersuchten Pfades durchzuführen, die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden.

In Bild 12 ist ein Ereignisbaum für einen Zweifeldträger mit drei definierten Versagenspunkten (A, B und C) dargestellt. Das Beispiel nach (KLINZMANN 2008) zeigt drei verschiedene Versagenspfade, welchen als Anfangsereignis eine „Hohe Last“ zugrunde liegt. Aufgrund der statischen Unbestimmtheit müssen zwei von drei Versagenspunkten ausfallen, um zu einem Systemversagen zu führen. Das System ist somit redundant. Alle Verzweigungen in diesem Beispiel stellen JA/NEIN-Verzweigungen dar.

Dieser Ereignisbaum lässt sich analog als Fehlerbaum darstellen (s. Bild 13). Wie weiter vorn beschrieben geht diese Darstellungsform vom TOP-Ereignis, dem Systemversagen, aus und pflanzt sich nach unten über die drei Versagenspfade zu den Zustandsvariablen bzw. Ausfallwahrscheinlichkeiten in die unterste Ebene fort. In diesem einfachen Beispiel ist der Informationsgehalt des Ereignisbaums identisch mit dem des Fehlerbaums. Es liegen wiederum drei Versagenspfade vor, welche sich aus der Kombination von zwei aus drei Einzelversagen in den Versagenspunkten (A, B und C) zusammensetzen.

Eine Ereignisablaufanalyse obliegt denselben Einschränkungen wie die Verwendung von Fehlerbäumen zur Systemanalyse. Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsbasis eignet sich die Ereignisablaufanalyse besser zur Identifikation einzelner Versagensmechanismen als zur Anwendung in einer gesamtheitlichen Systemanalyse. Dafür fehlen - wie bei der Fehlerbaumanalyse - die Berücksichtigung von Lastumlagerungen und die genaue Abbildung von Korrelationen zwischen Versagensereignissen.

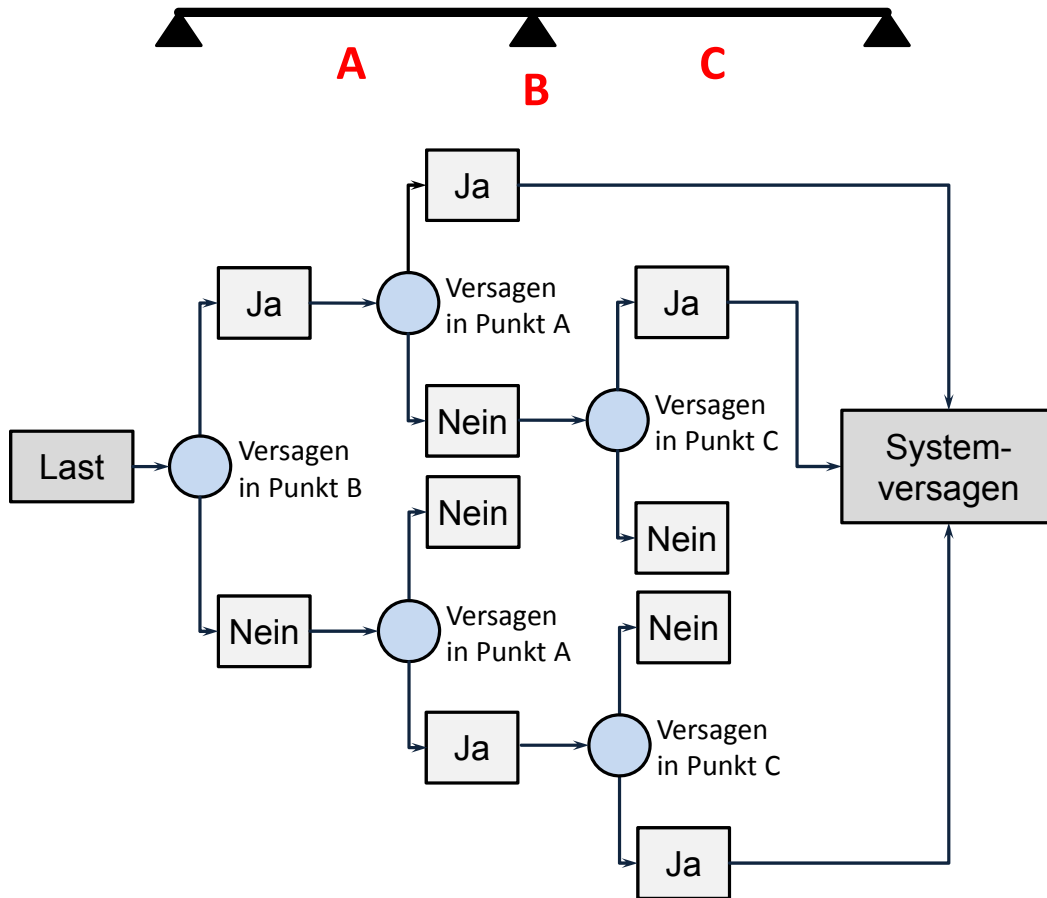


Bild 12: Ereignisbaum am Beispiel eines Zweifeldträgers (nach KLINZMANN 2008)

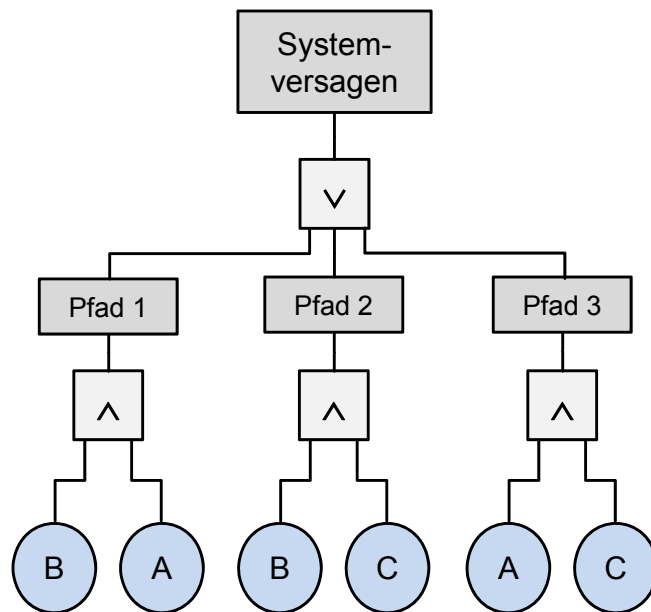


Bild 13: Fehlerbaum am Beispiel eines Zweifeldträgers (nach KLINZMANN 2008)

FE-Modelle

Die Verwendung von FE-Modellen in Kombination mit Stochastik bietet im Rahmen der Berechnung der Systemversagenswahrscheinlichkeit sowohl Vor- als auch Nachteile. Sie stellt grundsätzlich eine weitere Methode der Analyse dar, wobei im Rahmen der Zuverlässigkeitsauswertung wieder auf oben erwähnte Methoden zurückgegriffen werden muss.

In (AHRENS 2011) ist die Anwendung einer stochastischen FE-Formulierung am Beispiel einer vorgespannten Bogenbrücke aus den 1950er Jahren dargestellt. Hierbei gehen Eingangswerte der Materialien, Bauteilgeometrie, Einwirkungen bzw. der Alterungsmechanismen mit stochastischen Kenngrößen in ein Finite-Elemente-Modell ein. Am Beispiel der Bewehrungskorrosion wurde aufgezeigt, dass für einzelne Schadensmechanismen unter Anwendung dieses Ansatzes die Lebensdauer bzw. Versagenswahrscheinlichkeit berechnet werden kann.

Eine sinnvolle Nutzung dieses Systemansatzes ist nur über den Einbezug aktueller Messwerte möglich. Eine reine Betrachtung der Zustandsentwicklung anhand von theoretischen Schädigungsmodellen würde unvorhersehbare Ereignisse nicht berücksichtigen.

Ein wesentlicher Nachteil ist, wie auch in (THÖNS 2012) erwähnt, der hohe Modellierungsaufwand unter Anwendung komplexer nichtlinearer FE-Modelle. Dies ist notwendig, um das Versagensverhalten beschreiben zu können, führt jedoch zu einem sehr hohen Aufwand bei der Erstellung der Modelle und auch zu hohen Rechenzeiten. Daher kann nach (THÖNS 2012) dieser Aufwand für Standardbrücken nicht vertretbar sein. Speziell im Hinblick auf den Bauwerksbestand müssten Modelle für eine Vielzahl von Bestandsbrücken nach-

träglich erstellt werden, was zu einem erheblichen finanziellen Aufwand führen würde. Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Nachteil ist die Beschränkung auf die Berechnung der Systemzuverlässigkeit im Hinblick auf die Standsicherheit des Bauwerks. Eine Ausweitung der Methode auf die Dauerhaftigkeit und speziell auf die Verkehrssicherheit, welche größtenteils unabhängig von statischen Gesichtspunkten betrachtet werden muss, kann nur zum Teil erfolgen.

2.2 Vorgeschlagener Modellierungsansatz

2.2.1 Konzept des Modellierungsansatzes

Das Konzept des im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Modellierungsansatzes ist in Bild 14 schematisch dargestellt. Der Kerngedanke ist die Erstellung eines Systemmodells, welches sowohl strukturelle Abhängigkeiten als auch Interaktionen zwischen Schädigungen berücksichtigt. Das Modell fungiert nicht als „Black-Box“, sondern erlaubt es, Rückschlüsse auf die Schadensursachen zu ziehen sowie Informationen über die Relevanz der Schäden bzw. deren Wirkungen auf die einzelnen Bauteile und das Gesamtsystem zu erhalten.

Das Konzept in Bild 14 zeigt den Zusammenhang von Schadensursachen, Schädigungsprozessen und deren Auswirkung. Die Wirkung auf die einzelnen Bauteile resultiert in Effekten auf Gesamtsystemebenen. Schäden werden hierbei durch bestimmte Ursachen hervorgerufen und sind über ihre Symptome diagnostizierbar. Das gesamte Modell ist abhängig vom abgebildeten System.

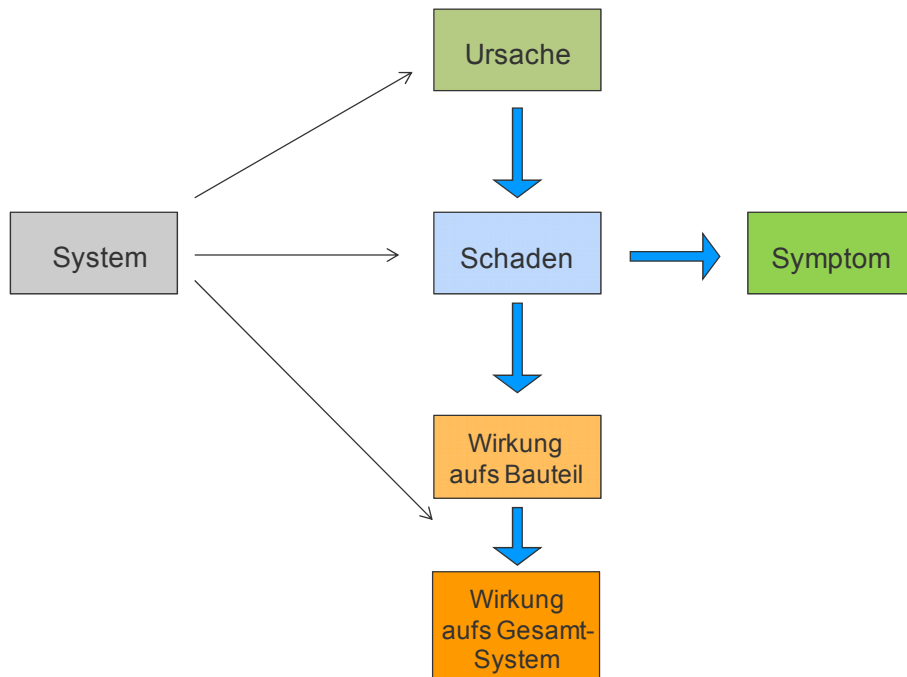


Bild 14: Konzept des Modellierungsansatzes

Am Beispiel der Bewehrungskorrosion in einem Hohlkastenquerschnitt, maßgeblich beeinflusst durch eine ungenügende Entwässerung, sei das Konzept hier kurz erläutert. Anhand der Messung von Ursachen und Symptomen kann das Maß des Schadens bestimmt werden. Ursachen können zum Beispiel über Feuchtemessungen, Messung des Chloridgehalts im Beton oder ähnliches festgestellt werden. Ein Symptom für fortgeschrittene Bewehrungskorrosion können Betonabplatzungen, hervorgerufen durch eine Volumenvergrößerung aus Korrosionsprozessen sein. In Abhängigkeit des Systems wird die Wirkung des Schadens auf das betroffene Bauteil beschrieben und auf das Gesamtsystem übertragen. Die Wirkung auf das Bauteil kann in einer Verminderung des tragenden Querschnitts bestehen. Auf Systemebene kann dies, je nach statischem System, Konstruktionsweise, eingesetzten Materialien etc., zum Verlust der Gebrauchstauglichkeit bzw. Standsicherheit führen.

Die Einführung eines sogenannten **Einflussbaumes** ermöglicht eine Analyse des Zustands bzw. des Schädigungspotentials einzelner Bauteile bis zum Zustand des Gesamtsystems. Ein Einflussbaum stellt hierbei eine Erweiterung des Fehlerbaumansatzes nach DIN 25 424-1:1981-09 und DIN 25 424-2:1990-04 dar. Ein binäres Verhalten und die Anwendung des Boole'schen Modells (VDI 4008-Blatt2:1998-05) werden durch frei definierte Verknüpfungen ersetzt.

Der Einflussbaum besteht aus drei hierarchisch angeordneten Ebenen:

- Strukturebene,
- Schadensebene und
- Parameterebene.

Der Begriff Einflussbaum wurde in Abgrenzung zum Fehlerbaum oder der Ereignisablaufanalyse gewählt, da es sich hierbei weder um eine reine Fehlerfortpflanzung, noch um die Analyse der Auswirkungen eines einzelnen Ereignisses handelt. Vielmehr werden Einflüsse verschiedener Eingangsgrößen (Parameter) im Zusammenhang verarbeitet und analysiert.

2.2.2 Strukturebene

Im Gegensatz zur Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (1999-11) findet das System Einzug in das Modell. Der Überbegriff System beinhaltet im vorgestellten Modellierungsansatz alle strukturellen Aspekte des Brückenbauwerks, wie die Konstruktionsweise unter Berücksichtigung des statischen Längs- und Quersystems, relevante Bauteile der Brücken und in der untersten Ebenen die eingesetzten Materialien. Diese werden als Komponenten des Einflussbaums dargestellt und im Folgenden als Strukturelemente bezeichnet. Das Brückenbauwerk selbst stellt hierbei das übergeordnete

te Strukturelement dar. Um eine leichtere Anpassungsmöglichkeit des Systemmodells an bestehende Verfahren der Zustandserfassung zu gewährleisten, wurde die Untergliederung des Bauwerks entsprechend der ASB-Ing und den dort verwendeten Bauteilgruppen und Bauteilen umgesetzt.

In Abschnitt 4.1 wird an einem Beispiel der hierbei eingesetzte „Levels-of-Detail“ Ansatz erläutert. Die unterste Ebene der Strukturelemente beinhaltet die verwendeten Baustoffe (Beton, Spannglieder etc.).

Die einzelnen Ebenen können vom Bild 15 entnommen werden.

2.2.3 Schadensebene

Der Strukturebene ist die Schadensebene untergeordnet. Hierbei werden den untersten Strukturelementen (mit dem höchsten Detaillierungsgrad) jeweils mögliche Schadensbilder zugewiesen. Ein Schadensbild kann z.B. der Bruch des Betonstahls darstellen. Die Zuordnung eines Schadens zu einem Strukturelement legt diesen örtlich fest. Schadensbilder sind somit innerhalb des Einflussbaumes immer lokal und ortsgebunden. Innerhalb der Schadensebene kann eine Untergliederung in verschiedene Prozesse, welche den übergeordneten Schaden hervorrufen, erfolgen. Als Beispiel kann ein Bruch des Betonstahls in die Schadensprozesse Überlastung oder Ermüdung untergliedert werden.

2.2.4 Parameterebene

Diese feinere Untergliederung auf Schadensebene wird auf Parameterebene wieder aufgegriffen. Jeweils den untersten Komponenten der Schadensebene werden Parameter zugewiesen, welche Rückschlüsse auf den Beginn bzw. das Fortschreiten des entsprechenden Schädigungsprozesses liefern.

Parameter können sowohl Ursachen bzw. Voraussetzungen für Schädigungen, als auch Indizien darstellen und dienen als Eingangswerte für Berechnungen. Eine Voraussetzung für Bewehrungskorrosion kann z.B. vorhandene Feuchte sein (SCHIEßL 1986), aber auch Betonabplatzungen können Rückschlüsse auf eine Volumenvergrößerung durch Bewehrungskorrosion darstellen und somit als Indiz dienen.

Nach Möglichkeit werden alle benötigten Parameter über die Sensorik eines geeigneten Monitoringkonzepts direkt am Brückenbauwerk in Echtzeit gemessen und finden dadurch Eingang in das Systemmodell. Bei der Analyse von Bestandsbauwerken kann das Nachrüsten eines Bauwerks mit Messsensoren den finanziellen Rahmen übersteigen. Es besteht jedoch die Möglichkeit, Parameter, zum Beispiel aus der Bauwerksprüfung, manuell in das Systemmodell einzugeben, um eine Analyse durchzuführen.

Ein wichtiger Punkt der Parameterdefinition ist die örtliche Unabhängigkeit der Eingangswerte. Jeder Eingangsparameter ist über die Schadensebene direkt einem Strukturelement zugeordnet. Es ist jedoch nicht erforderlich, dass der Eingangsparameter örtlich an diesem Strukturelement gemessen wird. Als Beispiel kann die Messung der Setzung an einer Stütze relevante Informationen über den Zustand des darüber liegenden Überbaus liefern. Die Messung findet also an der Stütze statt, die Auswirkungen zeigen sich jedoch am Überbau.

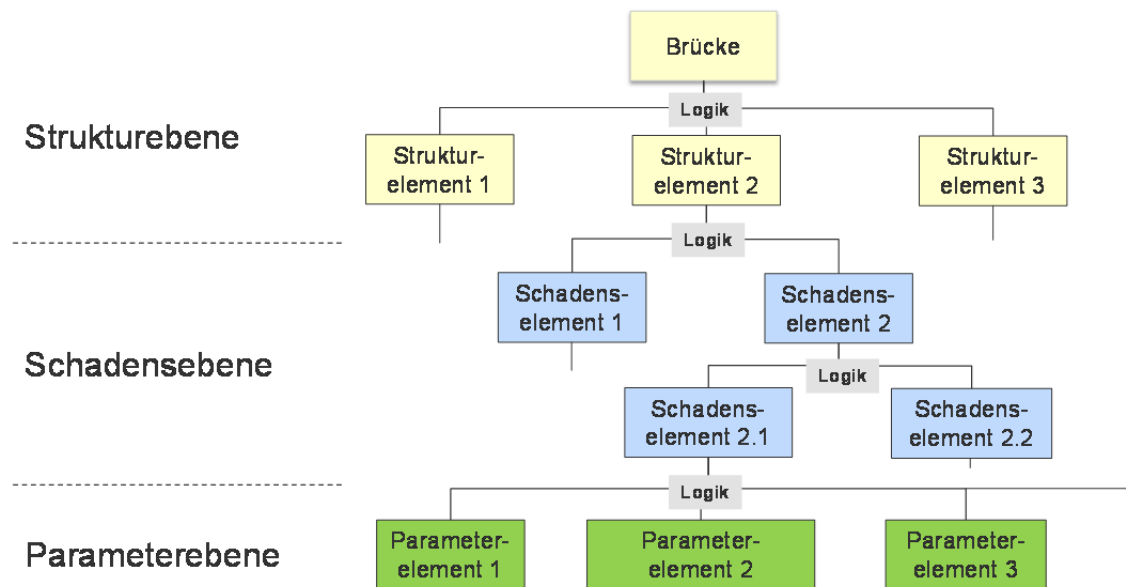


Bild 15: Ausschnitt eines Einflussbaums – konzeptionelle Darstellung

2.2.5 Verknüpfungen

Die Erstellung eines Einflussbaumes erfolgt über die drei vorgestellten Ebenen von oben (Strukturebene) über die Schadensebene nach unten zur Parameterebene (s. Bild 15). Die Auswertung folgt dem umgekehrten Weg: Beginnend bei den Eingangsparametern werden deren Auswirkungen auf Schadensebene bis hin zur Teilstruktur und dem Gesamtbauwerk betrachtet. Um dies zu ermöglichen, werden Logik-Elemente als Verknüpfungen zwischen den jeweiligen Komponenten innerhalb einer Ebene und ebenenübergreifend eingefügt. Die vertikale Verknüpfung der „Äste“ des Einflussbaums ermöglicht eine lokale Zuordnung von Parametern zu einzelnen Schäden und von Schäden zu den zugehörigen Strukturelementen. Der Einfluss wird somit nachverfolgbar abgebildet.

In diesen Logik-Elementen liegt der grundlegende Unterschied zur Fehlerbaumdarstellung. Im Gegensatz zu reinen Boole'schen Verknüpfungen kann diese Art der Verknüpfung auf verschiedene Arten und sehr flexibel Zusammenhänge abbilden. Es können frei definierte Gleichungen bzw. Vorschriften in die Verknüpfungen des Systemmodells implementiert werden. Der Inhalt der Gleichungen kann hierbei vielseitig sein und beliebig miteinander kombiniert werden.

Es besteht die Möglichkeit der Anwendung folgender Ansätze:

- probabilistische Ansätze
- physikalische/chemische Modelle mit deterministischen Ansätzen
- empirische Modelle
- etc.

Ein probabilistisches Schädigungsmodell im Rahmen der Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken, welches auf dem 2. Fickschen Gesetz beruht, kann (GEHLEN 2000) entnommen werden. Derartige Modelle können in Form mathematischer Gleichungen in die Logik-Elemente eingebaut werden.

Eine physikalische Gleichung kann in diesem Zusammenhang zum Beispiel das \sqrt{t} -Gesetz zur Beschreibung des Fortschreitens der Karbonatisierungsfrente nach (SCHIESSL 1976) darstellen. Über diese Gleichung lässt sich zu einem bestimmten Zeitpunkt die Karbonatisierungstiefe berechnen. Diese Berechnung würde in der Logik-Verknüpfung zwischen der Parameterebene und der Schadensebene erfolgen. Als stand sicherheitsrelevantes Beispiel kann hierbei auch die Ermüdung aufgeführt werden. Gemessene Spannungsschwingbreiten und deren Anzahl (Parameterebene) können über den Vergleich mit Wöhlerlinien (Bild 16), Rückschlüsse auf den Zustand des Spannstahls (Strukturebene) liefern. Das Ergebnis dieser Gegenüberstellung geht in die Schadensebene ein und ermöglicht eine direkte Identifikation der Ursache der Zustandsverschlechterung.

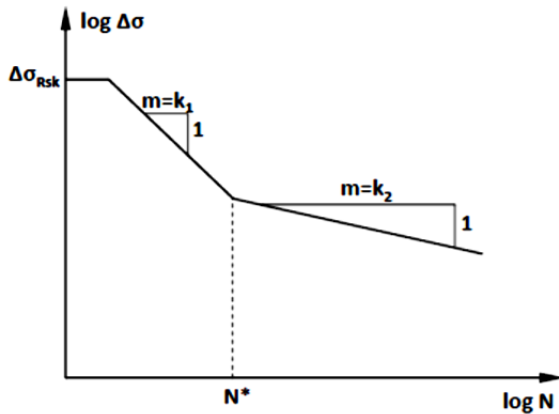


Bild 16: Wöhlerlinie für Betonstahl und Spannstahl (nach DIN-FB 102 (2009-03))

Die Verknüpfung zwischen Parameter- und Schadenssebene hat somit zwei Eingangsparameter, die gemessenen Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma$ und die zugehörige Anzahl an Lastwechseln N . Auf Basis der Hypothese der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner (PALMGREN 1924 und MINER 1945) kann ein Betriebsfestigkeitsnachweis geführt werden.

Hierbei wird die Summe der Quotienten aus den gemessenen Lastwechsel ΔN mit den aufnehmbaren Lastwechseln N_{lim} für die einzelnen Schwingbreiten $\Delta\sigma_i$ gebildet:

$$\sum \frac{\Delta N_i}{N_{lim,i}} \leq 1 \quad (2.12)$$

Eine Gesamtschädigung von $S \leq 1$ entspricht einem erfüllten Nachweis (kein Versagen). Werte von $S > 1$ können ab einem bestimmten Grenzwert als Warnung definiert werden (siehe 2.2.6 Funktionsweise des Einflussbaums).

Mittels empirischer Modelle kann ohne detailliertes Hintergrundwissen über die ablaufenden Prozesse auf Basis von Erfahrungswerten oder von statistischen Auswertungen eine Entscheidungsmatrix aufgebaut werden. Eingehende Parameter sind darin mit ihrer Bedeutung für den Schädigungsprozess bzw. ihren Auswirkungen auf Strukturelemente beschrieben. Die in der Matrix definierten Zusammenhänge liefern die Ausgangswerte der Verknüpfungen für die Schadenssebene. Für unbekannte Schädigungsmechanismen können statistische Auswertungen großer Messreihen zur Ent-

wicklung empirischer Modelle ein geeignetes Instrument liefern. In der Matrix abgebildete Zusammenhänge werden in Kategorien (unkritisch bis kritisch) eingeteilt. Als Beispiel kann der Einfluss des Chloridgehalts in Abhängigkeit der Art des Bauteils (Fundament, Spannbeton etc.) in Zusammenhang gebracht werden und somit eine Aussage über eine mögliche Schädigung der Korrosion getroffen werden (Bild 17).

Chloridgehalt			kritisch
		...	
	unkritisch		
	Art des Bauteils		

Bild 17: Entscheidungsmatrix

Liegen keine Berechnungsansätze für Schädigungsprozesse bzw. anwendbare Beschreibungen der Zusammenhänge vor, so kann in den Logik-Elementen auch ein Bewertungsschema ähnlich der derzeitigen Vorgehensweise mittels des Schadensbeispielkatalogs der RI-EBW-PRÜF 2007-11 erfolgen. Damit kann ein schrittweiser Übergang von den derzeitigen Bewertungsverfahren zu einem vollständig zuverlässigkeitsbasierten Verfahren realisiert werden. Unterstützend kann eine Einstufung der Schäden über eine Schwere-Klassifizierung oder das Erstellen einer Kritizitätsmatrix erfolgen (DIN EN 60812:2006-11).

Neue Erkenntnisse bezüglich Schädigungsmechanismen oder anderen Zusammenhängen können jederzeit in den Einflussbaum eingehen und somit genauere Zustandsbeschreibungen bzw. Prognosen ermöglichen.

Die Berechnung von Ausfallwahrscheinlichkeiten (s. Abschnitt 2.1) kann bei vorliegender Grenzzustandsgleichung weiterhin durchgeführt werden.

2.2.6 Funktionsweise des Einflussbaums

Auf die Vorstellung der drei Ebenen und der Verknüpfungen folgt in diesem Abschnitt die zusammenfassende Erläuterung der Funktionsweise des Einflussbaums. Die Umsetzung mittels der graphischen Modellierungssprache Systems Modeling Language (SysML) wird in den folgenden Abschnitten anhand von Beispielen dargelegt.

Eine konzeptionelle Darstellung des Einflussbaums kann Bild 15 entnommen werden. Der gezeigte Einflussbaum ist in die drei benannten Ebenen gegliedert.

Grundvoraussetzung für eine Systemanalyse mittels eines Einflussbaums ist eine geeignete Abbildung des realen Brückenbauwerks auf Strukturebene. Hierbei müssen alle relevanten Bauteile des Bauwerks entsprechend ihrer Funktion in der Brücke in einer hierarchischen Struktur abgebildet werden. Die Berücksichtigung des statischen Systems erfolgt innerhalb der Strukturebene durch eine übergeordnete logische Verknüpfung (vgl. Beispiel in Abschnitt 4.1.4). In diesem Logik-Element sind je nach Lage des betrachteten Querschnitts in Längsrichtung unterschiedliche Zusammenhänge in Form von Gleichungen beschrieben. Somit unterscheiden sich die Auswirkungen auf den Zustand des übergeordneten Strukturelements je nach Lage im statischen System.

Die Untergliederung der Strukturelemente erfolgt bis zu den einzelnen Baustoffen, welchen Schädigungsmechanismen zugeordnet werden. Diese werden wiederum auf Parameterebene mithilfe von spezifischen Eingangswerten verknüpft. Die Systemanalyse erfolgt ausgehend von diesen Eingangswerten im Einflussbaum aufsteigend bis zum obersten Element der Strukturebene, dem Bauwerk.

Eine Änderung des Wertes eines Parameters geht in die Logik-Verknüpfung ein. Auf Basis des hinterlegten Berechnungsansatzes werden daraus die Folgen ermittelt und auf das übergeordnete Schadenselement übertragen. Hierbei besteht die Möglichkeit, abhängig von definierten Mindestniveaus (z.B. für Betondeckung) bzw. tolerierbaren Maximalniveaus (z.B. Spannung im Spannstahl), die Auswertung auf Basis einer Skala darzustellen. Als bildhafte Darstellung kann z.B. eine Ampel mit gelbem Warnsignal und rotem Signal für einen kritischen Zustand eingeführt werden. Eine aussagekräftigere Kategorisierung wäre über eine zehnstufige Zustandsskala möglich. Die Zuordnung des Zustands zu einem bestimmten Skalenwert kann dabei unabhängig vom verwendeten Ansatz, welcher die logische Verknüpfung beschreibt, erfolgen. Unabhängig von der Berechnungsmethode ist die Darstellungsform des Zustandes dadurch identisch.

Grenzwerte für die Abbildung der Zusammenhänge in den logischen Verknüpfungen können verschiedenen Ursprungs sein und als Mindest- bzw. Maximalniveaus definiert werden. Als Beispiele eines Grenzwertes können eine versuchstechnisch

ermittelte ertragbare Spannungsschwingbreite bei Ermüdungsproblemen oder ein wissenschaftlich verifizierter kritischer Chloridgehalt im Beton im Hinblick auf Korrosionsschäden aufgeführt werden. Zusätzlich können in ein Systemmodell auch Ergebnisse aus Parameterstudien der Entwurfsphase von Brückenneubauten in die Logik-Elemente eingehen. Als Indiz für eine Gefährdung durch Ermüdung können zum Beispiel ermittelte Spannungsschwingbreiten aus einer rechnerischen Untersuchung im Rahmen der Bemessung als Vergleichswert für direkt am Bauwerk gemessene Werte eingesetzt werden.

Innerhalb eines Systemelements können verschiedene Ansätze für logische Verknüpfungen beliebig miteinander kombiniert werden. Eine zuverlässigkeitsbasierte Bewertung gemäß Teilprojekt FE 15.0508/2011/KRB erfordert jedoch eine Berücksichtigung der kausalen Zusammenhänge. Eine Vermischung von Indiz und Ursache eines Schadens muss in diesem Fall unbedingt vermieden werden. Als anschauliches Beispiel hierfür kann am Schadensbild der Korrosion gezeigt werden. Korrosion kann mehrere Ursachen, wie z.B. hoher Chloridgehalt, vorhandene Feuchte etc. haben. Das Auftreten von Betonabplatzungen kann auch ein Indiz für eine Volumenvergrößerung im Bauteilinneren durch Korrosionsprozesse sein. Betonabplatzungen können jedoch auch durch andere Ursachen hervorgerufen werden (schlechtes Betongefüge, Frost etc.). Somit sind unter Einbehalt der kausalen Kette Betonabplatzungen nicht als Ursache für Korrosion aufzuführen.

Alternativ könnten Parameter, welche keine direkte Schadensursache darstellen (Indizien), als Indikatoren eingeführt werden. Diese Indikatoren können ab einem festgelegten Grenzwert einen Schadenspfad im Systemmodell aktivieren. Die darin enthaltenen Parameter (Ursachen) sind innerhalb dieses Pfades gemäß der Kausalität miteinander verknüpft.

Von der Parameterebene ausgehend liefert der Einflussbaum somit Informationen über den Zustand der jeweils übergeordneten Komponenten. Der Schadensebene kann der Wirkmechanismus der Eingangsparameter auf die jeweiligen Schädigungsprozesse entnommen werden. Auf Strukturebene können die Zustände der einzelnen Komponenten und über deren logische Verknüpfung der Zustand des Gesamtsystems ermittelt werden. Als Ergebnis erhält man eine detaillierte Aussage über die Zustände der jeweiligen Elemente und die Ursachen eines möglicherweise verschlechterten Brückenzustands.

Eine Variation verschiedener Parameter mit anschließender Zustandsanalyse kann bereits in der Planungsphase zur Identifikation von Schwachstellen (Hot-Spots) des Bauwerks herangezogen werden. Man spricht von der Importanz einzelner Komponenten. Nach (VDI 4008-Blatt7:1986-05) gibt die Importanz wieder, wie sich das interessierende Merkmal für die Systemzuverlässigkeit bei einer bestimmten Änderung eines relevanten Komponentenmerkmals ändert.

Je nach Verfügbarkeit detaillierter Modelle, welche in die Logik-Elemente eingebettet werden, können auch Prognosen für Schädigungsverläufe simuliert werden. Zeitabhängige Schadensmodelle haben die Zeit als zusätzlichen Eingangsparameter in der untersten Ebene.

Das beschriebene Systemmodell wurde in diesem Projekt unter der Fragestellung der Bewertung der Standsicherheit erarbeitet. Das Vorgehen kann jedoch auch auf reine Dauerhaftigkeits- bzw. Verkehrssicherheitsbewertungen übertragen werden. Speziell in der Schadens- und Parameterebene müssen dabei Elemente entsprechend ersetzt werden. Zudem müssen alle relevanten Komponenten je nach Fragestellung in der Strukturebene abgebildet werden (z.B. Verkehrsleiteinrichtungen).

Falls der Schadensmechanismus nicht bekannt, oder im Modell nicht exakt abbildbar ist (z.B. Anprall), kann der Einflussbaum vereinfachend durch Entfernen der Schadensebene abgebildet werden. Die Haupteinflussparameter werden hierbei direkt an die Strukturelemente über logische Verknüpfungen gekoppelt (s. Bild 18). Eine Auswertung der jeweiligen Schadensabläufe wäre dadurch jedoch nur erschwert möglich, daher wird die Verwendung aller drei genannten Ebenen empfohlen.

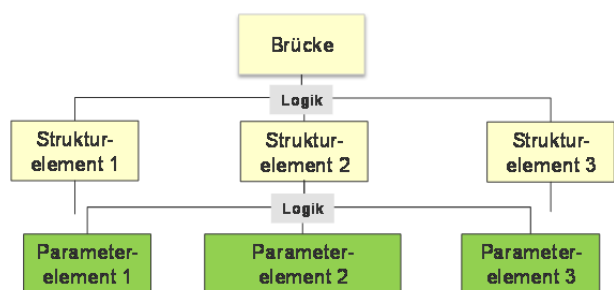


Bild 18: Reduzierter Einflussbaum (Struktur- und Parameterebene)

2.2.7 Berücksichtigung von Redundanzen

Ein Kritikpunkt der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Methoden ist die Vernachlässigung der Abbildung von Redundanzen.

Hierbei sei angemerkt, dass in Brückenbauwerken selten Redundanzen innerhalb der übergeordneten Strukturelemente vorliegen. In dieser Ebene führt der Ausfall von Bauteilen, auch bei statisch unbestimmten Systemen, häufig zu Kettenreaktionen und somit zur Nutzungsunfähigkeit des Bauwerks. Das Vorhandensein mehrerer Einheiten, welche die gleiche Funktion übernehmen können (vgl. Definition von Redundanz in Abschnitt 2.1), muss im Zusammenhang der Systemmodellierung vielmehr innerhalb von untergeordneten Elementen betrachtet werden.

Auf Querschnittsebene bezogen können Redundanzen über gemessene Eingangsparameter berücksichtigt werden. Der Ausfall eines gewissen Prozentsatzes der Vorspannung in einem biegemomentbeanspruchten Bauteil wird ohne Umlagerungsmöglichkeiten zu einem Anstieg weiterer Parameter, wie z.B. der Durchbiegung des Bauwerks oder einer Vergrößerung der Rissbreiten, führen. Zeigen diese Messwerte keine signifikanten Änderungen, ist eine Umlagerung des redundanten Systems erfolgt. Diese Zusammenhänge können innerhalb der logischen Verknüpfungen abgebildet werden. Das Vorgehen entspricht auch einer Kontrolle und verhindert falsche Herabstufungen des Bauwerkszustandes.

2.2.8 Interaktion von Schädigungsmechanismen

Die Berücksichtigung von Interaktionen verschiedener Schädigungsmechanismen ist automatisch durch die Struktur des Einflussbaumes gegeben. Die Auswirkungen einer Schädigung eines Bauteils auf andere Bauteile (Strukturebene) werden über den Eingang von Messwerten in die Parameterebene erfasst und weiterverarbeitet. Somit werden Interaktionen von Schädigungsmechanismen berücksichtigt und auf die jeweiligen Strukturelemente übertragen.

Werden zwei Schadensbilder durch identische Parameter hervorgerufen, kann der betroffene Messwert in beide Schadenselemente eingehen.

Sowohl direkte Interaktionen (ein Schaden beeinflusst einen anderen Schaden) als auch kumulative Interaktionen (verschiedene Schädigungsmechanismen weisen denselben, sich addierenden Effekt auf das Strukturelement auf) werden somit über den Einflussbaum abgebildet.

3 Systems Engineering

3.1 Anwendung von Systems Engineering

Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz, der in der Raumfahrt und Rüstungsindustrie entwickelt wurde, um ausgewogene Systemlösungen für komplexe technische Probleme modellieren und berechnen zu können, die die Bedürfnisse aller Interessengruppen bzw. alle Erwartungsaspekte befriedigen. Seit Entwicklung dieses Ansatzes wurde er aufgrund seiner Vorteile in verschiedenen Branchen (wie z.B. Automobilindustrie, Telekommunikation, Medizin) umgesetzt. Die wichtigsten Vorteile dieses Ansatzes sind die übersichtliche Modellierung von komplexen Systemen und die Möglichkeit, solche Lösungen abzubilden, die alle erwarteten Aspekte befriedigen können. Die Bedeutung von Systems Engineering sei hier an einem Beispiel, bei dem es um die Entwicklung eines Fahrzeugs geht, erläutert. Mit dem Beispiel (Bild 19) soll gezeigt werden, wie Systems Engineering eingesetzt wird, um verschiedene Aspekte des Produkts und ihr gegenseitiges Wechselspiel abzubilden. Das neue Fahrzeug soll verschiedene Aspekte erfüllen, die durch fünf verschiedene Akteure definiert werden. Diese Akteure sind der Designer, der Ingenieur (Maschinenbau), der Käufer, der Verkäufer und der Umweltschützer. Diese Personen haben alle verschiedene Anforderungen (die oft miteinander im Wechselspiel verbunden sind) an das gleiche neue Fahrzeug. Das Ziel ist, dass das Endprodukt möglichst viele dieser Anforderungen möglichst gut erfüllt.

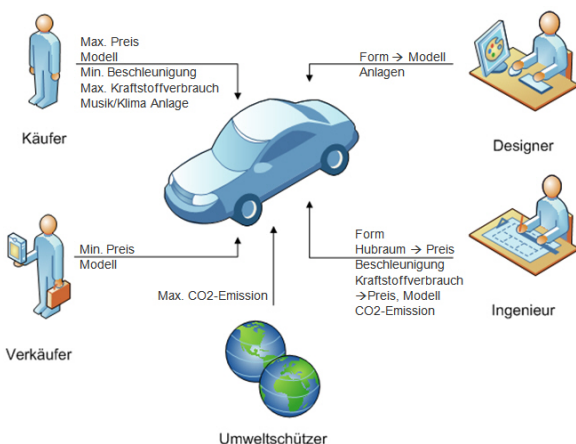


Bild 19: Systemmodell: Entwurf eines neuen Fahrzeuges

Der Designer entwirft die Gestalt des neuen Fahrzeugmodells, mit dem Ziel, die ästhetischen Anforderungen des Kunden zu erfüllen. Die Gestalt muss aber auch mit den verantwortlichen Ingenieuren abgestimmt werden, damit es genügend Platz für die Technik gibt und die Karosserie noch die nötige Steifigkeit besitzt. Die beteiligten Ingenieure entscheiden, mit welchem Motor das neue Modell ausgestattet werden soll und planen dementsprechend die weiteren Anlagen wie Schaltwerk, Tank, Auspuff, Klimaanlage usw. Diese Anlagen können verschiedene Eigenschaften des Fahrzeugs beeinflussen wie z.B. Beschleunigung, Kraftstoffverbrauch, CO₂-Emission und den Preis des Modells. Diese Eigenschaften sind ebenfalls entscheidend für den Kunden, der das Auto kaufen möchte, für den Umweltschützer, dessen Ziel es ist, die CO₂-Emission so gering wie möglich zu halten, und für den Verkäufer, der nur solche Modelle lagern oder bestellen will, bei denen er das Potenzial für umfangreiche Verkäufe sieht. Es gibt viele Aspekte eines Fahrzeugs, die bei Entwurf und Konstruktion eines neuen Modells berücksichtigt werden müssen. Viele von diesen Aspekten oder Eigenschaften sind eng miteinander verbunden oder können weitere Eigenschaften beeinflussen und damit die Zufriedenheit eines Akteurs verändern. Um diese und weitere Aspekte berücksichtigen zu können, müssen Systemmodelle aufgebaut werden, die diese Zusammenhänge und Verbindungen zwischen den unterschiedlichen Aspekten abbilden. Wie man solche Modelle erstellen kann und welche Modellierungswerkzeuge dafür benutzt werden können, wird in den nächsten Abschnitten vorgestellt.

Auch bei dem anvisierten modular aufgebauten Brückenmodell müssen die verschiedenen Aspekte des Lebensdauermanagements und der Instandhaltung berücksichtigt werden. Bei dem Brückenmodell sind diese Aspekte die Kategorisierungsmöglichkeiten von verschiedenen Bauelementen, Bauteilen und Schädigungen, die Standicherheit, die Veränderungen des statischen Systems des Bauwerks und die Zustandsbewertung der Brücke. Ziel ist es, diese Aspekte in einem Systemmodell zusammenzuführen. Ein wichtiger Unterschied zwischen den beiden Modellen ist, dass sich das Fahrzeugmodell (wie die meisten Systemmodelle) auf die Entwurfsphase bezieht, das hier betrachtete Systemmodell als Werkzeug hingegen zur Überprüfung des Zustandes für schon existierende Brücken benutzt werden soll. Damit ergibt sich ein neues Anwendungsgebiet für das Systems Engineering.

3.2 Modell-basiertes Systems Engineering

Die oben genannten verschiedenen Aspekte können, wie gerade geschehen, schriftlich per Text in einem Dokument abgebildet werden. Der Nachteil dieser Art der „Modellierung“ ist es, dass für externe Projektpräsentationen oder nachträgliche Erweiterungen des Modells das gesamte Dokument durchgelesen werden muss, um die Zusammenhänge und Verbindungen zwischen den verschiedenen Entwurfparametern neu zu erkennen. Dieser Prozess ist zeitaufwendig und fehleranfällig. Zudem sind die Zusammenhänge textbasiert nur schwer zu vermitteln. Daher wurden verschiedene Visualisierungswerkzeuge wie z.B. Diagramme, Graphen und Abbildungen entwickelt und standardisiert, um das System mittels graphischer Beschreibungen zu modellieren. Dieses sogenannte Modell-basierte Systems Engineering (MBSE) unterstützt die Modellierung von Systembedingungen, -entwurf, -analyse, -verifizierung und -validierung. Die mathematische Formulierung und Umsetzung des MBSEs wurde 1993 vorgestellt und hat sich inzwischen als Standardverfahren für die Modellierung von Systemen etabliert (WYMORE 1993).

3.2.1 System-Modell

Mit der Hilfe des MBSEs wird ein Systemmodell, welches Informationen über die Systemspezifikationen, Systementwurf, -analyse, -verifizierung und -validierung beinhaltet, erstellt. Dieses Modell besteht aus verschiedenen Elementen, die Bedingungen, Entwurfselemente, Testfälle, Grundprinzipien und ihre Zusammenhänge beschreiben und abbilden. Es wird eingesetzt, um eine Systemlösung zu entwerfen, die alle gestellten Anforderungen möglichst gut befriedigen kann. Die wichtigsten Vorteile des MBSE gegenüber dokumentbasierter Systemmodellierung sind, dass es eine verbesserte Kommunikation zwischen den Beteiligten unterstützt, da die Abbildungen und die darin enthaltene Symbolik eine klar definierte Semantik besitzen und somit Missverständnisse reduziert werden können. Die Benutzung des MBSEs ermöglicht eine höhere Qualität des Endprodukts, weil viele verschiedene Aspekte betrachtet werden können und die graphische Abbildung eine bessere und einfachere Verfolgung der Zusammenhänge ermöglicht. Mit einem MBSE-Modell können Planänderungen und konzeptionelle Lösungsalternativen schnell und übersichtlich analysiert werden. Das Modell ermöglicht eine Wiederverwendung von existierenden Projektteilen aus anderen

Modellen, die schnell in das neue Modell integriert werden können. Mit dem Modell können mathematische Berechnungen durchgeführt werden. Daher kann es als Grundlage für Simulationen dienen.

3.3 Systems Modeling Language

Systems Modeling Language (SysML) ist eine graphische Modellierungssprache, die die Erstellung eines Systemmodells unterstützt. Die Sprache ermöglicht die graphische Darstellung der folgenden Systemelemente:

- Strukturelle Anordnungen, Abhängigkeiten, Verbindungen, und Klassifizierungen
- Beschränkungen oder Constraints von technischen Eigenschaften
- Anweisungen zwischen verschiedenen Handlungen, Strukturen, Beschränkungen und Bedingungen (z.B. eine Funktion zugewiesen zu einer Komponente)
- Bedingungen und ihre Verbindungen mit weiteren Bedingungen, Entwurfselementen und Testfällen

SysML benutzt Diagramme, die von den Diagrammen der Unified Modeling Language (UML) abgeleitet wurden bzw. diese erweitern.

3.3.1 Unified Modeling Language

UML ist eine graphische Modellierungssprache, die für die Modellierung von Software entwickelt wurde. Sie wurde auch von der ISO standardisiert (ISO/IEC 19505 für Version 2.1.2). Die Sprache ermöglicht die graphische Abbildung von verschiedenen Systemelementen und ihrer Verbindungen. Einer der wichtigsten Anwendungsfälle dieser Sprache ist die Modellierung der Arbeitsabläufe neuer Programme in der Softwareentwicklung. Mit dem Modell kann die Struktur der Software abgebildet und der Ablauf von Algorithmen wiedergegeben werden. UML bietet entsprechend zwei wesentliche Klassen von Diagrammen für die Nutzer (Bild 20):

- Strukturdiagramme: beschreiben den Aufbau des Systems (Klassen, Komponenten, Verteilungen, Objekte usw.)

- Verhaltensdiagramme: beschreiben mögliche Aktivitäten, Interaktionen, Sequenzen oder Zustände der Systemkomponenten

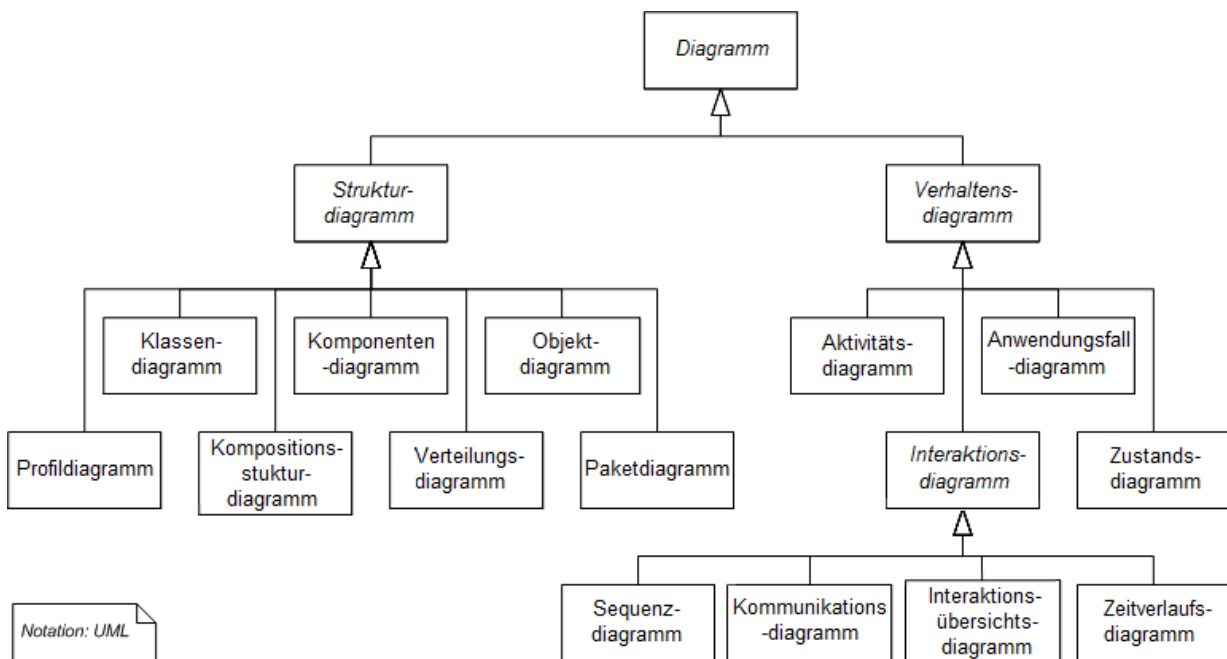


Bild 20: Struktur der UML-Diagramme

3.3.2 SysML Diagramme

SysML hat diese Struktur der Diagramme von UML übernommen und hat sie um eine weitere Klasse erweitert, die Bedingungsdiagramme (Bild 21). Von den Strukturdiagrammen wurden die Paketdiagramm unverändert und die Klassen- und Kompositionsstrukturdiagramme mit geänderter und erweiterter Struktur übernommen. Zusätzlich wurde ein neues Diagramm, das Parameterdiagramm, eingeführt. Von Verhaltensdiagrammen wurden in SysML das Sequenz-, Zustands- und Anwendungsfalldiagramm (Use-Case D.) übernommen und das Aktivitätendiagramm mit Modifizierungen in ihre eigene Struktur eingebaut. SysML besteht zurzeit aus den folgenden Diagrammen:

Blockdiagramm (Block definition d.): Repräsentiert sowohl die Struktur der Komponenten (so genannte Blöcke) als auch ihre Anordnung und Klassifizierung.

Inneres Blockdiagramm (Internal block d.): Repräsentiert innere Verbindungen und Abhängigkeiten oder verschiedene Interfaces zwischen den Blöcken.

Parameterdiagramm (Parametric d.): Ermöglicht die Abbildung von mathematischen Gleichungen.

Paketdiagramm (Package d.): Repräsentiert die Anordnung des Modells mithilfe von Paketen, die die Modellelemente beinhalten.

Aktivitätsdiagramm (Activity d.): Repräsentiert Aktionen, die in einem oder zwischen verschiedenen Blöcke passieren können. Meistens wird es verwendet um den Ablauf eines Anwendungsfalls zu beschreiben.

Sequenzdiagramm (Sequence d.): Repräsentiert Daten- und Informationsaustauschprozesse zwischen Modellelementen, und ermöglicht die Abbildung von alternativen Lösungen.

Zustandsdiagramm (state machine d.): Beschreibt das Verhalten einer Entität mithilfe von Zuständen und Übergängen von einem Zustand zu dem anderen.

Anwendungsfalldiagramm (use-case d.): Repräsentiert wie das System oder Entitäten des Systems von externen Entitäten oder Akteuren gesteuert werden können.

(FRIEDENTHAL et. al. 2008)

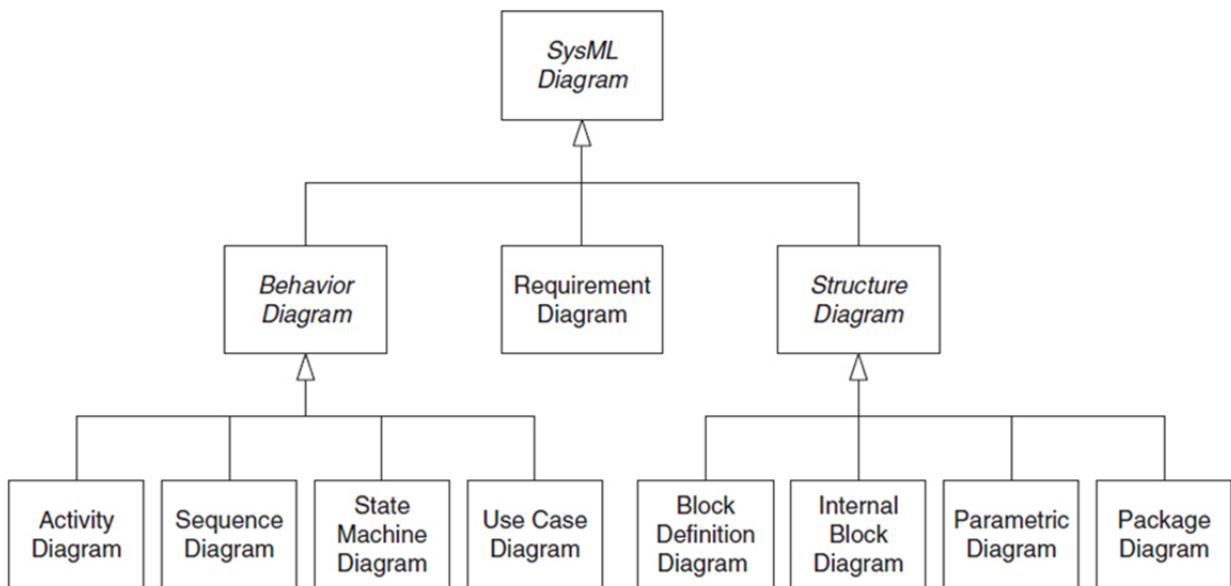


Bild 21: Diagramme der Systems Modeling Language (FRIEDENTHAL et. al. 2008)

3.3.3 Umsetzung der Modellierung von Schädigungen und Brückenkonstruktionen mit SysML

Für die Modellierung der Brückenstruktur, Schadensbilder und Parameter wurde von den neun SysML-Diagrammen (Bild 21) das Block Definition Diagramm (BDD) eingesetzt. Ein BDD repräsentiert sowohl die Struktur der Komponenten (so genannte Blöcke) als auch ihre Anordnung und Klassifizierung. Die einzelnen Funktionseinheiten (in unserem Fall Bauteil, Schädigung oder Messwert) werden als Blöcke dargestellt. Interaktionen wie hierarchische Unterordnung oder Abhängigkeiten zwischen Blöcken werden durch Linien und Pfeile symbolisiert. Die am häufigsten benutzte Verbindung in unserem Modell war die Untergliederungs- bzw. Aggregationsbeziehung (engl. association - part). Diese wird durch eine Linie mit einer gefüllten Raute am Ende dargestellt (Bild 22).

Für die Umsetzung der flexiblen logischen Verknüpfungen und die Berechnung der Ergebnisse des Ampelsystems wurde das Parameterdiagramm (Bild 23) verwendet. Es ermöglicht die Abbildung von parametrischen Beziehungen zwischen Eigenschaften von Systembausteinen mithilfe von mathematischen Gleichungen und ermöglicht damit eine parametrisierte Simulation des Diagramms (wie z.B. bei GEYER et. al. 2012). Als Ergebnis einer Berechnung können z.B. die Zustandsnoten (bzw. die Farben der Ampeln) und die Weiterentwicklung von Schäden ermittelt werden. Im Diagramm werden die nötigen Eingabewerte für die Berechnung durch die sogenannten Ports (kleine Rechtecke innerhalb des Blockes) visualisiert und der Fluss dieser Parameter zwischen den Ports mit Verbindungslinien gekennzeichnet (Bild 23). Im Parametrischen Diagramm wird zudem definiert, welche Variable in der hinterlegten Gleichung mit welchem Port verknüpft ist, und damit welchen Wert die Variable annimmt.

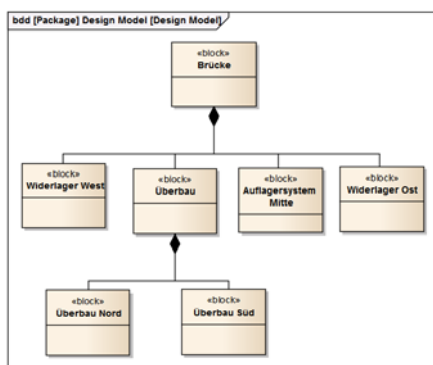


Bild 22: Block Definition Diagramm (BDD)

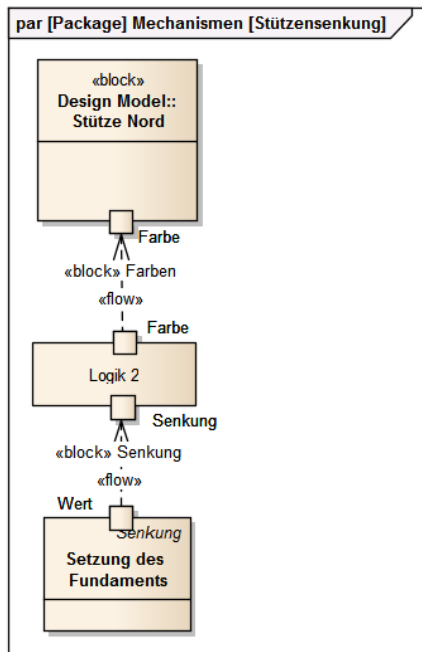


Bild 23: Parameterdiagramm

Um den Einflussbaum einer Brücke zu realisieren, wird zunächst die Struktur der Brückenbauteile, der Schadensbilder und der Parameter mithilfe von Block Definition Diagramms umgesetzt. Sowohl die Blockelemente als auch alle Verbindungen zwischen den Elementen müssen einzeln definiert werden. Anhand dieser Modelle werden die Parametrischen Diagramme aufgebaut, die den eigentlichen Einflussbaum bilden. Dabei wird zunächst die Bauteilstruktur der Brücke als Parameterdiagramm aufgebaut und im Anschluss die Bauteile mit Schadensbildern und mit Parametern verbunden. Nachdem die Struktur erstellt ist, muss das Parameterdiagramm um die detaillierte Ausgestaltung der Logischen Verknüpfungen zwischen den Komponenten ergänzt werden. Die Komponenten des Parametrischen Diagramms können von den BDDs übernommen werden, aber die Logischen Verknüpfungen und die dazu nötigen Parameterports müssen manuell definiert werden.

Wie diese Diagramme für eine spezielle Brücke angewendet werden können, wird im Kapitel 4 erläutert. In den hier dargestellten Modellen sind die Ports ausgeblendet und nur die Verbindungslinien zwischen den Bausteinen dargestellt. Im nächsten Abschnitt werden Softwareprodukte vorgestellt, die die Modellierung mit SysML ermöglichen.

3.3.4 SysML-Modellierungssoftware

Für die Modellierung der Systemmodelle mit SysML wurden mehrere Softwarepakete, sowohl aus dem kommerziellen als auch dem Open-Source-Bereich, untersucht und miteinander verglichen. Um die Eignung diese Pakete für die Brückensystemmodellierung bewerten zu können, wurden verschiedene Untersuchungskriterien definiert. Dabei wurden einige Kriterien von der Webseite www.sysmltools.com übernommen und andere ergänzt. Die wichtigsten Anforderungen an die Software sind:

1. Unterstützung aller SysML Diagramme
2. Verbindungsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Diagrammtypen (z.B. zwischen Blockdiagramm und Parameterdiagramm)
3. Simulationsmöglichkeit der Parameterdiagramme
4. benutzerfreundliche Oberfläche
5. akzeptabler Preis

Im Rahmen der Untersuchung wurden die fünf wichtigsten kommerziellen Softwarepakete Atego Artisan Studio, No Magic Magic Draw, Visual Paradigm, Sparx Enterprise Architect und Altova UModel Enterprise edition sowie die Open-Source-Lösung Modelio miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Software	SysML Diagramme	Verbindungsmöglichkeit verschiedener Diagramme und Nachverfolgbarkeit der Verbindungen	Simulation	Oberfläche	Preis
Atego Artisan Studio	komplett	mittel - hoch	nach Export nach MATLAB oder Simulink	++	\$\$\$
No Magic Magic Draw + SysML Plugin	nur mit Plugin	mittel	nur mit 3rd Party Tool (+1499\$)	++	749 - 2399\$ + 1199\$ (Plugin)
Visual Paradigm	nur Requirement Diagramm	niedrig	nur Enterprise Edition	+	1399\$
Sparx Enterprise Architect	komplett	mittel - hoch	Eingebaut	++	Academic: 299\$
Altova Umodel	nur in Enterprise Edition	niedrig	k. A.	+	199 - 299€
Modelio Open	nur mit Plugin	niedrig	k. A.	+	Free, neueste Versionen kostenpflichtig

Tab. 1: Vergleich von verschiedenen Softwarepaketen für die Modellierung mit SysML

Da die meisten dieser Softwareprodukte hauptsächlich für die Modellierung von UML-Diagramme entwickelt wurden und SysML nur im Rahmen einer Erweiterung (z.B. Altova UModel) oder als Erweiterungs-Plugin (z.B. No Magic Magic Draw und Modelio Open) verfügbar ist, wurde eine erste Auswahl entsprechend der Kriterien (1) und (2) getroffen. Entsprechend wurden die Produkte Visual Paradigm, Altova UModel und Modelio Open ausgeschlossen, da sie nicht alle SysML-Diagramme modellieren können oder die Nachverfolgbarkeit der Diagrammverbindungen nicht ausreichend gegeben ist.

Nach dieser ersten Selektion lagen die entscheidenden Kriterien für die weitere Auswahl in der Fähigkeit der Software zur Simulation der Parameterdiagramme und im Preis der Software. Die Oberfläche und die Bedienbarkeit der verbliebenen Produkte sind durchweg als sehr gut zu bewerten, daher war dieses Kriterium nicht weiter ausschlaggebend.

Die Programme Atego Artisan Studio und No Magic Magic Draw sind nur mit einer zusätzlichen kostenpflichtigen Erweiterung in der Lage, Simulationen durchzuführen. Daher wurde die Software Sparx Enterprise Architect ausgewählt und im weiteren Verlauf des Projekts eingesetzt. Die Software hat die gleichen (für unser Projekt) wichtigen Eigenschaften wie die beiden zuvor erwähnten Programme, kann jedoch zusätzlich Simulationen direkt innerhalb der Entwicklungsumgebung durchführen. Gleichzeitig wird das Produkt zu einem vergleichsweise niedrigeren Preis angeboten.

Sparx Enterprise Architect

Sparx Enterprise Architect gehört zu den Softwareprodukten, die ursprünglich für die Modellierung von UML-Diagrammen entwickelt wurden. Die SysML-Module sind im Rahmen eines Erweiterungs-Plugins verfügbar bzw. in der Professional oder Systems Engineering Version bereits in das Hauptprogramm integriert. Die Software verfügt neben den hier wichtigen Möglichkeiten zur Modellierung von SysML-Diagrammen und Simulation von Parameterdiagramm über weitere wichtige Module, wie z.B. die Code-Generierung für Modelle in verschiedene Programmiersprachen. Dies ermöglicht den Export der entworfenen Modelle und die Einbindung des Quellcodes in externe Programme. Andersherum besteht die Möglichkeit zur Erzeugung von Systemmodellen aus bestehendem Quellcode (Reverse Engineering).

Die Software unterstützt das Prinzip der „Model Driven Architecture“ (MDA), wobei mithilfe von vordefinierten Templates (Diagrammen) komplexe Systeme schnell und einfach aufgebaut werden können. Die strukturiert aufgebaute graphische Oberfläche unterstützt diesen Prozess (Bild 24). Durch die erwähnten Eigenschaften ist Sparx Enterprise Architect ein leistungsstarkes Modellierungstool, welches sich hervorragend für die Zwecke der Systemmodellierung eignet. Alle in diesem Bericht vorgestellten Beispiele und Systemmodelle wurden mit der Software Sparx Enterprise Architect modelliert und berechnet.

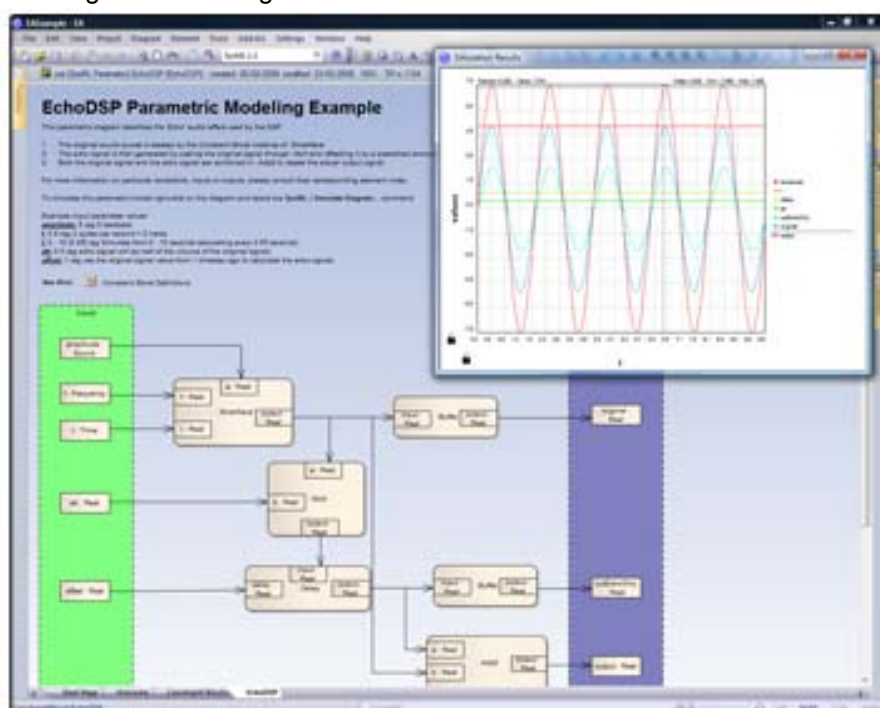


Bild 24: Benutzeroberfläche der Software Sparxs Enterprise Architect (Quelle: www.sparxsystems.com)

4 Anwendung des Modellierungsansatzes auf die Beispielbrücke

Die Anwendung der vorgestellten Konzepte und Modellierungsansätze wird anhand einer Beispielbrücke illustriert. Die ausgewählte Demonstrationsbrücke ist die Autobahnbrücke A1/A30 "AK Lotte-Osnabrück" (Bauwerksnummer 3713766), die im Jahr 1967 erbaut wurde. Die Unterlagen wurden durch den Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen zur Verfügung gestellt.

Die Brücke teilt sich in ein nördliches (Fahrtrichtung Osnabrück) und ein südliches (Fahrtrichtung Rheine) Teilbauwerk auf. Entsprechend der Teilbauwerke gibt es einen nördlichen und einen südlichen Überbau. Die zwei Überbauten haben den gleichen Doppelhohlkastenquerschnitt und sind statisch unabhängig voneinander. Die zehn Spannglieder (pro Steg) laufen im Steg des Hohlkastens entsprechend dem Momentverlauf des Durchlaufträgers und sind am Ende und / oder nah zur Mitte des Trägers verankert. Die Fahrbahnplatte ist in Querrichtung vorgespannt. Beide Überbauten sind auf den westlichen und östlichen kastenförmigen Widerlagern mit Parallelfügelwänden und in der Mitte pro Hohlkasten auf einer Stütze (insgesamt vier Stützen) gelagert. Diese Bauwerksstruktur der Brücke wurde mithilfe von SysML abgebildet und als Einflussbaum assembliert. Zunächst wird erläutert, wie die Struktur- und Schädigungsdiagramme der Brücke aufgebaut wurden, um im Anschluss darauf einzugehen, wie das gesamte Systemmodell (Einflussbaum) der Brücke aus diesen Diagramme entwickelt wurde.

4.1 Strukturelle Modellierung der Beispielbrücke

Der erste Teil des Aufbaus eines Einflussbaumes ist die strukturelle Aufteilung und Hierarchisierung der Bauteile der betrachteten Brücke (siehe Abschnitt 2.2.2). Dies erfolgt nach dem so genannten „Level-of-Details“ Ansatz, welcher das Bauwerk von einer groben Aufteilung auf jeder tieferen Ebene immer feiner aufteilt (Bild 25). Strukturelemente werden in dem SysML-Diagramm mit hellbrauner Farbe dargestellt (Bild 28).

Der Aufbau des Strukturmodells erfolgt immer von oben nach unten, also von der groben zur feinen Bauteiluntergliederung. Die erste Ebene der Aufteilung entspricht den Hauptbauteilen der Brücke, wie z.B. Überbau, Widerlager und Auflagerungssystem. Diese Hauptbauteile werden im nächsten Schritt in feinere Bauteile unterteilt und hierarchisch unter dem Hauptbauteil angeordnet (Vor-

gehensweise siehe Bild 15). Bei dem Aufbau des Strukturmodells wurden die Bauteile, die keine tragende Funktion haben, im Modell nicht berücksichtigt. Dieses Strukturmodell wird nach erfolgter Verknüpfung mit Schadensbildern und Parametern als das Systemmodell der Brücke fungieren. In diesem Modell werden Schädigungen modelliert und mithilfe dieses Modells werden Schädigungsabläufe simuliert.

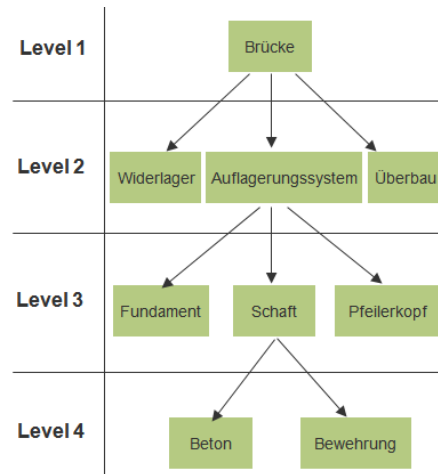


Bild 25: Beispiel für den „Level-of-Detail“ Ansatz

4.1.1 Strukturmodell des Widerlagers

Der erste Hauptbauteil einer Brücke ist das Widerlager. Widerlager sind Abschlussbauwerke an Brückenenden, die die Endauflagerung von Brücken und den Beginn des weiterführenden Verkehrsdamms bilden. Damit hat das Widerlager die Aufgabe, gleichzeitig die horizontalen und vertikalen Kräfte aus dem Überbau und die Kräfte des Erddrucks aufzunehmen. Dafür eignen sich wandartige Elemente, wie z.B. die Widerlagerwand und die Flügelwände (siehe Bild 26).

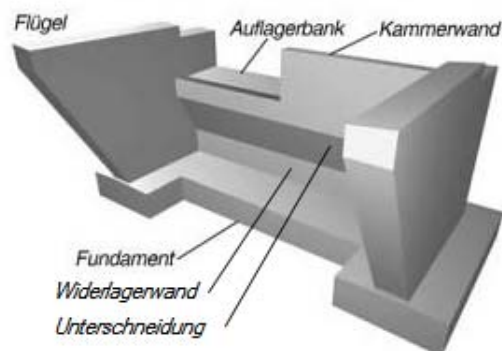


Bild 26: Bauteile eines Widerlagers (MEHLHORN 2007)

Aus diesem wird das Widerlager auf der ersten Unterebene unterteilt in die Widerlagerwand, die Auflagerbank, auf der die Auflager ruhen, die Kam-

merwand, die zwei Flügelwände, das Fundament, welches die vertikalen Kräfte der Brücke in den Boden ableitet, und den Hinterfüllbereich.

Um Wasserschäden zu vermeiden und damit das Risiko größerer Fahrbahnsetzungen über dem Widerlager zu verringern (Setzungsunterschied zwischen Damm und Brücke), wird der Hinterfüllbereich mit einem Entwässerungssystem ausgestattet (siehe Bild 27). Es besteht aus einer Dränmatte und einer Filterschicht hinter der Widerlagerwand und einem Grundrohr unterhalb der Widerlagerwand.

Die Entwässerungselemente und die Hinterfüllung bilden auf der nächsten Unterebene den Hinterfüllbereich. Alle weiteren Bauteile können in Bewehrung und Beton aufgeteilt werden. Das gesamte Strukturdiagramm des Widerlagers ohne die Bewehrungs- und Betonelemente zeigt das Bild 28.

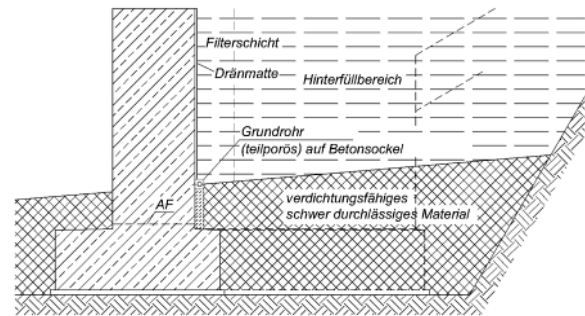


Bild 27: Aufteilen des Hinterfüllbereichs eines Widerlagers (MEHLHORN 2007)

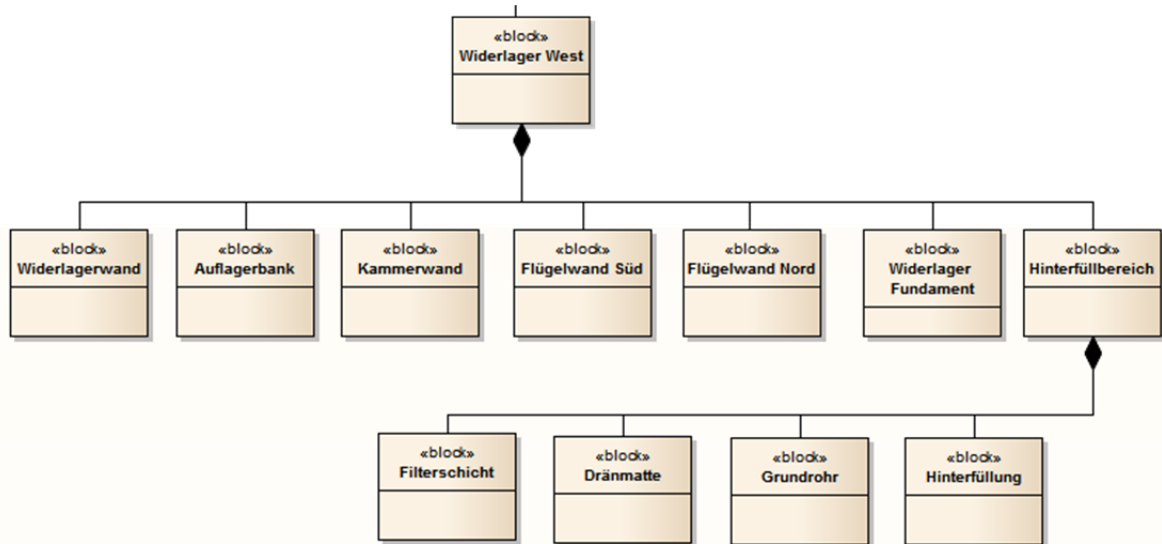


Bild 28: Strukturmodell des Widerlagers mit SysML Block Definition Diagramm

4.1.2 Strukturmodell des Unterbaus im Feldbereich der Brücke

Das nächste wichtige Hauptbauteil der Brücke ist das Auflagerungssystem (Unterbau) im Feldbereich der Brücke. Es kann aus mehreren Pfeilern oder Stützen bestehen und dient dem Lastabtrag zwischen den Widerlagern bei mehrfeldrigen Brückenüberbauten (MEHLHORN 2007.). Bei der Brücke A1/A30 "AK Lotte-Osnabrück" handelt es sich um ein Unterbau aus vier Stützen in der Feldmitte der Brücke. Jede Stütze unterstützt einen Hohlkastenquerschnitt in der Mitte der Bodenplatte unter einem Querschott (Bild 29).

Somit wird das mittige Auflagerungssystem der Brücke zunächst in einzelne Stützen unterteilt. Die einzelnen Stützen können dann in ein Beton- und Bewehrungsteil und ein Fundament aufgeteilt werden. Das gesamte Strukturdiagramm des Auflagerungssystems in der Mitte der Brücke für das nördliche Bauwerk zeigt das Bild 30. Die Untergliederung der Stütze Nord Mitte ähnelt der von Stütze Nord Nord¹. Weitere Auflagerungssysteme wie z.B. verschiedene Pfeilerkonstruktionen mit Pfeilerkopf können ähnlich zur Struktur der vorgestellten Stütze abgebildet werden. Besondere Unterbauteile wie Gründungen werden im Strukturmodell nicht separat betrachtet. Eine Schädigung solcher Systeme wird durch verschiedene Parameter für das entsprechende Fundament im Einflussbaum abgebildet.

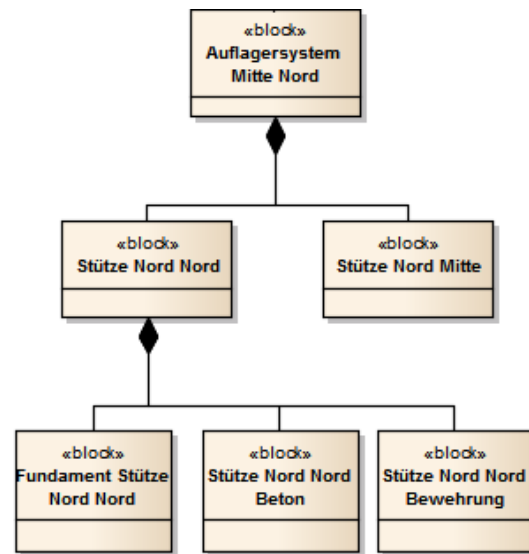


Bild 30: Strukturmodell des Auflagerungssystems Mitte Nord mit SysML Block Definition Diagramm

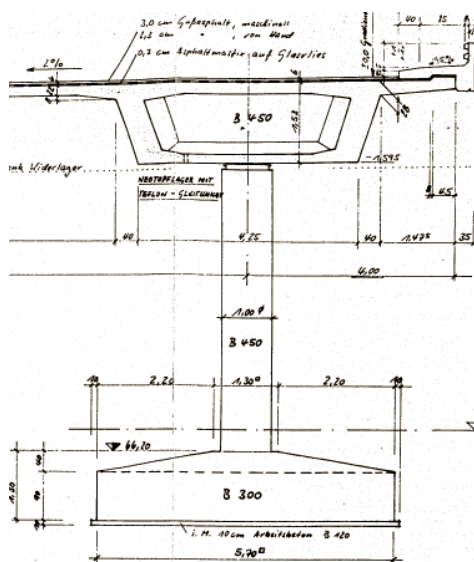


Bild 29: Konzeption der Stütze (Bauwerksplan)

¹ Die erste Nord Bezeichnung bezieht sich auf das Teilbauwerk Nord, die zweite auf die nördliche Stütze der Gruppe – Draufsicht der Brücke mit Richtungskennzeichen ist auf dem Bild 40 dargestellt

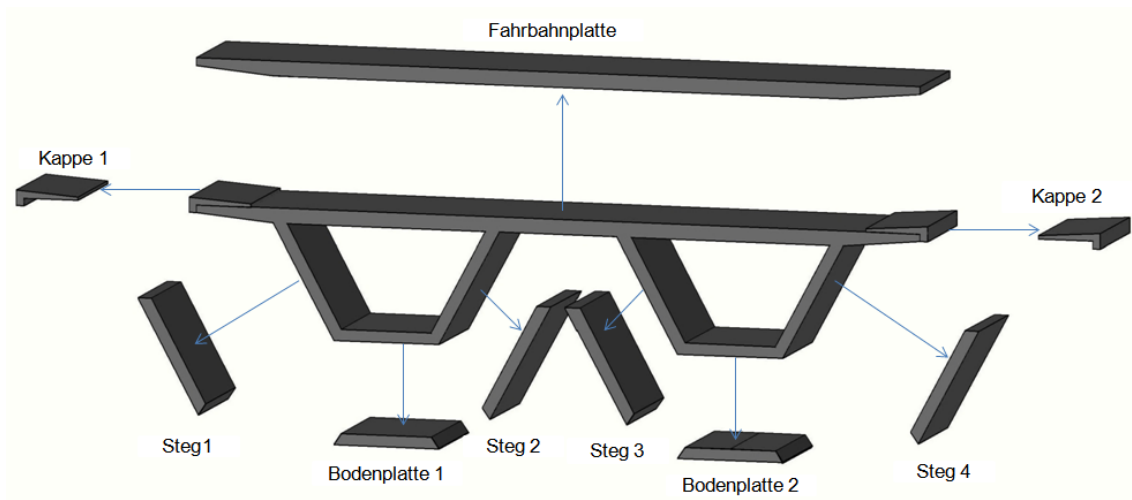


Bild 31: 3D Modell und Bauteilaufteilung des Doppelhohlkastenquerschnitts

4.1.3 Strukturmodell des Überbauquerschnitts

Der Überbauquerschnitt einer Brücke kann sehr verschieden ausgebildet sein, abhängig von der Bauwerkstruktur, dem statischen System, der Stützweite, der Belastung und der Umgebung. In dem vorgestellten Fall handelt es sich um einen Doppelhohlkastenquerschnitt (Bild 31 und Bild 32). Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projekts weitere Querschnittsvarianten wie z.B. Massivplatte, Plattenbalken oder Trogquerschnitt untersucht und ihre Struktur modelliert (siehe Anlagen).



Bild 32: Doppelhohlkastenquerschnitt der Beispielbrücke (Bauwerksbuch)

Für die Unterteilung des beschriebenen Querschnitts gibt es zwei Möglichkeiten: entweder wird der Gesamtquerschnitt zusammenhängend betrachtet und die Aufteilung erfolgt wie im Bild 31, oder der Doppelhohlkastenquerschnitt kann in zwei Einzelhohlkastenquerschnitte aufgeteilt werden und die Verbindung zwischen den Querschnitten muss durch eine zusätzliche Logische Verknüpfung modelliert werden (Bild 33).

In diesem Fall wurde sich für die Modellierung von zwei Einzelhohlkastenquerschnitten mit einer zusätzlichen Logischen Verknüpfung entschieden,

weil auf diese Weise eine spätere Modularisierungsmöglichkeit besser gegeben ist. In der Folge wird hier nur die Unterteilung eines Hohlkastenquerschnitts erläutert. Die wichtigsten Strukturelemente des Querschnitts sind die beiden Stege, die Fahrbahnplatte und die Bodenplatte (Bild 34).

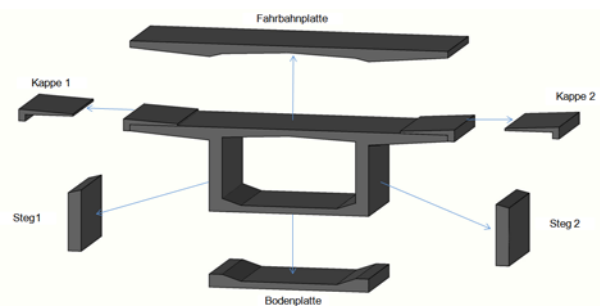


Bild 33: 3D-Modell und Bauteilaufteilung eines Hohlkastenquerschnitts (nach MÜLLER, VOGEL 2009)

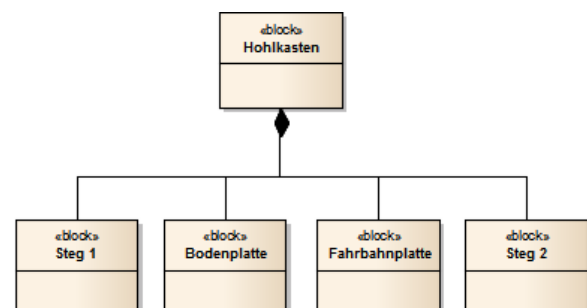


Bild 34: Strukturmodell des Hohlkastenquerschnitts

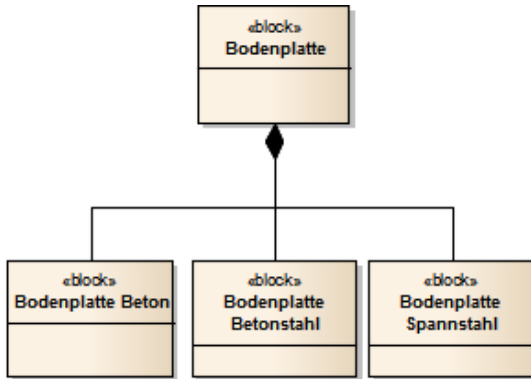


Bild 35: Strukturmodell der Bodenplatte

modelliert, darunter z.B. Quer- und Längsbewehrung, die Spannglieder und die Quervorspannung. Diese Elemente wurden als Verfeinerung dem entsprechenden Bauteil zugeordnet (Bild 35, Bild 36, Bild 37), wie z.B. die Spannglieder zu den zwei Stegen, oder die Quervorspannung zur Fahrbahnplatte.

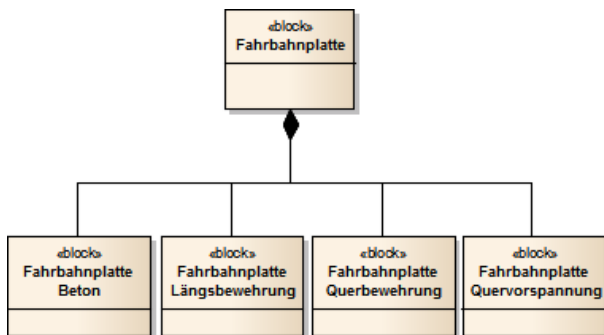


Bild 36: Strukturmodell der Fahrbahnplatte

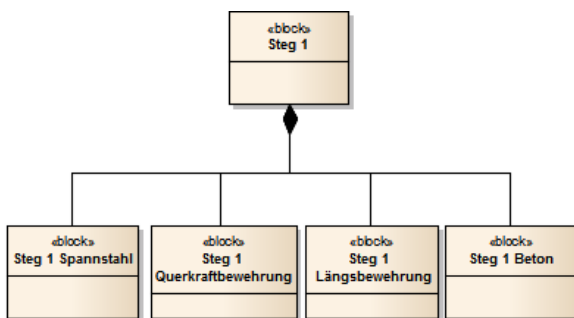


Bild 37: Strukturmodell des Stegs

Die Kappen wurden im Modell nicht betrachtet, da sie eine untergeordnete Rolle beim Lastabtrag einnehmen. Die Kappen spielen zwar eine wichtige Rolle bei der Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit, diese Aspekte werden jedoch im Rahmen des hier vorgenommenen Systemmodellentwurfs nicht betrachtet. Für die nächste Ebene der Unterteilung wird die innere Struktur dieser Elemente

4.1.4 Zusammenführung der Bauteile - Gesamtstrukturmodell

Um Schädigungs- und Wirkungsmechanismen abbilden und simulieren zu können, müssen die vorgestellten Bauteilstrukturmodelle in einem Gesamtmodell der Brücke zusammengeführt werden. Die Zusammenführung muss dem statischen Aufbau der Brücke und den Erläuterungen des Bauwerksbuchs bzw. bei neugebauten Brücken der Planung folgen. Zudem müssen weitere Bauteile, deren Modellierung noch nicht erläutert wurde (z.B. Auflager), ort- und bauteilspezifisch hinzugefügt werden.

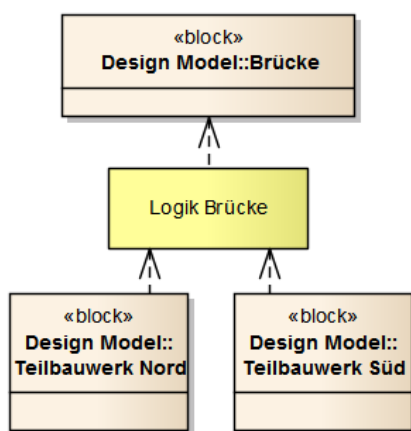


Bild 38: Aufteilung der Brücke

Das Gesamtmodell wird von oben nach unten (von grob zu fein) aufgebaut (siehe Abschnitt 2.2.2). Auf der höchsten Ebene der Struktur steht die Brücke als Gesamtbauwerk. Sie wird im Beispiel entsprechend dem Bauwerksbuch in ein nördliches und südliches Teilbauwerk aufgeteilt: Teilbauwerk Nord / Süd entsprechend Bild 38 und Bild 39.

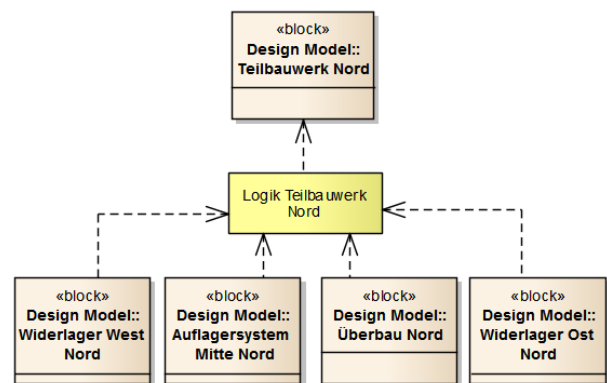


Bild 39: Aufteilung des Teilbauwerks Nord

Diese Aufteilung entspricht der Anordnung der zwei statisch unabhängigen Überbauten (Bild 40), aber führt zu einem Problem bei den Widerlagern. Zu beiden Überbauten gehört nur jeweils ein Widerlager an beiden Enden. Deswegen wurde die vorgestellte Struktur des Widerlagermodells (Abschnitt 4.1.1) verändert und in zwei Teilen aufgeteilt. Jedes Widerlager wird modelliert, als wäre es in der Mitte durchgeschnitten: der nördliche Teil wird mit der Flügelwand Nord verknüpft und der südliche Teil mit der Flügelwand Süd (Bild 41).

Der Unterbau in Feldmitte wurde analog zur Aufteilung des Widerlagermodells in zwei Gruppen aufgeteilt: die nördliche Gruppe enthält die zwei Stützen des nördlichen Teilbauwerks, die südliche Gruppe enthält die zwei Stützen des südlichen Teilbauwerks. Auf diese Weise wurde das Gesamtbauwerk in zwei separate nördliche und südliche Teilbauwerke aufgeteilt. Entsprechend gehört zum Teilbauwerk Nord das Widerlager West Nord, Überbau Nord, Auflagerungssystem Mitte Nord und Widerlager Ost Nord (Bild 39).

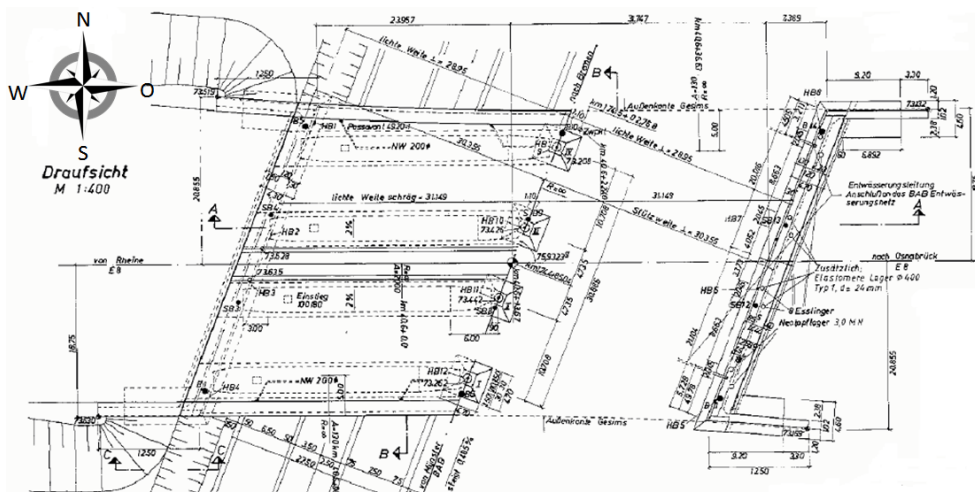


Bild 40: Draufsicht mit Richtungskennzeichen

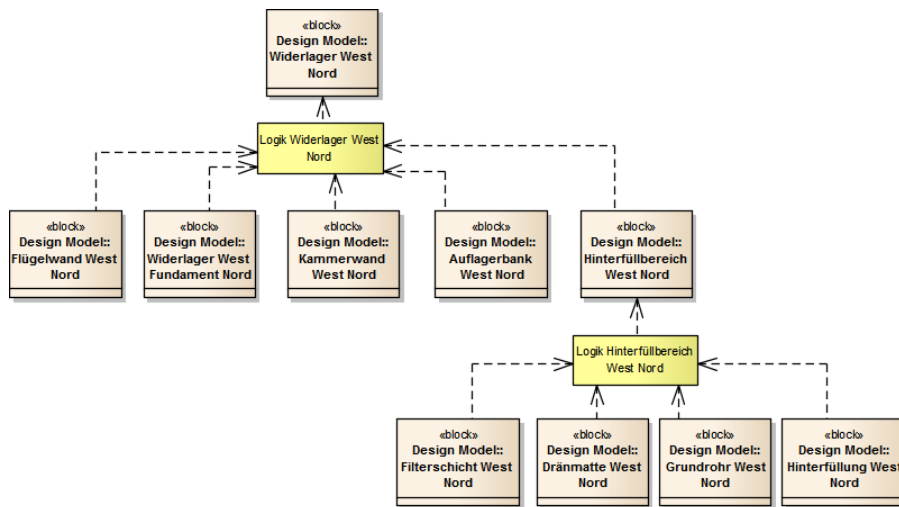


Bild 41: Aufteilung des westlichen Widerlagers Teil Nord

Um den Einfluss von Schäden weiterverfolgen zu können, werden diese Elemente durch eine Logische Verknüpfung mit dem Element Brücke verbunden. Diese Logische Verknüpfung ermittelt anhand des Zustands der Hauptbauteile in welchem Zustand sich die gesamte Brücke befindet. Ähnliche Logische Verknüpfungen wurden für alle tieferen Ebenen eingeführt. Sie ermitteln entweder einen stochastische Wert für die Wahrscheinlichkeit der Weiterentwicklung des Schadens oder aktivieren ein einfaches Ampelsystem, welche mithilfe der drei Ampelfarben Rot, Gelb und Grün den Zustand der einzelnen Elemente des Systemmodells beschreibt (Abschnitt 2.2.5).

Die weitere Unterteilung der Hauptbauteile entspricht der im vorherigen Abschnitt 4.1.3 vorgestellten Unterteilung.

Neben dem Überbau wurden noch weitere Bauteile abgebildet, die nicht zum Querschnitt gehören, jedoch eine Kraftübertragung bzw. Bewegungskopplung zwischen den Hauptbauteilen realisieren.

Diese Bauteile sind die Auflager und die Übergangskonstruktionen. Eine solche Unterteilung ist sinnvoll und notwendig, da die Schädigung dieser Elemente eine größere Auswirkung auf den Überbau hat als auf den Unterbau. Nach der Aufteilung der Überbauten in einen nördlichen und südlichen Überbau werden diese auf der nächsten Ebene in einen westlichen und östlichen Überbauteil weiter unterteilt und die Lager und Übergangskonstruktionen hinzugefügt (Bild 42). Um eine feinere Abbildung der Schadensmechanismen zu ermöglichen und den Einfluss eines Schadens unter Berücksichtigung seiner Lokalität und des statischen System zu beurteilen, werden die Überbauten in Längsrichtung unterteilt. Diese Aufteilung in Längsrichtung kann so fein vorgenommen werden, wie es erwünscht bzw. erforderlich ist. Im hier gezeigten Beispiel wurde jedes Überbauteil in drei Zonen aufgeteilt: zwei Stützenbereiche und ein Bereich in der Feldmitte. Alle diese drei Strukturelemente haben die im Abschnitt 4.1.3 vorgestellte Struktur (Bild 43).

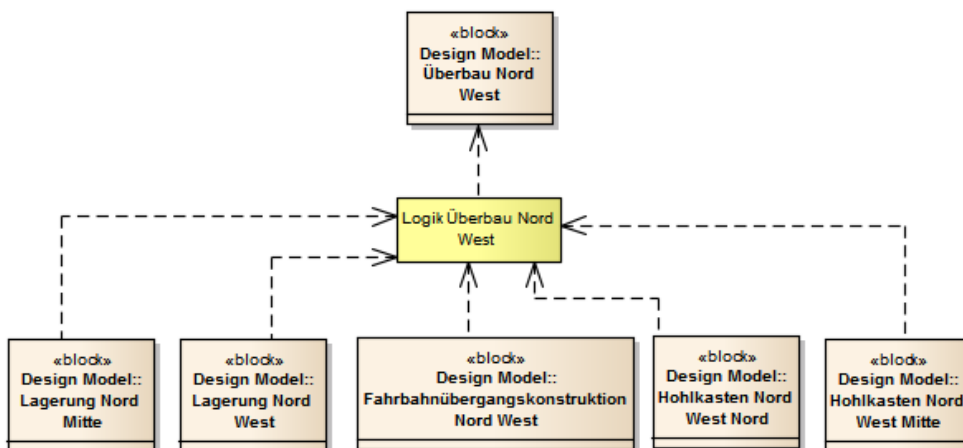


Bild 42: Aufteilung des Überbaus Nord West

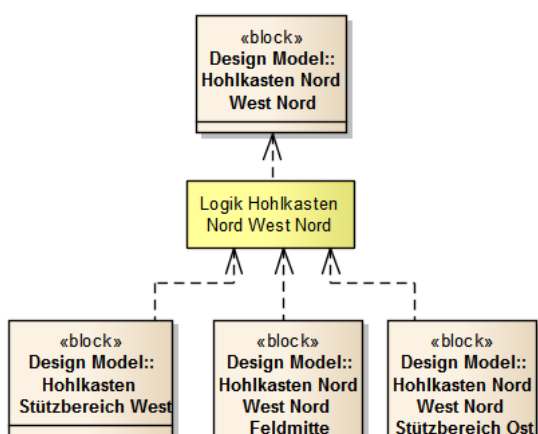


Bild 43: Aufteilung des Überbaus in Längsrichtung

Der Einfluss des statischen Systems auf das Verhalten der Überbauten (Bild 44) wird durch Einfügen einer übergeordneten Logischen Verknüpfung realisiert. Diese Logische Verknüpfung berücksichtigt, ob es sich beim Überbau beispielsweise um einen Einfeldträger oder um einen Durchlaufträger handelt und ermittelt entsprechend die Ampelfarben bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten für das darüber liegende Überbau-Element (Bild 45).

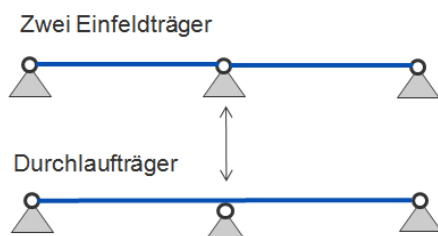


Bild 44: Verschiedene statische Systeme

Nach dem Aufbau des Gesamtstrukturmodells werden im nächsten Schritt die möglichen Schädigungen verschiedener Bauteile abgebildet und mit Strukturkomponenten verbunden.

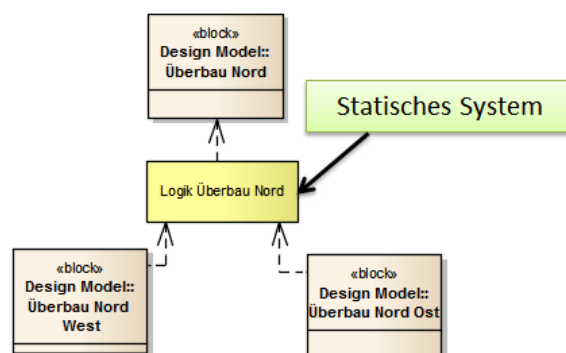


Bild 45: Einbau von dem statischen System in die Logik

4.1.5 Strukturmodell der Schadensbilder

Basierend auf der Literaturrecherche im Projektteil 1 und das Bauwerksbuch der Brücke A1/A30 "AK Lotte-Osnabrück" wurden Schädigungen als Parameterdiagramme abgebildet und können mit Bauteilen durch eine Logische Verknüpfung verbunden werden. Ein Bauteil kann mehrere Schädigungsbilder aufweisen, aber ein Schädigungsbild gehört immer nur zu genau einem Bauteil. Wenn eine Schädigung, z.B. Korrosion, mit mehreren Bauteilen verbunden wird, müssen die Schadensbilder mit einem Kennzeichen versehen werden, mit dem sie eindeutig einem Bauteil zugeordnet werden können.

Bei der Zusammenstellung des Gesamtstrukturmodells der Schadensbilder wurde untersucht, welche Schädigungen bei der Beispiel-Brücke aufgetreten sind (z.B. ausgequollenes Elastomer des Kippteils an mehreren Lagern, Abplatzungen an Fahrbahnplatte, freiliegende Bewehrung an der Bodenplatte und Fahrbahnplatte, Risse an der Fahrbahnplatte) und diese wurden entsprechend in das Gesamtmodell integriert. Als Erweiterung des Modells wurden weitere Schadensbilder für Beton, Bewehrung und Spannstahl abgebildet, basierend auf den Darstellungen des ersten Zwischenberichts (Seite 20-29). Die abgebildeten Schädigungen wurden ähnlich zur vorgestellten Bauwerksstruktur mithilfe des „Levels-of-Detail“ Ansatzes kategorisiert; z.B. gehört zur Schadenskategorie Korrosion die karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion, die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion und die wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion (Bild 46).

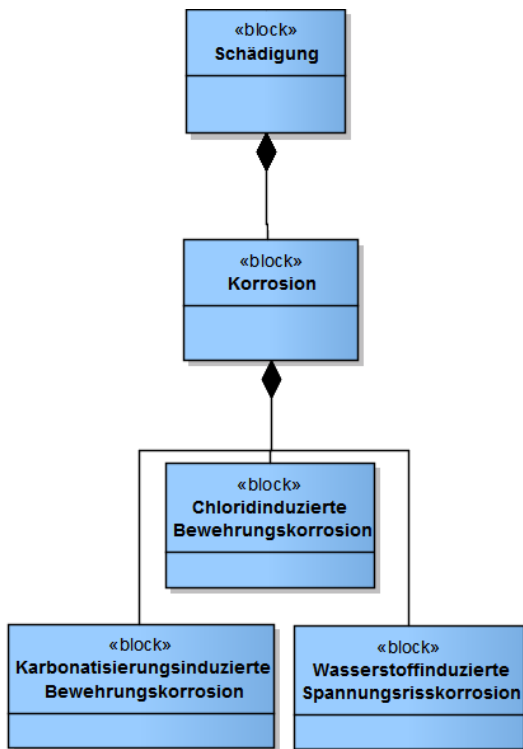


Bild 46: Schadensbild: Korrosion

Eine andere Bedeutung der Untergliederung liegt darin, dass die untergeordnete Schädigung die übergeordnete Schädigung verursachen kann. Beispielsweise führen Ermüdung und Überlastung des Spannstahls zum Bruch des Spannstahls; damit sind Ermüdung und Überlastung dem Bruch untergeordnet (Bild 47).

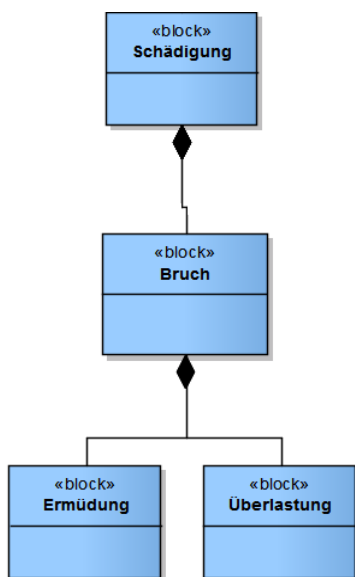


Bild 47: Schadensbild: Bruch

Die gesamte Struktur der vordefinierten Schäden befindet sich im Anhang, alle Schadensbilder im Modell sind mit der Farbe Blau dargestellt.

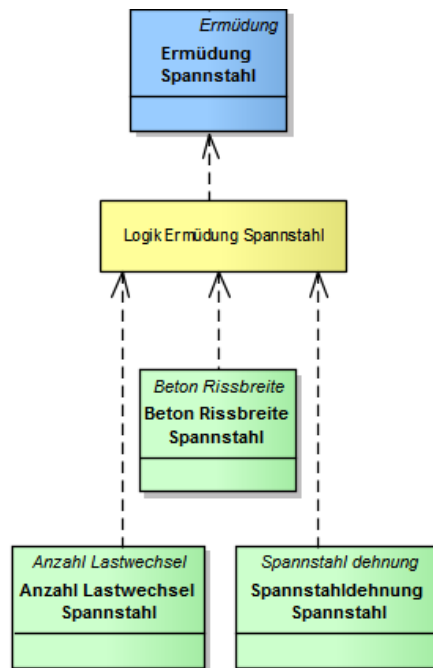


Bild 48: Messbare Werte für die Schädigung Spannstahlermüdung

4.2 Parameter

Die letzte wichtige Komponente des Einflussbaumes sind die Parameter oder Messwerte (Abschnitt 2.2.4). Sie sind in dem Diagramm mit grüner Farbe gekennzeichnet. Parameter gehören zum Schaden, der immer zu einem Bauteil zugeordnet ist. Damit ist auch bekannt, wo sich der Sensor, der für den Messwert verantwortlich ist, befindet. Die Messwerte werden durch eine Logische Verknüpfung mit dem Schadensbild verbunden. Diese ermittelt durch entsprechende Auswertung der Parameterwerte, welchen Zustand die Schädigung erreicht hat.

Bild 48 zeigt als Beispiel hierfür die Ermüdung des Spannstahls. Zur Ermüdung des Spannstahls gehört eine Logische Verknüpfung, die ermittelt, in welchem Zustand sich der Spannstahl befindet. Um den Zustand zu bestimmen, braucht die Logische Verknüpfung drei Messwerte: die Rissbreite des Betons am Spannstahl, die Anzahl der Lastwechsel und die gemessene Dehnung des Spannstahls. Wenn diese Messwerte durch einen Sensor ermittelt werden, kann der Zustand des Spannstahls automatisch ermittelt werden. Analog werden zur Bestimmung des Zustands der Verankerung des Spannstahls im Stützbereich ebenfalls drei Parameter benötigt: die Dehnung des Spannstahls an der Verankerung, die Rissbreite des Betons an der Verankerung und die relative Ver-

schiebung zwischen dem Spannglied und dem Beton (Bild 49).

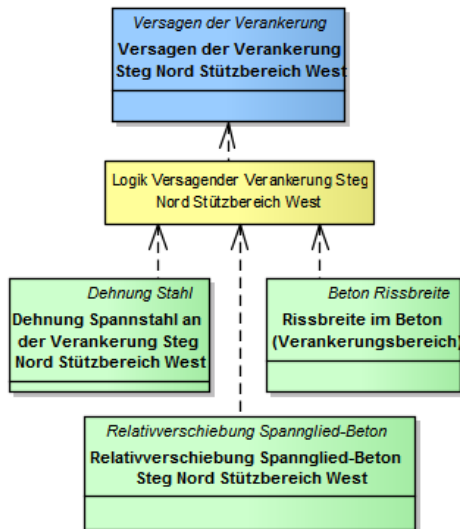


Bild 49: Messbare Werte für die Schädigung: Versagen der Verankerung des Spannstahls

4.3 Logische Verknüpfungen

Die Funktionalität und Umsetzung einer einfachen Logischen Verknüpfung mithilfe von SysML zeigt das Bild 50. Der Parameter 1 verweist auf den Messwert „Alpha“. Dieser Wert wird mithilfe eines Sensors ermittelt und durch den Port „Alpha“ und Verbindung mit der Logischen Verknüpfung eingelesen. Anschließend wird mithilfe der angegebenen Bedingungen eine Farbe für die Ampel der übergeordneten Schädigung ermittelt. Die ermittelte Farbe wird an den Port „Ampelfarbe“ für die Schädigung weitergeleitet und dort entsprechend visualisiert.

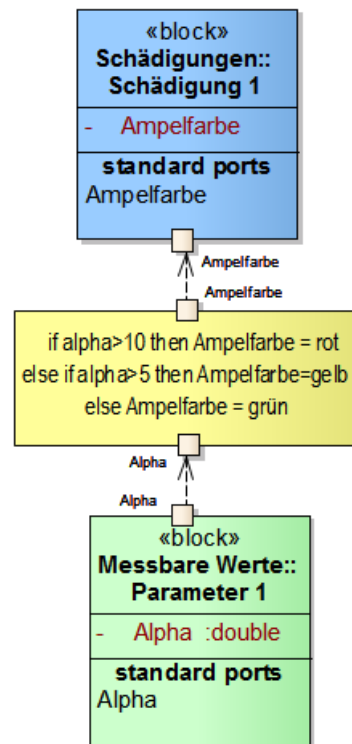


Bild 50: Umsetzung einer Logischen Verknüpfung mit SysML

Hierbei handelt es sich wohlgerne um ein sehr einfaches Beispiel zur Anwendung der Logischen Verknüpfung. Komplexere Verknüpfungen sind möglich und werden weiter unten besprochen.

In den vorgestellten SysML-Diagrammen werden die Logischen Verknüpfungen nur mit Name und Verbindungspfeil gekennzeichnet, die Ports werden in allen Fällen ausgeblendet.

4.4 Einflussbaum

Um anhand der Messwerte bzw. Parameter ermitteln zu können, in welchem Zustand sich ein Bauteil bzw. die gesamte Brücke befindet, muss zunächst aus den vier vorgestellten Elementen (Struktur, Schadensbild, Messwert und Logische Verknüpfung) ein Einflussbaum aufgebaut werden. Hierfür erfolgt zunächst eine Bauteilstrukturmodellierung. Alle Bauteile bzw. Bauteilabschnitte, die an der untersten Ebene der Struktur angeordnet sind, werden mit Schadensbildern verbunden (Abschnitt 2.2.3). Zu den Schadensbildern gehören vordefinierte Messwerte, deren Größe durch den Einsatz von Sensorik ermittelt werden können. Zwischen allen Ebenen werden Logische Verknüpfungen definiert, die die Fortpflanzung einer Schädigung entlang des Einflussbaums beschreiben und damit eine Zustandsbewertung der gesamten Brücke auf Basis der erhobenen Messwerte ermöglichen. Der für die Brücke AK Lotte-Osnabrück 3713766 vollständig entwickelte Einflussbaum ist in der Anlage enthalten.

4.5 Schadensbeispiele

Anhand des Einflussbaumes der gesamten Brücke können Schadensabläufe simuliert werden. Dafür wird in diesem Abschnitt ein Beispiel vorgestellt. Es beschreibt die Senkung eines Stützenfundaments.

Der Ablauf einer Simulation erfolgt innerhalb des Einflussbaums von unten nach oben (Abschnitt 2.2.6). Dabei werden die Eingangswerte der Parameter ständig überprüft und aktualisiert. Diese Werte werden durch die Ports und Verbindungen für die übergeordnete Logische Verknüpfung ermittelt, die überprüft, ob alle Werte unter der vordefinierten Warnungsgrenze liegen. Ist dies der Fall, werden die Ampeln der übergeordneten Schäden auf Grün gestellt. Falls ein Wert den Grenzwert überschritten hat, stellt die Logik, abhängig vom Unterschied zwischen dem Grenzwert und dem gemessenen Wert, die Ampel entweder auf gelb oder rot. Falls eine Ampel nicht mehr die grüne Farbe anzeigt, werden die weiteren Ebenen des Einflussbaums und damit die nächste Logische Verknüpfung aktiviert. Diese Verknüpfung verwendet wiederum die verschiedenen Ampelfarben und Messwerte der untergeordneten Elemente (durch Ports und Verbindungslinien) und ermittelt

daraus die Farbe der Ampel des übergeordneten Elements. Dieser Vorgang erfolgt solange, bis die übergeordnete Ampel wieder grün anzeigt oder das Wurzelement des Diagramms (das den Gesamtzustand der Brücke repräsentiert) erreicht ist.

4.5.1 Senkung einer Stütze

Das Beispiel für den Einsatz des Einflussbaums ist die Senkung einer Stütze. Dabei wurde der Messwert „Setzung Fundament Stütze Süd Süd“ (die südlichste Stütze) so beeinflusst, dass er den vordefinierten Messwert überschritten hat. Der gemessene Wert wird an die übergeordnete Logik gesendet, die die Ampel des Schadenselements „Stützenfundamentsetzung Süd Süd“ auf gelb stellt, und signalisiert damit eine Warnung für das System (Bild 51).

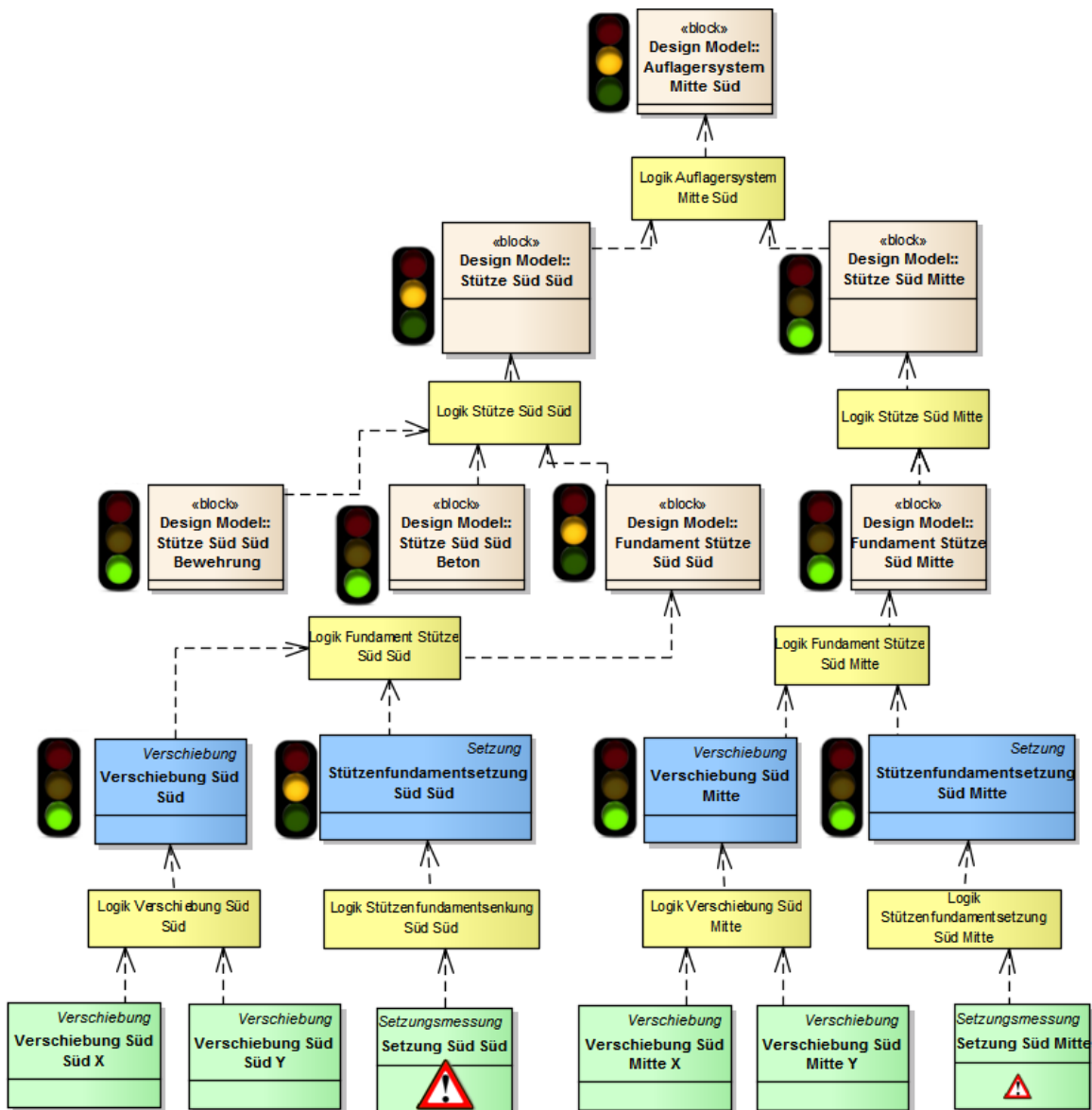


Bild 51: Schadensbeispiel Teil 1: Stützensenkung

Die Setzung einer anderen Stütze (Süd Mitte) ist auch messbar geworden (kleine Warnungszeichen bei dem Messwert), aber hat den Grenzwert für eine Warnung noch nicht überschritten, deswegen zeigt die Logik bei der Stützenfundamentsetzung Süd Mitte noch grün. Alle anderen Messwerte sind unterhalb der Grenzwerte, deswegen zeigen die Ampeln der anderen Schadensbilder grün. Wenn eine Ampel nicht mehr die grüne Farbe anzeigt, werden die weiteren Logikebenen schrittweise aktiviert. Die nächste Logik (Logik Fundament Stütze Süd Süd) überprüft die Parameter und Ampelfarben der untergeordneten Elemente: „Stützenfundamentsetzung Süd Süd“ und „Verschiebung Süd Süd“. Nach der Prüfung ermittelt sie, dass eine Änderung, die eine Gefahr anzeigt, in den Parametern stattgefunden hat und stellt die

Farbe der Ampel „Stützenfundament Süd Süd“ auf gelb. Weil die Fundamentsetzung eine gefährliche Schädigung ist, pflanzt sich die gelbe Warnung schrittweise von der Schädigung durch Stützenfundament, Stütze bis zum Hauptbauteil (Auflagersystem Mitte Süd) fort. Als nächster Schritt wird aufgrund der Farbänderung des Auflagersystems „Mitte Süd“ die Logik des Teilbauwerks Süd aktiviert.

Um den Einfluss auf den Ablauf von Schäden verschiedener statischer Systeme zu zeigen, wurde auf dem Element Teilbauwerk Süd zwei Ampeln eingeführt (Bild 52). Auf der linken Seite für ein Einfeldträgersystem, wo theoretisch eine Stützensenkung nur einen kleineren Schaden verursacht. Deswegen zeigt nach der Berechnung der Versa-

genswahrscheinlichkeit des kompletten südlichen Teilbauwerks die Ampel wieder grün. Im Gegensatz dazu wird auf der rechten Seite beim Durchlaufträgersystem, welches empfindlicher auf Stützensenkungen reagiert, von der Logischen Ver-

knüpfung die Ampelfarbe Gelb generiert. Da ein Ausfall des südlichen Teilbauwerks für das gesamte Bauwerk gefährlich ist, pflanzt sich diese gelbe Ampelfarbe bis zum obersten Knoten weiter fort.

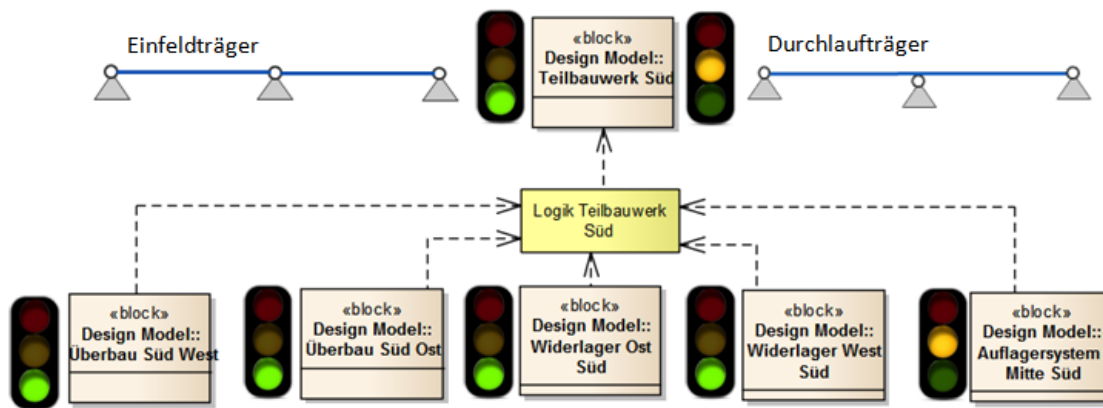


Bild 52: Schadensbeispiel Teil 2: Stützensenkung

Erkennt ein Nutzer, dass die Ampel des Wurzelements auf gelb steht, kann er mithilfe des Modells und des Ampelsystems verfolgen, aus welchen Gründen diese Warnung angezeigt wird. In diesem Fall lautet der Pfad: Brücke → Teilbauwerk Süd → Auflagersystem Mitte Süd → Stütze Süd Süd → Fundament Stütze Süd Süd → Fundamentsetzung. Mithilfe des Einflussbaumes kann identifiziert werden, dass die südliche Stütze des Bauwerks eine größere Setzung als zulässig aufweist und damit die gesamte Brücke in einem kritischen Zustand ist.

4.6 Modularisierung

Für jedes Brückenbauwerk ist ein spezifisches Systemmodell notwendig. Um den Aufbau von Systemmodellen für einzelne Brücken zu erleichtern und zu beschleunigen, wurden Möglichkeiten zur Modularisierung des Modells untersucht. Die Modularisierung ist hilfreich für die Benutzer, damit sie komplett fertiggestellte Strukturteile in das Gesamtmodell einfügen können und nicht alle Details selbst definieren müssen. Zunächst wurde das Modell von unten nach oben untersucht und dabei häufig auftretende Komponenten identifiziert. In diesem Zuge wurden die Schadensbilder mit den zugehörigen Parametern als geeignete Kandidaten erkannt und im Folgenden alle Schadensbilder als Module definiert (Bild 53). Eine Ebene höher findet sich in den meisten Fällen entweder ein Beton-,

Bewehrungs- oder Spannstahlelement. Zu diesen Elementen gehören häufig die gleichen Schadensbilder, deswegen wurden sie ebenfalls als Module definiert. Bei der Erzeugung dieser Elemente werden die zugehörigen Schadensbilder und Messwerte automatisch generiert und mit dem Element verknüpft.

Die nächsten Module sind Überbauquerschnitte und ihre Unterelemente (z.B. Hohlkastenquerschnitt). Bei diesen Modulen wurden jedoch die Spannstähle nicht ins Modul integriert, da sie an verschiedenen Orten des Querschnitts auftreten können (Steg, Bodenplatte). Sie müssen daher manuell zugeordnet werden. Da Spannstahl selbst als ein Modul definiert wurde, kann diese Zuordnung in wenigen Schritten erfolgen. Weitere Module werden von der Struktur des Widerlagers, einer Stütze oder eines Pfeilers gebildet.

Eine andere Modularisierungsmöglichkeit liegt darin, horizontale Gruppen zu bilden. Dabei kann beispielsweise bestimmt werden, welche Struktur die Brücke hat oder wie viele Stützen ein Auflagerungssystem bilden. Beispielsweise wird eine Brücke, die aus drei Feldern besteht, als Modul aus zwei Widerlager-, drei Überbau- und zwei Auflagerungssystemelemente vordefiniert. Zusätzlich kann festgelegt werden, dass das Auflagerungssystem aus vier Stützen besteht. Das Systemmodell wird anschließend entsprechend dieser Vorgaben erzeugt.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der benutzerdefinierten Modularisierung, welche eine Kombination von den vorherigen Methoden darstellt. Dabei kann frei definiert werden, welche ausgewählten Elemente als Modul definiert werden. Diese Module können in der Folge beliebig oft in das Modell eingefügt werden. Beispielsweise bietet sich an, den Überbau der Brücke zusammen mit Spannstahl und Quervorspannung als ein Modul definieren und dieses entsprechend oft in das Gesamtmodell einfügen.

Hinsichtlich der Modularisierung ist es wichtig zu erwähnen, dass die Namen der Bauteile generali-

siert werden müssen. Das heißt, dass die Namen der Bauteile nicht mehr nach Himmelsrichtungen geordnet werden, sondern z.B. nach Stationierungsrichtung oder nach definierten Orten. So wird z.B. von Hohlkasten Steg Nord, entsprechend Hohlkasten Steg Richtung Stadt „A“.

Durch den Einsatz von Modulen wird das Erstellen eines Einflussbaums deutlich beschleunigt. Wie ein Querschnittmodul benutzt werden kann, um ein Längsträger aufzubauen und welche Einschränkungen man dabei beachten muss, wird im Kapitel 5.6.2 detailliert diskutiert.

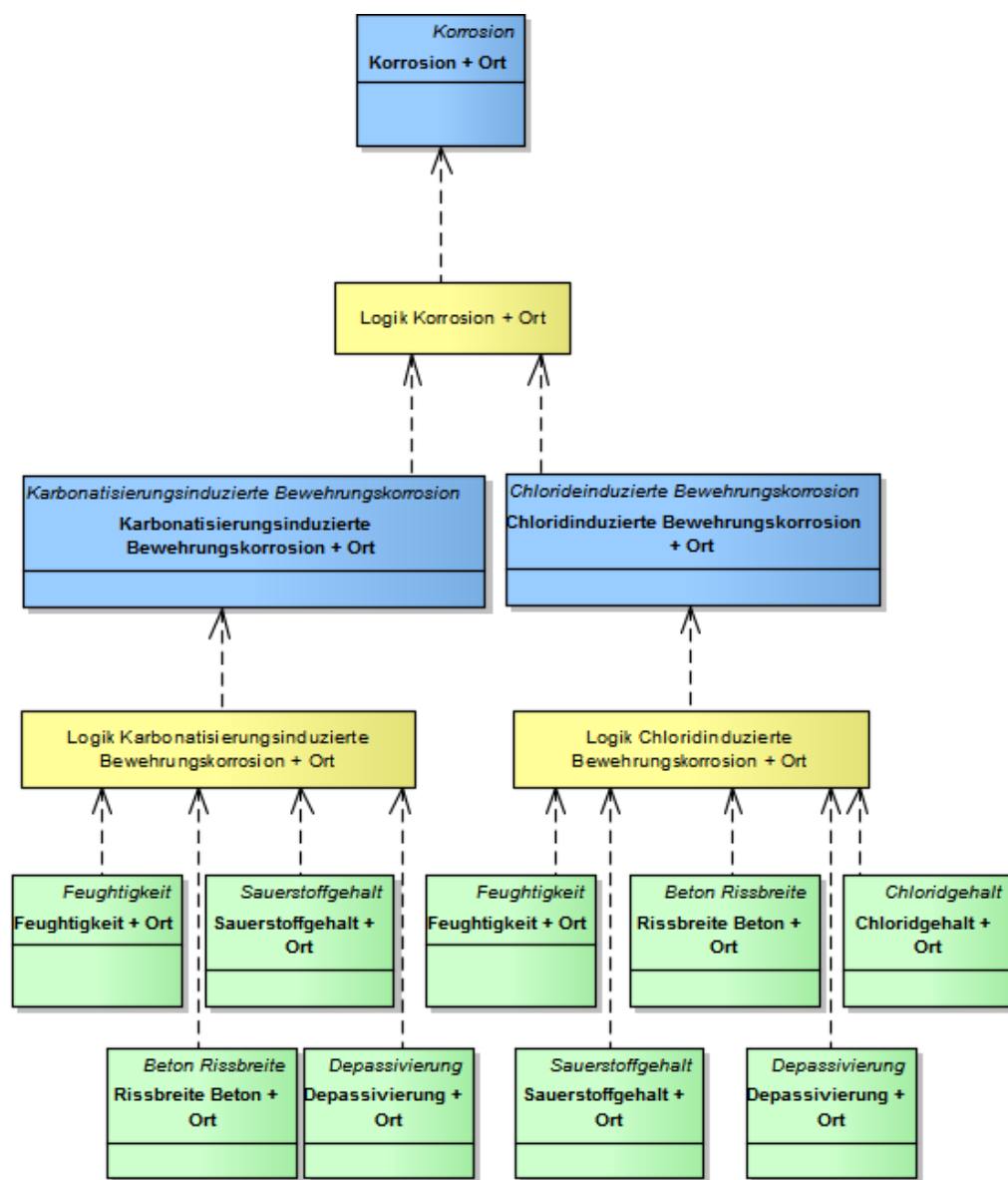


Bild 53: Modul Bewehrungskorrosion

5 Aufbau und Simulation eines Einflussbaums für ein einfaches Brückenbauwerk (Einfeldträger)

5.1 Allgemeine Angaben

Im Rahmen eines Simulationsbeispiels wird in diesem Kapitel die Funktion eines Einflussbaumes erläutert. Zur vereinfachten Nachvollziehbarkeit wird ein statisch bestimmt gelagerter Einfeldträger gewählt. Die Belastung des gewählten Rechteckquerschnittes aus Stahlbeton erfolgt durch eine konstante Linienlast mit einem Bemessungswert von $q_d = 12 \text{ kN/m}$ (Bild 54).

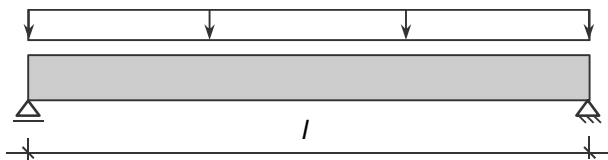


Bild 54: Beispiel: Einfeldträger

5.2 Schädigungsmechanismen

Als tragfähigkeitsrelevanter Schaden für das gewählte Stahlbetonbauteil liegt der Fokus in diesem Beispiel auf der karbonatisierungsinduzierten und der chloridinduzierten Korrosion der Längszugbewehrung. Diese beiden Schädigungsmechanismen machen mit einem Anteil von ca. 71 % nach (SCHIESSL; MAYER 2007) einen Großteil der Ursachen für Schäden an Brückenbauwerken im deutschen Autobahnnetz aus und stellen somit ein charakteristisches Schadensbild dar. Im Folgenden wird kurz der theoretische Hintergrund der im Beispiel betrachteten Schädigungsmechanismen erläutert.

5.2.1 Karbonatisierung

Die Hydratation der Calciumsilikate lässt im Porenwasser des Betons gelöstes Calciumhydroxid (Ca(OH)_2) entstehen. Im vorherrschenden alkalischen Milieu stellt sich ein pH-Wert von ca. 12,6 ein. Eine Grundvoraussetzung des Korrosionsprozesses, die anodische Eisenauflösung, wird dadurch unterbunden und somit die Korrosion der Bewehrung verhindert. Aus der Luft kann Kohlenstoffdioxid (CO_2) über nicht wassergesättigte Poren in den Zementstein diffundieren. Eine chemi-

sche Reaktion des CO_2 mit Ca(OH)_2 lässt Calciumkarbonat (CaCO_3) entstehen. Dieser Vorgang lässt den pH-Wert auf unter 9 sinken und wird als Karbonatisierung des Betons bezeichnet. Die erfolgte Depassivierung ermöglicht die Korrosion der Bewehrung. (SCHIESSL 1976)

5.2.2 Eindringen von Chloriden

Aus der Anwendung von Tausalzen, aus dem Meerwasser oder aus der Luft (Seeluft, PVC-Brand) können Chloride in den Beton eindringen. Baupraktische Relevanz haben hierbei: Natriumchlorid (NaCl), Calciumchlorid (CaCl_2) und Magnesiumchlorid (MgCl_2). Das Eindringen dieser negativ geladenen Salzionen erfolgt über Diffusionsprozesse in wassergefüllten Poren und kapillares Saugen (VOLKWEIN 1991). Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion wird häufig durch lokales Vordringen von Chloriden an die Oberfläche der Bewehrung hervorgerufen und führt somit zur Ausbildung kleiner anodischer Bereiche und großer kathodischer Bereiche. Die dadurch entstehenden Makrokorrosionselemente führen zur sogenannten Lochfraßkorrosion.

5.2.3 Bewehrungskorrosion

Die Bewehrungskorrosion stellt im Stahl- und Spannbetonbau einen bedeutsamen Schaden dar, welcher sich langfristig direkt auf die Standsicherheit auswirken kann, (SCHIEßL; MAYER 2007), Sie tritt nach Auflösung der Passivschicht an der Bewehrungsoberfläche ein, welche durch die Alkalität des Betons ($\text{pH} \geq 12,5$) gewährleistet wird, durch Karbonatisierung bzw. Eindringen von Chloriden. Der Vorgang der Korrosion kann in den anodischen Teilprozess der Eisenauflösung und den kathodischen Teilprozess, bei welchem die freigesetzten Elektronen mit Wasser und Sauerstoff zu Hydroxidionen reagieren, unterteilt werden. Eine schematische Darstellung des Korrosionsmechanismus von Stahl in Beton mit den zugehörigen chemischen Reaktionsgleichungen für die Oxidation und die Reduktion ist in Bild 55 in Anlehnung an (SCHIEßL 1986) gegeben:

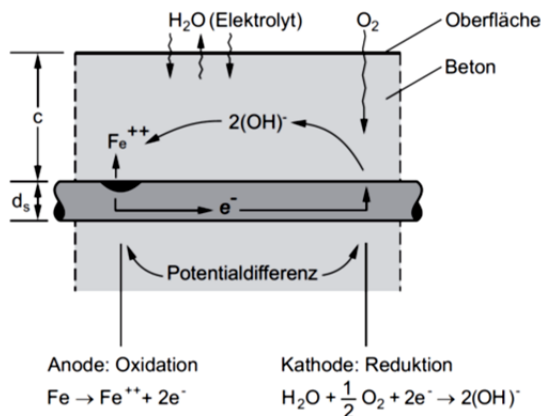


Bild 55: Korrosionsmechanismus von Stahl in Beton (ZILCH; ZEHETMAIER 2010)

Der anodische Teilprozess im Beton läuft erst nach der Depassivierung des Betons an der Bewehrung durch Karbonatisierung oder durch Erreichen des kritischen Chloridgehalts ab. Die Oxidation des Eisens ist mit einer Volumenzunahme um das zwei- bis sechsfache des Eisens verbunden (BROOMFIELD 2003). Es bildet sich Rost, zum Beispiel in Form von Eisen(II)-oxid (Fe_2O_3). Die Korrosion von Metallen unterliegt fünf Voraussetzungen (in Anlehnung an SCHIEßL 1986):

elektrische Leitfähigkeit von Metall muss gegeben sein

anodische Eisenauflösung muss möglich sein

ein Elektrolyt in Kontakt mit dem Metall muss vorhanden sein

zwischen Anode und Kathode muss eine Potentialdifferenz vorhanden sein

Vorhandensein von Sauerstoff im Elektrolyten

Die Korrosionsprozesse sind je nach örtlicher Lage der Anode und Kathode zueinander zu unterscheiden. Sind Anode und Kathode örtlich nicht getrennt, verläuft die Korrosion ebenmäßig und flächig; man spricht von Mikrokorrosionselementen. Dieser gleichmäßige Abtrag ist ein Indikator für karbonatisierungsinduzierte Korrosion. Sogenannte Lochfraßkorrosion entsteht durch die Ausbildung von Makrokorrosionselementen. Durch lokales Vordringen von Chloriden an die Stahloberfläche bilden sich eine örtlich getrennte Anode und Kathode aus. Ein verursachter massiver Querschnittsverlust der Bewehrung an der Anode ist an der Bauteiloberfläche kaum sichtbar und kann somit im Rahmen der Bauwerksprüfung unent-

deckt bleiben. Ein entstehender Schaden kann sich vergrößern, ohne detektiert zu werden.

Der zeitliche Verlauf des Korrosionsprozesses wird nach (TUUTTI 1982) in die Einleitungs- und Schädigungsphase unterteilt (vgl. Bild 56).

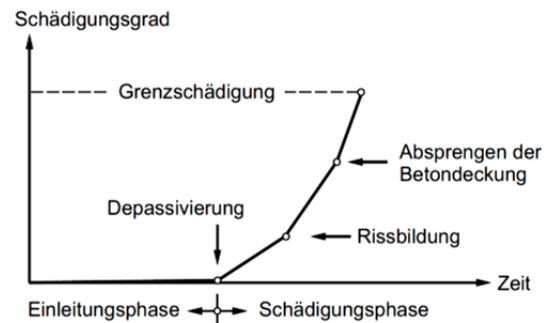


Bild 56: Zeitlicher Verlauf des Korrosionsprozesses

Einsetzende Korrosion führt in erster Linie zu einem Querschnittsverlust der Bewehrung, welcher ab der Schädigungsphase beginnt. Die einhergehende Volumenzunahme zieht Risse und Abplatzungen der Betondeckung nach sich. Die Duktilität, sowie die Zug- und Dauerschwingfestigkeit der Bewehrung sinken und der Verbund zwischen Betonstahl und Beton wird durch fortschreitende Korrosion vermindert.

Die Haupteinflussfaktoren auf die Bewehrungskorrosion und deren Randbedingungen lassen sich auch direkt aus Bild 56 ableiten. Der Übergang von Einleitungs- zu Schädigungsphase wird durch den Zeitpunkt der Depassivierung definiert. Dieser Punkt wird durch Fortschreiten der Karbonatisierungsfront zur Bewehrung bzw. durch Überschreiten des korrosionsauslösenden Chloridgehaltes erreicht. Somit wird die erste Phase stark durch den Eindringwiderstand bzw. die Dicke der Betondeckung beeinflusst. Wie bereits im Rahmen der weiteren Schädigungsprozesse erläutert, spielt der Zustand der Betonoberfläche bzw. -deckung hierbei auch eine entscheidende Rolle. Zudem wirkt sich eine Erhöhung der Rissbreite auf den zeitlichen Verlauf des Schädigungsgrades beschleunigend aus (SCHIEßL 1986). Im Bereich der Schädigungsphase in Bild 56 zeigt sich die Interaktion zwischen fortschreitender Korrosion der Bewehrung mit eingehendem Querschnittsverlust und der Ausbildung von Rissen bzw. dem Absprennen der Betondeckung. Weitere wichtige Einflussfaktoren auf den Korrosionsprozess können direkt aus den genannten Voraussetzungen für die Korrosion von Metallen abgeleitet werden. In Schädigungsmodellen wird der Querschnittsverlust in Abhängigkeit der Zeit durch Abrostungsraten ermittelt. Die Ein-

gangparameter in verschiedene Modelle aus der Literatur sind z.B. die Betondeckung und Chloridkonzentration (NOVAK et al. 2002), die Expositions-klassen (DURACRETE 1998) oder definierte Feuchtigkeitszustände (SARJA; VESIKARI 1996).

Im behandelten Beispiel wird das Modell nach (NOVAK et al. 2002) verwendet, um den Einfluss verschiedener Eingangsparameter auf den Zustand der einzelnen Elemente des Einflussbaums darzustellen.

5.3 Zielsetzung

Anhand dieses Simulationsbeispiels wird aufgezeigt, wie die verschiedenen Ebenen (Struktur-, Schadens- und Paramterebene) eines Einflussbaumes aufgebaut und miteinander über Verknüpfungselemente logisch gekoppelt werden. Die logischen Verknüpfungselemente geben an die jeweils zugeordneten Parameter-, Schadens- und Strukturelemente den entsprechenden Zustand weiter. Neben einer Zustandsbewertung des Gesamtbauwerkes ermöglicht der gewählte Modellierungsansatz somit die Identifikation der einzelnen Elemente innerhalb der drei Ebenen des Einflussbaumes, welche eine Veränderung im Zustand des Gesamtbauwerkes hervorrufen.

Neben der Rückverfolgung von tatsächlichen Zustandsänderungen, die z.B. über eingehende Messwerte im Modell registriert und weiterverarbeitet werden, ermöglicht der Einflussbaum auch eine Analyse zur Sensorplatzierung. Anhand eines erstellten Einflussbaumes kann mittels Variation einzelner Parameter deren Einfluss auf einzelne Elemente bzw. die Gesamtstruktur ermittelt werden. Aus einer simulierten Verfügbarkeit des betrachteten Messensors an allen Elementen, kann somit am Modell analysiert werden, an welchen Elementen der betrachtete Messparameter einen signifikanten Einfluss auf den Zustand hat. Am realen Bauwerk sind an diesen Stellen Sensoren zu applizieren.

Die Modularität des Einflussbaumes ermöglicht ein Übertragen dieses Beispiels – im Hinblick auf die gewählte Abbildung der Schädigungsprozesse und hinsichtlich des prinzipiellen Vorgehens – auf komplexere Strukturen. Bausteine dieses Beispiels, sogenannte Module, können direkt in weitere komplexe Anwendungsbeispiele implementiert werden.

5.4 Aufbau des Einflussbaumes

5.4.1 Strukturebene

Die oberste Ebene eines Einflussbaumes stellt die Strukturebene dar (Bild 57). Als übergeordnetes Element steht hierbei jeweils das gesamte Bauwerk. Im betrachteten Beispiel eines Einfeldträgers untergliedert sich das Bauwerk in die drei untergeordneten Strukturelemente der beiden Auflagersysteme und des Längsträgers mit einer Länge von 7,40 m. Der Zustand der Auflagersysteme wird in der weiteren Betrachtung des Beispiels unveränderlich als unkritisch definiert und nicht weiter behandelt. Die Festlegung des behandelten Schadens der Korrosion der Zuglängsbewehrung erfordert eine weitere Untergliederung des Längsträgers in n Einzelquerschnitte, um einen Einfluss der Variation der Eingangsparameter auf den Zustand der Struktur in verschiedenen Schnitten analysieren zu können. Der Detaillierungsgrad der Unterteilung kann je nach Fragestellung und System frei gewählt werden. Im vorliegenden Beispiel erfolgt eine Unterteilung des Längsträgers in 11 Abschnitte („Rechteck-QS“) mit einer identischen Länge von 0,74 m. Die Geometrie des Stahlbetonquerschnitts beträgt $b/h = 25\text{ cm} / 35\text{ cm}$. Alle Strukturelemente der Rechteckquerschnitte werden in der feinsten Unterteilung in ihre relevanten Baustoffe (Beton, Betonstahl (unten) und Querkraftbewehrung) untergliedert. Diese Unterteilung erfolgt für alle Querschnitte identisch. Als Zugbewehrung wird Betonstabstahl DIN 488 – B500B – 16,0 mit einem Bemessungswert der Streckgrenze von $f_{yd} = 435\text{ MPa}$ verwendet. Über die Trägerlänge sind konstant fünf Betonstabstähle einlagig mit einem Durchmesser von 16 mm eingebaut. Die vorhandene Betondeckung c_{nom} im Beispiel beträgt durchgehend 20 mm.

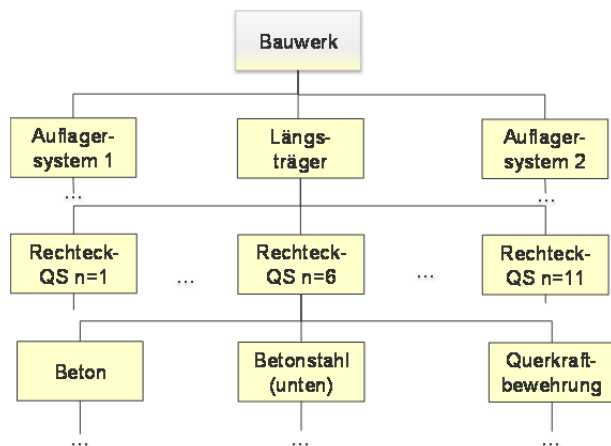


Bild 57: Strukturebene des Beispiels

5.4.2 Schadensebene

In der Schadensebene wird der für die betrachteten Schädigungsmechanismen relevante Betonstahl der Zugbewehrung weiter betrachtet (Bild 58). Schädigungen des Betons bzw. der Querkraftbewehrung werden im Rahmen dieses Beispiels nicht behandelt. Die erste Unterteilung in der Schadensebene unterscheidet zwischen mechanischem Versagen („Bruch“) durch statische Belastung bzw. aufgrund von Ermüdung und korrosivem Versagen des Betonstahls. Die Korrosion wird wiederum hinsichtlich ihrer Ursache in chloridinduziert bzw. karbonatisierungsinduziert unterteilt, vgl. hierzu Kapitel 5.2.

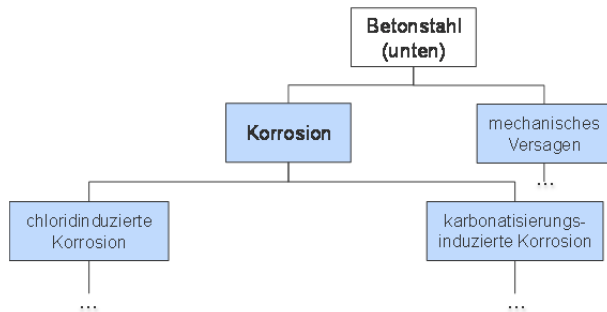


Bild 58: Schadensebene des Beispiels

5.4.3 Parameterebene

Den Schadenselementen sind die jeweils relevanten Parameterelemente zugeordnet. Die Relevanz der Eingangsparameter hängt vom gewählten Schädigungsmodell ab, welches in der übergeordneten Logik implementiert ist. In diesem Beispiel wurde für den Beginn bzw. das Fortschreiten der Korrosion ein Ansatz nach (NOVAK et al. 2002) gewählt. Die maßgebenden Parameter sind somit der Chloridgehalt an der Bewehrung und die Karbonatisierung an der Bewehrung für die Betrachtung der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion und die Betondeckung der Bewehrung und ebenfalls die Karbonatisierung an der Bewehrung für die karbonatisierungsinduzierte Korrosion.

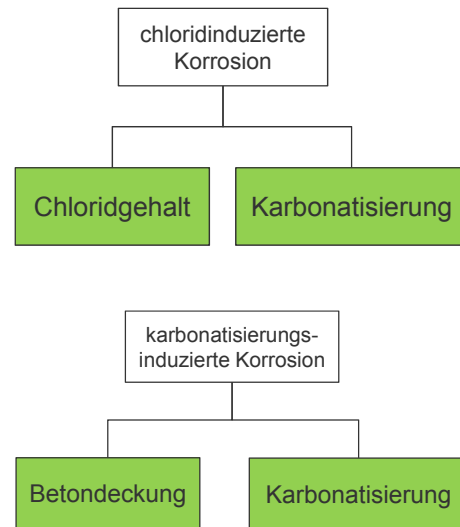


Bild 59: Parameterebene des Beispiels

5.4.4 Verknüpfungselemente

Die einzelnen Elemente sind jeweils mit logischen Verknüpfungselementen verbunden. Dies betrifft sowohl hierarchisch angeordnete Elemente innerhalb einer Ebene (Struktur-, Schadens- bzw. Parameterebene) als auch ebenenübergreifende Verknüpfungen.

Der detaillierte Aufbau der logischen Verknüpfungselemente für das vorgestellte Beispiel wird im folgenden Kapitel eingehend erläutert. Die jeweils eingehenden Parameter sind entweder Kenngrößen des Bauwerks (z.B. Querschnittsgeometrie, Materialien etc.), welche festgelegt sind, oder variable Parameter, die über Messsensorik am Bauwerk erfasst werden können (z.B. Chloridgehalt an der Bewehrung).

5.5 Aufbau der Verknüpfungen

In Bild 60 ist die Struktur des Einflussbaumes mit den drei Ebenen und den entsprechenden Verknüpfungen dargestellt. Für das Beispiel nicht relevante Äste werden hierbei nicht weiterverfolgt. Die Betrachtung eines Einflussbaumes erfolgt immer von der Parameterebene ausgehend bis zum obersten Strukturelement, dem Gesamtbauwerk. Hierbei werden alle logischen Verknüpfungselemente von unten nach oben bis zum Erreichen von Logik 1 durchlaufen.

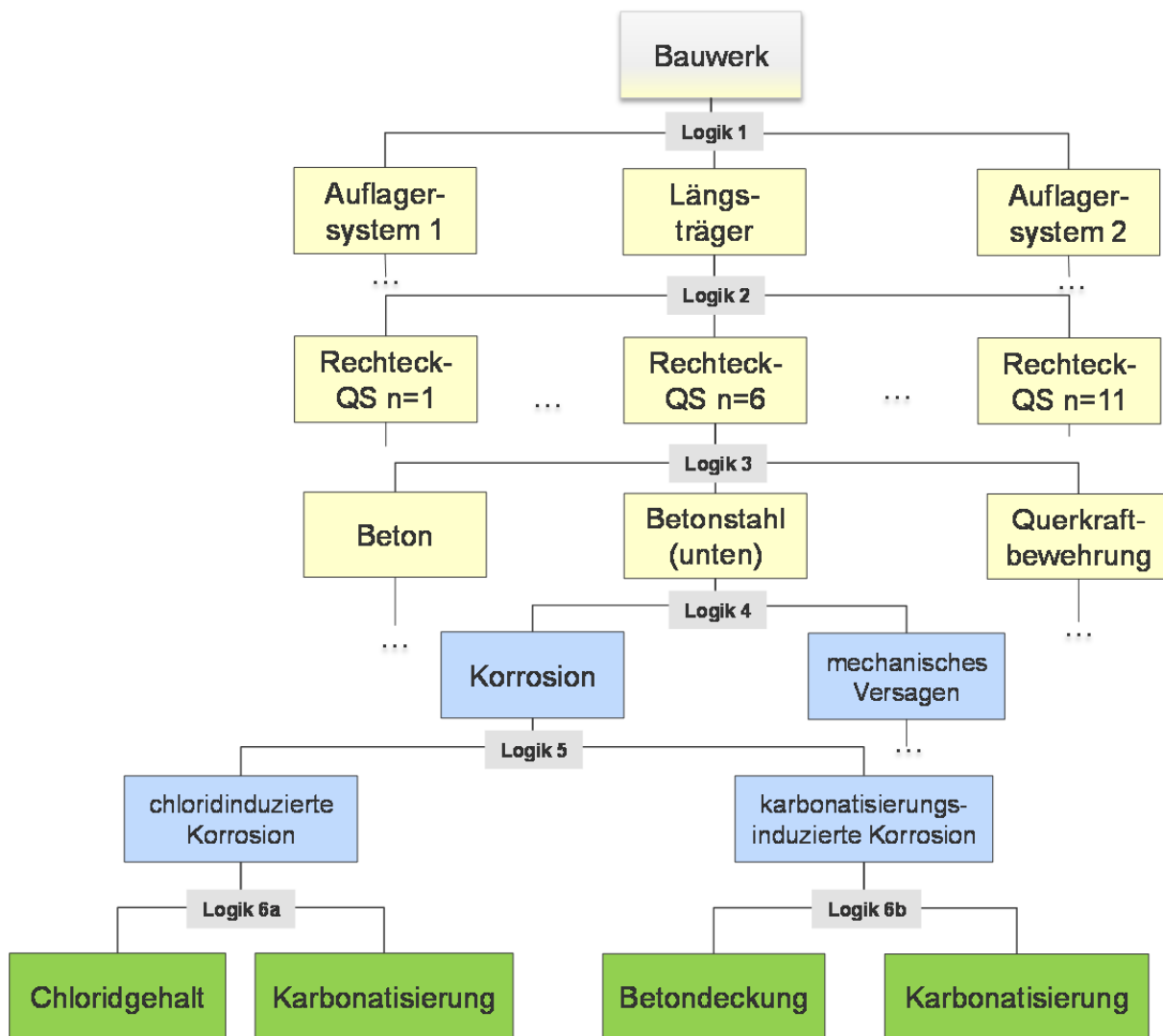


Bild 60: Einflussbaum des Beispiels

5.5.1 Logik 6

Für die untersten logischen Verknüpfungen zwischen der Parameterebene und dem zugehörigen Schadenselement wurde ein Modell nach (NOVAK et al. 2002) verwendet.

Logik 6a: Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion

Der Schädigungsmechanismus der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion wird nach dem gewählten Ansatz in Abhängigkeit der Parameter „Chloridgehalt an der Bewehrung“ und „Karbonatisierung an der Bewehrung“ beschrieben. Die definierten Grenzwerte für den Chloridgehalt liegen bei 0,5 M% bzw. 2,0 M% bezogen auf den Zement. Hinsichtlich der Karbonatisierung wird dazwischen

unterschieden, ob Karbonatisierung an der Bewehrung vorliegt oder nicht.

Diese beiden Parameter dienen als Eingangswerte in eine Entscheidungsmatrix (Tab. 2) und liefern als Ausgangswert die Abrostungsrate der Bewehrung in $\mu\text{m/a}$. Diese Abrostungsrate gibt den Einfluss der Korrosion auf die Bewehrung in Abhängigkeit der Zeit wieder und lässt sich nach ihrer Kritizität (Zustandssignal) skalieren. Im vorliegenden Beispiel wurde hierfür eine fünfstufige Skala gewählt.

Karbonatisierung	Chloridgehalt	Abrostungsrate [$\mu\text{m/a}$]	Kritizität
ja	0,5 M%	100	4
	2,0 M%	150	5
nein	0,5 M%	10	1
	2,0 M%	50	3

Tab. 2: Abrostungsraten infolge chloridinduzierter Bewehrungskorrosion nach (NOVAK et al. 2002)

Die ermittelte Kritizität wird als Zustand des Unterschadens „chloridinduzierte Bewehrungskorrosion“ ausgegeben und signalisiert somit auf einer Skala von 0 bis 5 den Anteil des Schadens am übergeordneten Element der Schadensebene („Korrosion“). Sollte der Schaden in die Strukturebene durchschlagen bzw. einen signifikanten Einfluss auf den Zustand des Gesamtbauwerks haben, ist anhand der Aussage der Kritizität der einzelnen Elemente die Schadensursache direkt nachvollziehbar. Weiterhin wird von der logischen Verknüpfung ein Signal an die Parameter, welche einen schadensauslösenden Grenzwert überschritten haben, weitergegeben.

Logik 6b: Karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion

Die karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion wird ebenfalls mit einem Schädigungsmodell nach (NOVAK et al. 2002) abgebildet. Die Eingangswerte hierfür sind die „Betondeckung der Bewehrung“ und wiederum das Vorhandensein von „Karbonatisierung an der Bewehrung“. Der flächig gleichmäßigere Verlauf der Korrosion spiegelt sich in geringeren Abrostungsraten als Ausgangswert für die weitere Betrachtung des Schadenseinflusses und somit einer geringeren Kritizität wider. Die Grenzwerte der Betondeckung sind mit 2 cm bzw. 4 cm festgelegt (Tab. 3).

Karbonatisierung	Betondeckung [cm]	Abrostungsrate [$\mu\text{m/a}$]	Kritizität
ja	$d \leq 2$	60	3
	$2 < d \leq 4$	20	2
	$d > 4$	3	1
nein	-	0	0

Tab. 3: Abrostungsraten infolge karbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion nach (NOVAK et al. 2002)

Die Grenzwerte der Abrostungsrate, die in einem Zustandssignal von 0 (unkritisch) bis 5 (kritisch) resultieren, können auf verschiedene Anwendungsbeispiele durch den modularen Charakter des Einflussbaumes übernommen werden bzw. an die jeweiligen Randbedingungen manuell angepasst werden.

5.5.2 Logik 5

Das Verknüpfungselement „Logik 5“ greift aus den Unterschäden die Information der ermittelten Abrostungsrate auf und gibt diese an das übergeordnete Schadenselement „Korrosion“ weiter. Das Zustandssignal des Schadenselements „Korrosion“ wird als Überlagerung der beiden Unterschäden simuliert oder kann als Maximum der Kritizität der untergeordneten Elemente ausgegeben werden.

5.5.3 Logik 4

In der „Logik 4“ wird im Rahmen dieses Beispiels nur der Schädigungsmechanismus der Korrosion berücksichtigt. Schädigungen des Betonstahls durch mechanische Einwirkungen können zusätzlich im Verknüpfungselement hinterlegt werden.

Auf Basis des im Querschnitt vorhandenen ursprünglichen Bewehrungsquerschnitts A_s und der ermittelten Abrostungsrate wird in dieser Verknüpfung der noch vorhandene Restquerschnitt der Bewehrung $A_{s,vorh}$ in Abhängigkeit der Dauer der Abrostung berechnet:

$$A_{s,vorh} = n \cdot (r - t_{kor})^2 \cdot \pi \quad (5.1)$$

mit

- $A_{s,vorh}$ Restquerschnitt der Bewehrung [cm^2]
- n Anzahl an Bewehrungsstäben
- r Radius des Betonstabstahls [cm]
= Durchmesser / 2
- t_{kor} Tiefe des Korrosionsabtrags [cm]
= Abrostungsrate · Dauer der Abrostung

Hierbei wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass die Abrostung des Betonstahls umlaufend erfolgt und der Restquerschnitt kreisförmig ist.

Das Zustandssignal des Strukturelements „Betonstahl (unten)“ wird über einen Vergleich der ursprünglichen Bewehrung mit dem Restquerschnitt

nach erfolgter Abrostung zum betrachteten Zeitpunkt ermittelt und auf einer definierten Skala ausgegeben.

5.5.4 Logik 3

Das Verknüpfungselement „Logik 3“ verbindet jedes der Strukturelement „Rechteck-QS“ mit dem darunterliegenden Element „Betonstahl (unten)“. Die Strukturelemente des Querschnitts mit den Strukturelementen der Baustoffe und deren untergeordneten Elementen einschließlich der logischen Verbindung stellen somit ein Modul dar. Diese Module ergeben aneinandergereiht das Strukturelement des Längsträgers.

Für jedes Element wird der erforderliche Bewehrungsquerschnitt nach Gleichung (5.2) ermittelt. Hierbei wird vereinfacht die aufzunehmende Stahlszugkraft mittels Division des einwirkenden Moments durch den inneren Hebelarm ermittelt und durch den Bemessungswert der Streckgrenze der Bewehrung dividiert, um den erforderlichen Betonstahlquerschnitt zu berechnen.

$$A_{s,erf}(x) = \frac{1}{\sigma_s} \cdot \frac{M(x)}{0,9 \cdot d} \cdot 10^4 \quad (5.2)$$

mit

$A_{s,erf}$	Erforderlicher Querschnitt der Bewehrung [cm ²]
x	Laufkoordinate in Trägerlängsrichtung
σ_s	Stahlspannung; hier: Bemessungswert der Streckgrenze der Bewehrung f _{yd} 435 MPa
M	Moment aus Einwirkungen [MNm]
d	Statische Nutzhöhe [m] = Bauteilhöhe h – Betondeckung c _{nom}

Das einwirkende Moment kann in Abhängigkeit der Laufkoordinate x nach Gleichung (5.3) ermittelt werden.

$$M(x) = \frac{q \cdot l^2}{2} \cdot \frac{x}{l} \cdot \frac{l-x}{l} \quad (5.3)$$

mit

q	Bemessungswert der einwirkenden Liniennlast [MNm]
l	Trägerlänge [m]

Das Zustandssignal des Strukturelements „Rechteck-QS“ wird anhand einer festgelegten Sicherheit aus dem Vergleich des noch vorhandenen Restquerschnitts der Bewehrung $A_{s,vorh}$ mit der durch die Belastung erforderlichen Bewehrung $A_{s,erf}$ ermittelt.

5.5.5 Logik 2

Im gewählten Beispiel eines statisch bestimmten Systems führt eine Zustandsverschlechterung eines Querschnittselements der Trägerlängsrichtung direkt zu einer Beeinträchtigung des Längsträgers. Die „Logik 2“ gibt somit den kritischsten Zustand eines der Querschnittselemente direkt an das Strukturelement „Längsträger“ weiter.

5.5.6 Logik 1

Das Beispielbauwerk besteht nur aus zwei Auflagersystemen und einem Längsträger. Der Zustand des Längsträgers schlägt somit auf das Gesamtbauwerk durch. „Logik 1“ nimmt die Zustandsinformation aus dem Strukturelement „Längsträger“ auf und gibt diese direkt an das übergeordnete Element des Bauwerks weiter.

5.6 Simulieren mit SysML

Für die Simulation des Systemmodells mithilfe der kommerziellen Software Sparx Enterprise Architect waren verschiedene Anpassungen nötig. Der Aufbau der Struktur-, Schadens- und Parameterebene bleibt unverändert (Kapitel 2.2), aber die Logikelemente, die zuvor im konzeptionellen Modell zwischen Elementen als Verbindung funktionierten, wurden umgestaltet. Mit deren erweiterter Struktur (Bild 61) haben die Logikelemente diese Verbindungsrolle nicht verloren, sie wird nun anders modelliert. Logikelemente übergreifen Elemente, die sie in dem konzeptionellen Modell verbunden haben. Diese Elemente dienen als Parameter für die in der Logik hinterlegte Gleichungen. Auf diese Weise besteht das gesamte Modell aus Logikelementen, die durch die gemeinsamen Elemente Berechnungswerte miteinander austauschen können und damit die Übergabe von verschiedenen Parametern wie z.B. die Bewertungswerte eines Elements ermöglichen. Damit bleiben die Struktur (Kapitel 2.2.1-2.2.5) und Funktionsweise (Kapitel 2.2.6) des Einflussbaums unverändert, die Logik-Elemente wurden nun erweitert.

Die erweiterten Logik Elemente wurden mit SysML als Constraint-Blöcke definiert, die spezielle Elemente der Block Definition Diagramm Klasse sind. Dieses Element ermöglicht in Sparx Enterprise Architect die Programmierung eigener Funktionen für das Element mit der Programmiersprache JavaScript. Diese Funktionen werden während der Simulation von der Software automatisch zu einem gesamten Berechnungscode zusammengebaut und danach berechnet.

Um die richtige Reihenfolge der Ausführung der einzelnen Funktionen sicherzustellen, war es notwendig, so genannte „Connector“-Elemente einzufügen (Bild 62). Ihre Aufgabe besteht lediglich darin, die Reihenfolge der Berechnung zu definieren. Darüber hinaus haben sie keine weitere Rolle in der Simulation.

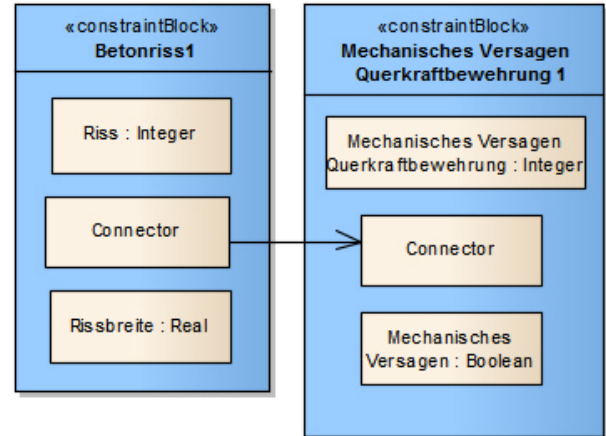


Bild 62: Connector-Elemente bestimmen die Reihenfolge der Berechnung von mehreren Elementen

Aufgrund der JavaScript basierten Programmierung der Funktionen können beliebige Gleichungen, Ungleichungen, Vergleiche oder Bewertungen als Logik implementiert werden. Dadurch sind sowohl deterministische als auch stochastische Berechnungen mit den neuen Logikelementen möglich. Ein Beispiel für die Umsetzung einer Logik mit JavaScript zeigt der folgende Code-Abschnitt für die Logik der chloridinduzierten Korrosion.

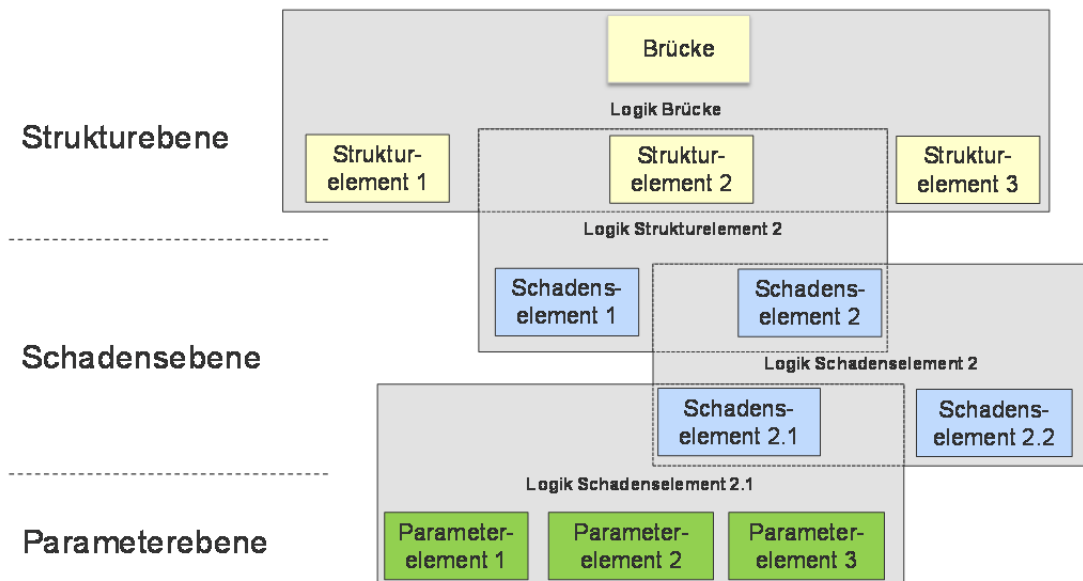


Bild 61: Modellierungsstruktur des Einflussbaums

```

if (Karbonatisierung){
  if(Chloridgehalt >= 2){
    Bewertung_CL_Korrosion=4;
    Abrostungsrate=150;
  }else if(Chloridgehalt >= 0.5){
    Bewertung_CL_Korrosion=3;
    Abrostungsrate=100;
  }else{
    Bewertung_CL_Korrosion=2;
    Abrostungsrate=50;
  }
}
}else{
  if(Chloridgehalt >= 2.0){
    Bewertung_CL_Korrosion=2;
    Abrostungsrate=50;

  }else if(Chloridgehalt >= 0.5){
    Bewertung_CL_Korrosion=1;
    Abrostungsrate=10;

  }else{
    Bewertung_CL_Korrosion=0;
    Abrostungsrate=0;
  }
}

```

Hierbei wird aufgrund der Eingangsparameter Chloridgehalt und Karbonatisierung eine Bewertung (Bewertung_CL_Korrosion) und ein Wert für die Abrostungsrate ermittelt. Die Grenzwerte entsprechen den in Kapitel 5.5.1 vorgestellten Werten.

Nachdem alle Elemente der Struktur-, Schaden- und Parameterebene im neuen Einflussbaum als Ein- und Ausgangswerte der Logikelemente dienen, müssen sie als Parameter des Logikelements und nicht mehr als Blöcke des BDDs (Kapitel 3.3.3) definiert werden. Diese Parameter werden immer innerhalb des Constraint-Blocks dargestellt (Bild 63).

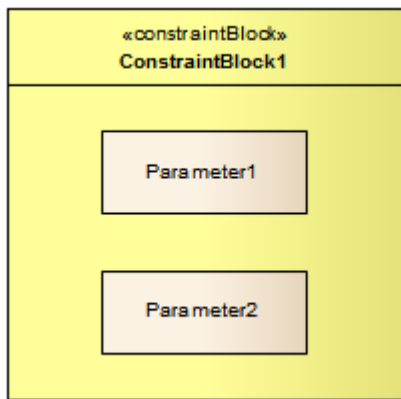


Bild 63: Constraint-Block mit zwei Parameterelementen

Um eine Simulation durchführen zu können, müssen die vorgestellten Logikelemente in ein Parameterdiagramm eingefügt werden. Die benötigten Eingangsparameter für die Berechnungen können in diesem Diagramm als externe Parameter definiert werden. Der Wert dieser Parameter kann vom Nutzer frei definiert werden, deswegen können sie auch beispielsweise mit einem Sensorik-Netzwerk verbunden und die Eingabewerte der Simulation aus Echtzeitmessungen gewonnen werden.

Ein weiterer Vorteil der neuen Struktur ergibt sich durch die neue Komponentenaufteilung des Systemmodells. Nachdem das Systemmodell nun aus Constraint-Blöcken besteht anstelle von einfachen Blockelementen, können weitere Eingangsparameter auch für Elemente auf höheren Ebenen (z.B. Strukturebene) definiert werden. Diese können zum Beispiel Querschnittseigenschaften (Höhe, Breite, Anzahl Bewehrung, Materialgüte, etc.) und allgemeine Eigenschaften der Brücke (Spannweite, Lage, Last, etc.) beschreiben (siehe Bild 64).

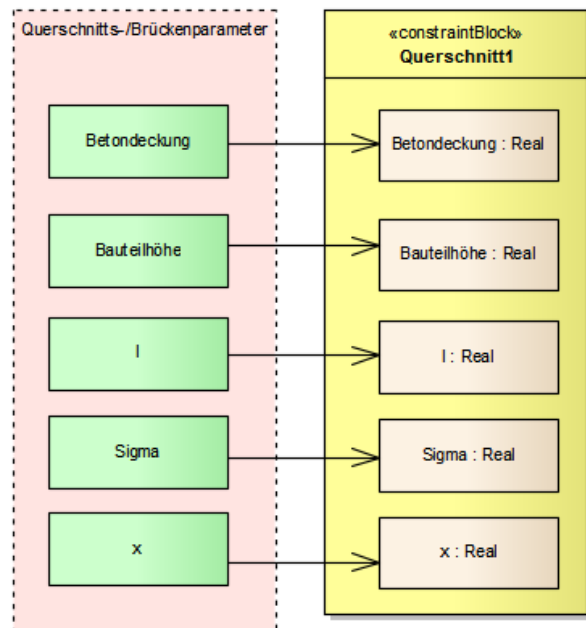


Bild 64: Querschnitts- und Brückenparameter verbunden mit dem Strukturelement Querschnitt1

Diese Parameter fließen, im Gegensatz zu den Elementen der Parameterebene, seitlich in das Modell ein. Sie werden verwendet, um weitere Querschnitts- oder Brückeneigenschaften zu berechnen, wie z.B. Biegemoment an der betrachteten Stelle, benötigte Querschnittsgröße, vorhandene Querschnittsgröße etc. Die überarbeitete Struktur ermöglicht zusätzlich die Übergabe von mehreren Parametern zwischen den Logikelementen. Dadurch können Parameter nicht nur an einer Stelle betrachtet werden, sondern ebenfalls auf höheren Ebenen des Systemmodells. Beispiels-

weise wird die Abrostungsrate des Bewehrungsquerschnitts im Schadenselement *Chloridinduzierte Korrosion* ermittelt und am Strukturelement *Querschnitt* verwendet, um den vorhandenen Betonstahlquerschnitt zu berechnen. Parallel dazu können weitere Parameter mit einfließen wie z.B. die Bewertung des Zustands des Betonstahls.

Die Durchführung verschiedener Simulationen mit dem vorgestellten Beispielbauwerk (Kapitel 5.4) unter Betrachtung der chloridinduzierten und karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion wird in den nächsten Abschnitten vorgestellt. Zunächst wird der Aufbau des Systemmodells eines Überbaus mit Rechteckquerschnitt diskutiert, mit dessen Hilfe parametrische Untersuchungen durchgeführt werden, um den kritischen Querschnitt eines Längsträgers zu ermitteln (Hot-Spot-Identifizierung). Hierfür wird eine Prognose hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung des Zustands des Querschnitts durchgeführt. Darauf aufbauend wird in einem zweiten Schritt ein Gesamtsystem bestehend aus elf Trägern mit zwei Auflagerungssystemen modelliert. Für verschiedene Querschnitte des Systems werden unterschiedliche Annahmen hinsichtlich des Chloridgehalts des Betons variiert, um auf diese Weise den weiteren Verlauf des Zustands des Gesamtbauwerks prognostizieren zu können.

5.6.1 Simulation eines Querschnitts

Für die Simulation eines Querschnitts wird das im Abschnitt 5.4 vorgestellte Rechteckquerschnittsmodell benutzt. Die Modellierung mit SysML folgt dem in Kapitel 4 beschriebenen Vorgehen. Das Simulationsmodell des Querschnitts ist in Bild 65 dargestellt. Dabei bilden die gelb und blau gefärbten Constraint-Blöcke die Logikelemente der Struktur- und Schadensebene. Die blau gefärbten Schadenselemente bilden die folgenden Schadensmechanismen ab: chloridinduzierte Korrosion, karbonatisierungsinduzierte Korrosion, Korrosion (Zusammenführung der vorherigen Korrosionsmechanismen), mechanisches Versagen des Bewehrungsstahls, Riss des Betons, mechanisches Versagen der Querkraftbewehrung.

Die gelbfarbigen Strukturelemente modellieren die Bewehrung, den Beton, die Querkraftbewehrung und das übergeordnete Element Querschnitt. Die Kästchen innerhalb der Logikelemente repräsentieren die für die Zustandsberechnung benötigten Parameter, wie z.B. für die chloridinduzierte Korrosion Chloridgehalt, Karbonatisierung, Abrostungsrate, sowie die Bewertungsparameter für das Element und den Connector. Die hinterlegte Logik eines neuen Constraint-Blocks muss für jedes

Element vom Nutzer programmiert werden. Mithilfe von vordefinierten Bauteil- oder Schadensmodulen kann dieser Schritt abgekürzt werden, da die Logik dieser Elemente bereits hinterlegt ist.

Für die im Beispielmodell benötigten Logik-Elemente werden die in Kapitel 5.5 vorgestellten Gleichungen und Ungleichungen benutzt. Die grün dargestellten Kästen im unteren Bereich symbolisieren die Inputparameter der Simulation (Parameterebene), wie z.B. Chloridgehalt, Karbonatisierung, Rissbreite etc. Auf der linken Seite, ebenfalls mit grüner Farbe gekennzeichnet, sind die Querschnitts- und Brückenparameter angeordnet: q (Last), Bauteilhöhe, l (Bauteillänge), x (Entfernung des Querschnitts von den linken Auflagerungsachse), etc.

Die Ausgangsparameter des Modells sind in violetter Farbe dargestellt. Sie repräsentieren die Bewertungswerte für die Elemente des Systemmodells wie z.B. den Zustand des Gesamtquerschnitts, den Fortschritt der Korrosion etc. Diese Parameter werden nach der Simulation mithilfe von Tabellen und Diagrammen ausgewertet. Die Verbindung zwischen zwei Parametern wird durch schwarze Pfeile gekennzeichnet. Dabei bestimmt die Richtung des Pfeils die Flussrichtung des Parameterwerts.

Nach der Definition des Modells müssen die Eingangswerte der Parameter eingegeben werden. Für die Querschnitts- und Brückenparameter werden die in Kapitel 5.4 eingeführten Größen zugewiesen. Die Messwerte der Parameterebene sind im Rahmen der in Kapitel 5.5 vorgestellten Grenzwerte anzugeben.

5.6.1.1 Identifizierung des kritischen Querschnitts

Das vorgestellte Systemmodell wird im ersten Schritt verwendet, um den kritischen Querschnitt des Tragwerks zu identifizieren. Dabei werden alle Werte der Parameterebene während mehrerer Simulationsabläufe konstant gehalten. Dies trifft weitgehend auch auf die Querschnitts- und Brückenparameter zu. Einzige Ausnahme bilden die Parameter Zeitpunkt (t) und die relative Position des betrachteten Querschnitts (x), die variiert werden.

Während einer Simulation läuft der Parameter x von 0 bis zur gesamten Länge des Trägers (l) mit der Schrittweite von 10 cm, um auf diese Weise möglichst viele Querschnitte des Trägers hinsichtlich ihres Zustands zu evaluieren. Bei der Auswertung, außerhalb des mittleren Bereichs des Trägers) wird nur jeder zweite Querschnitt des Trä-

gers betrachtet. Die Schrittweite des Laufparameters der Simulation kann beliebig definiert werden. Unsere Entscheidung traf auf diese dichte Aufteilung damit ein relativ kontinuierlicher Verlauf der Ergebnisse dargestellt werden kann. Die weiteren Parameter der Simulation werden so definiert, dass bei dem Querschnitt die Karbonatisierung aufgetreten ist und der Chloridgehalt den höchsten Grenzwert überschreitet (Warnungsstufe 4). Die Simulation wird mit dieser Konfiguration mehrere Male durchgeführt, wobei mit jedem Lauf der Zeitparameter variiert. Eine Berechnung wird beim Zeitpunkt 0 (Gegenwart) durchgeführt, um den aktuellen Zustand der Brücke zu ermitteln. Dieser

Zeitpunkt (0) zeigt auch an, wann diese Schäden (Korrosion) das erste Mal aufgetreten sind (Tab. 4 – 1. Zeile). Um eine Prognose für den Zustand des Trägers abzugeben, wird die Simulation ab dem Zeitpunkt 7 Jahren in Intervallen von einem Jahr solange durchgeführt, bis mindestens einer der Querschnitte den kritischen Zustand 4 erreicht hat. Die Ergebnisse der Simulation sind in Tab. 4 und Diagramm 1 zusammengefasst.

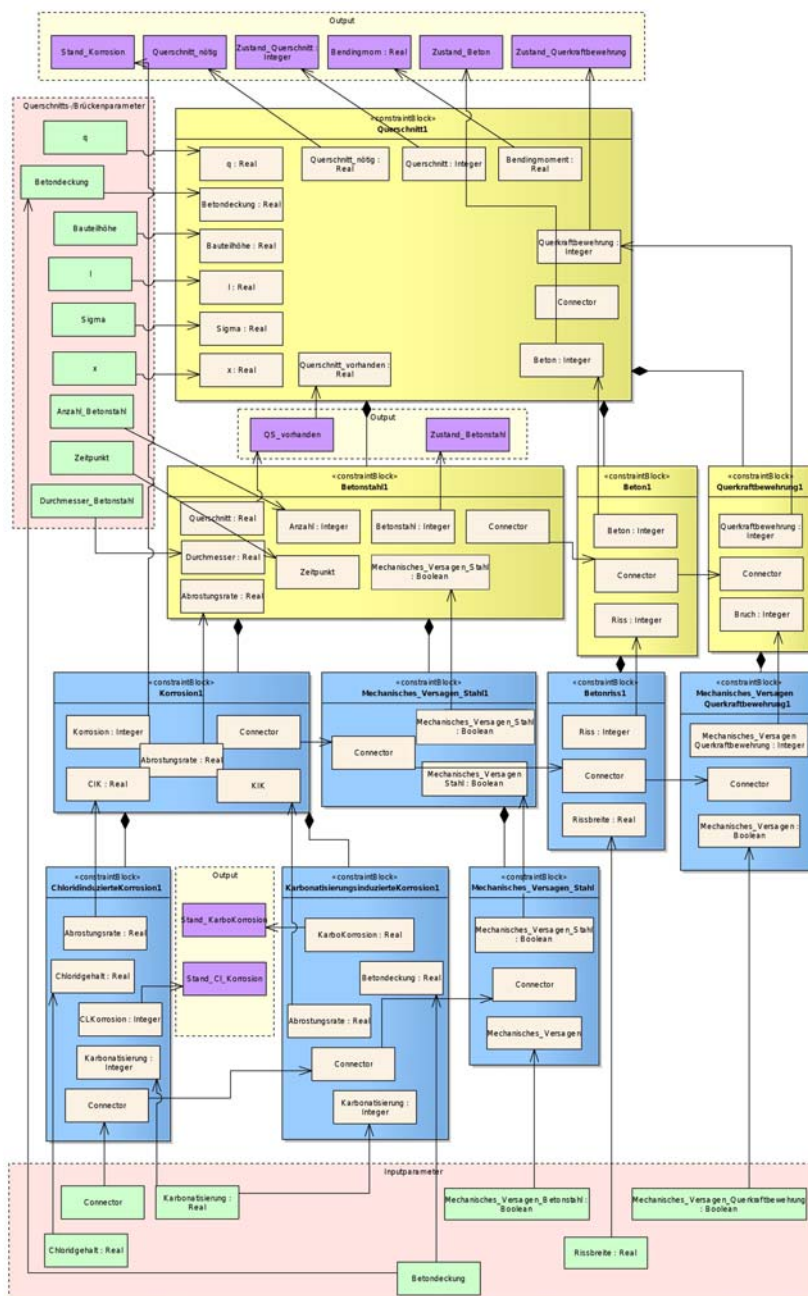


Bild 65: Systemmodell des Rechteckquerschnitts. Blau: Schadenbilder; Gelb: Strukturelemente; Grün: Input-Parameter; Violett: Output-Parameter

Position des Querschnitts (x)	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,7	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4							
Zustand des Querschnitts an der Position x																																														
Gegenwart	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Jahr 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Jahr 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Jahr 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Jahr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jahr 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jahr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jahr 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4: Suche nach dem kritischen Querschnitt des Längsträgers. Zeilen: Zeitpunkt für die Prognose. Spalten: Querschnitt bei der Position x. Eine Zelle beschreibt in welchem Zustand der betrachtete Querschnitt sich nach der angegebenen Anzahl von Jahren voraussichtlich befindet.

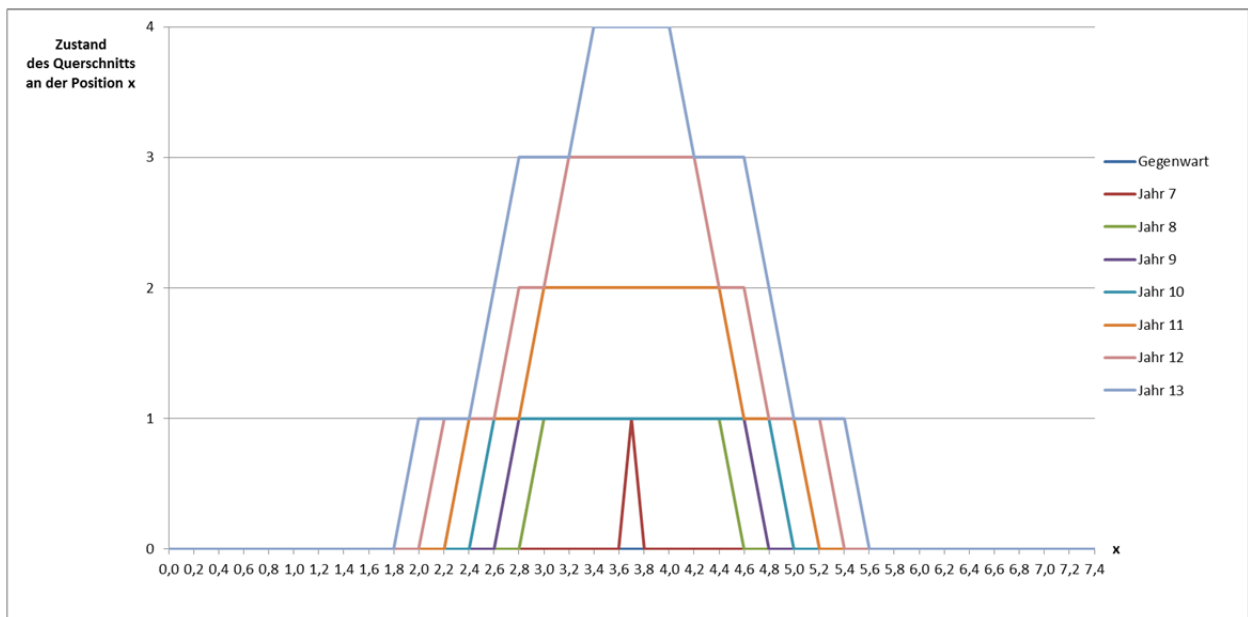


Diagramm 1: Graphische Darstellung der Ergebnisse aus Tab. 4

Mithilfe von Diagramm 1 und Tab. 4 ist leicht zu erkennen, dass der Querschnitt in der Mitte des Trägers ($x=3,7$ m) zuerst den kritischen Zustand erreicht hat. Dies ist folglich der kritische Querschnitt des Längsträgers. Diese Aussage ist bei diesem einfachen Beispiel zwar offensichtlich, aber auch in einem Modell mit höherem Komplexitätsgrad lassen sich mit dem vorgeschlagenen Systemmodell-basierten Ansatz zuverlässig Hot Spots identifizieren.

Aus Diagramm 1 und Tab. 4 kann ebenfalls abgelesen werden, dass bei unverändertem Chloridgehalt und Aussetzen von Instandsetzungsmaßnahmen ein Versagen nach 13 Jahren eintritt.

5.6.1.2 Parametrische Untersuchung des kritischen Querschnitts

Nachdem der kritische Querschnitt identifiziert wurde, können weitere parametrische Untersuchungen mithilfe des Modells durchgeführt werden. Zunächst soll der Einfluss des Parameters Chloridgehalt auf den Zustandsverlauf betrachtet wer-

den. Dafür wird zunächst die relative Position des Querschnitts fixiert ($x=3,7$ m). Der Zeitpunkt für eine Prognose wird auf 12 Jahre festgelegt, um zu ermitteln, in welchem Zustand sich der Querschnitt nach Ablauf von 12 Jahren befindet. Während der Untersuchung wird der Einfluss des Parameters Chloridgehalt im Bereich von 0 M% bis zu 2,5 M% mit einer Schrittgröße von 0,1% variiert. In einer ersten Untersuchung ohne vorhandene Karbonatisierung, in einer zweiten Untersuchung mit aufgetretener Karbonatisierung (Tab. 5 und Diagramm 2).

Während sich der Zustand des Trägers ohne Annahme von Karbonatisierung für den gesamten Bereich des angesetzten Chloridgehaltes in einem akzeptablen Zustand (keine Warnung) bewegt, springt der Zustand bei Annahme von Karbonatisierung bei einem Chloridgehalt von 0,6 M% auf einen leicht geschädigten Zustand (Warnstufe 1). Mit einem Chloridgehalt von mehr als 2 M% wird sich das Tragwerk nach 12 Jahren in einem stark geschädigten Zustand befinden (Warnstufe 3).

Chloridgehalt	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	
	Zustand des kritischen Querschnitts in 12 Jahren mit Chloridgehalt von ... M%																										
ohne Karbonatisierung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
mit Karbonatisierung	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3

Tab. 5: parametrische Untersuchung des kritischen Querschnitts (in der Mitte des Längsträgers). Spalten: Chloridgehalt bei dem betrachteten Querschnitt. Zelle: Zustandsbezeichnung des betrachteten Querschnitts in 12 Jahren mit dem entsprechenden Chloridgehalt entweder ohne oder mit Annahme von Karbonatisierung.

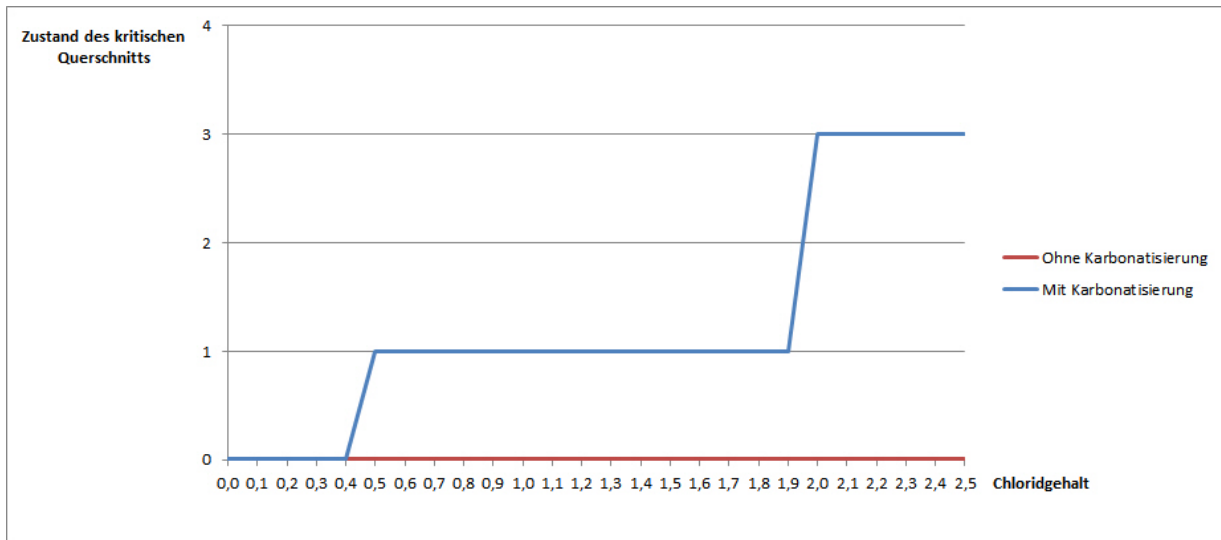


Diagramm 2: Darstellung der Ergebnisse der parametrischen Untersuchung des kritischen Querschnitts aus Tab. 5

In den beiden vorangegangenen Abschnitten wurde anhand eines Beispiels gezeigt, wie eine Simulation des Systemzustandes mit SysML durchgeführt werden kann. Dabei wurde vorgestellt, wie kritische Querschnitte eines Längsträgers oder Hot Spots eines Systemmodells identifiziert und welche weiteren parametrischen Berechnungen damit durchgeführt werden können. Im folgenden Abschnitt wird diskutiert, wie ein größeres Systemmodell mithilfe des vorgestellten Querschnitts als Modul aufgebaut und damit Simulationen durchgeführt werden können.

5.6.2 Simulation des Gesamtbauwerks

Um den Einfluss des Zustands einzelner Bauteile auf den Zustand des Gesamtbauwerks zeigen zu können, muss zunächst ein Systemmodell für das Gesamtsystem aufgebaut werden. Im hier betrachteten Beispiel besteht dieses Modell aus dem vorgestellten Längsträger, der mit zwei sich in sehr gutem Zustand befindenden Auflagersystemen unterstützt wird. Um mehrere Querschnitte des Längsträger gleichzeitig betrachten zu können, wird der vorgestellte Querschnitt als Modul verwendet und zehn weitere Male in das Modell eingefügt, damit der Zustand von elf Querschnitten berechnet werden kann und lokale Parameter von elf verschiedenen Orten des Längsträgers betrachtet werden können. Für die Auswertung der Ergebnisse werden die in der Mitte des Trägers lie-

gende drei Querschnitte benutzt, weil sie im früher identifizierten kritischen Bereich (Kapitel 5.6.1.1) liegen. Ein von den drei betrachteten Querschnitten liegt genau in der Mitte des Trägers und die zwei weiteren 0,74 m links und rechts von der Mitte entfernt.

Der Vorteil bei der Verwendung von Modulen liegt darin, dass sie in das Modell mehrere Male eingefügt werden können, ohne dass alle Details noch einmal modelliert werden müssen. In diesem Fall wurde das gesamte Querschnittmodell in einem Modul gekapselt. Ein weiterer Vorteil der Verwendung von Modulen liegt darin, dass die hinterlegten Logik-Elemente, die innerhalb des Moduls liegen, nicht verändert werden müssen. Da weiterhin die Eingangswerte eines Logik-Elements innerhalb des Moduls definiert sind und die Struktur der Querschnitte gleich ist, müssen weder diese Parameter noch der hinterlegte JavaScript-Code zur Abbildung der verschiedenen Gleichungen und Ungleichungen für die Zustandspropagation angepasst werden.

Die zusätzlichen Elemente im Modell, die die elf Querschnittsmodule erweitern, sind das Strukturelement Längsträger, welches den drei Querschnitt-Elementen übergeordnet wurde, und das Gesamtmodell, welches durch das Wurzelement des Einflussbaums repräsentiert wird (siehe Bild 60). Die logische Verknüpfung für den Längsträger

mit den Unterbauteilen entspricht der Beschreibung von Logik 2 (Kapitel 5.5.5) und für das Gesamtmodell Logik 1 (Kapitel 5.5.6). Die Logik für diese Elemente muss manuell programmiert werden.

Die Auflagersysteme werden als unbeschädigt angenommen und generieren kein Warnsignal.

Chloridgehalt von Querschnitt 1... M%		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5		
		Zustand																											
Jahr 12	Querschnitt 1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	
	Querschnitt 2	0																											
	Querschnitt 3	2																											
	Gesamtbauwerk	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	
Jahr 13	Querschnitt 1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	
	Querschnitt 2	1																											
	Querschnitt 3	3																											
	Gesamtbauwerk	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	

Tab. 6: Prognose für das Gesamtbauwerk in 12 und 13 Jahren: variiert wird der Chloridgehalt vom Querschnitt 1 von 0,0 bis 2,5 M%. Chloridgehalt für Querschnitt 2 ist auf 1,5 M% und für Querschnitt 3 auf 2,1 M% festgelegt worden. Eine Zelle beschreibt, in welchem Zustand der betrachtete Querschnitt oder das Gesamtbauwerk sich nach der angegebenen Anzahl von Jahren mit dem in der Spalte angegebenen Chloridgehalt von Querschnitt 1 voraussichtlich befindet.

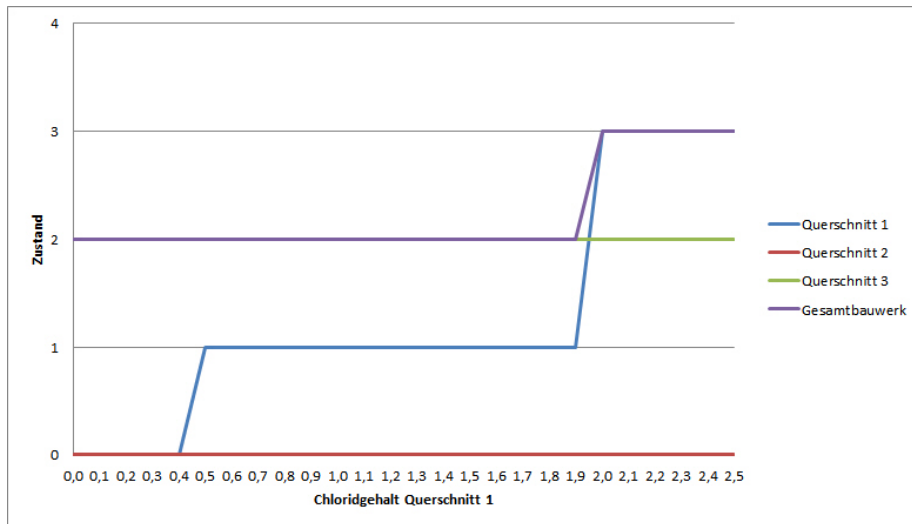


Diagramm 4: Darstellung der Ergebnisse der Prognose für das Gesamtbauwerk im Jahr 12

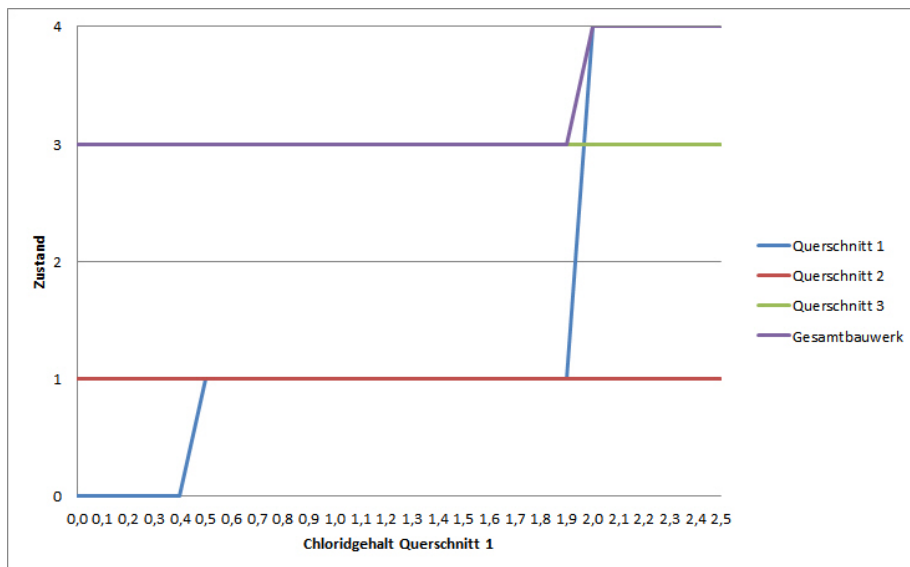


Diagramm 3: Darstellung der Ergebnisse der Prognose für das Gesamtbauwerk im Jahr 13

5.6.2.1 Prognose für das Gesamtbauwerk

Mithilfe einer Systemmodell-basierten Prognose für das Gesamtbauwerk kann untersucht werden, welcher Querschnitt des Längsträgers maßgeblich für den Zustand des Gesamtbauwerks ist. Dies kann als Grundlage für die Entscheidung hinsichtlich der Anordnung von entsprechender Sensorik dienen.

Für die Prognose wurden folgenden Parameterwerte angesetzt:

Querschnitt 1:

- X: 3,7 m
- Chloridgehalt: 0...2,5 M%
- Karbonatisierung: ja

Querschnitt 2:

- X: 3,2 m
- Chloridgehalt: 1.5 M%
- Karbonatisierung: ja

Querschnitt 3:

- X: 4.2 m
- Chloridgehalt: 2.1 M%
- Karbonatisierung: ja

Zeitpunkte: Jahr 12 und Jahr 13.

Während der Simulation wird der Chloridgehalt des Querschnitt 1 von 0 bis 2,5 M% mit einer Schrittgröße von 0,1 M% variiert. Die weiteren Parameter wurden wie vorgestellt festgelegt.

In der Gegenwart weisen alle Querschnitte keine Warnung auf. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Tab. 6, in Diagramm 3 und Diagramm 4 dargestellt.

Im Jahr 12, wenn der Chloridgehalt von Querschnitt 1 noch relativ gering ist ($<0,6$ M%), ist der maßgebende Querschnitt für das gesamte Bauwerk der Querschnitt 3 mit der Warnstufe 2. Wenn sich der Chloridgehalt im Querschnitt 1 erhöht ($>0,5$ M%), erhält Querschnitt 1 die Warnstufe 1. Damit bleibt immer noch Querschnitt 3 mit der Warnstufe 2 maßgebend für das Gesamtbauwerk. Mit einem Chloridgehalt größer als 2,0 M% im Querschnitt 1 wird Warnstufe 3 für den Querschnitt generiert, und damit wird dieser Querschnitt in diesem Fall erst nach Erreichen eines Chloridgehalts von 2 M% maßgebend für das Gesamtbauwerk. Dadurch wird das Gesamtsystem bis zu einem Chloridgehalt von 2 M% im Querschnitt 1 die Warnungsstärke 2 haben (kritisch: Querschnitt 3) und danach Warnungsstärke 3 (kritisch: Querschnitt 1).

Infolge der großen Abrostung erreicht im Jahr 13 Querschnitt 2 die Warnstufe 1 und Querschnitt 3 die Warnstufe 3. Wenn Querschnitt 1 nur einen

geringen Chloridgehalt aufweist ($<0,5$), ergibt sich hier keine Warnung. Damit ist Querschnitt 3 der maßgebende Querschnitt für das Gesamtbauwerk.

Ab einem Chloridgehalt von 0,6 M% erreicht Querschnitt 1 die Warnstufe 1 und wird damit immer noch nicht maßgeblich für die Gesamtstruktur. Sobald der Chloridgehalt im Querschnitt 1 höher als 2 M% liegt, wird nach 13 Jahren der Querschnitt und damit der Längsträger und die Gesamtstruktur einen kritischen Zustand einnehmen (Warnstufe 4).

Mit diesem einfachen Beispiel konnte gezeigt werden, wie eine Simulation mit mehreren Querschnitten durchgeführt werden kann. Diese Simulation kann nicht nur mehrere Querschnitte, sondern auch mehrere lokale Messergebnisse bei der Berechnung in Betracht ziehen. Damit kann eine präzisere Prognose für das Gesamtbauwerk erstellt werden. Die Notwendigkeit zur Berücksichtigung von mehreren Querschnitten eines Längsträgers wurde durch den Effekt nachgewiesen, dass sich aufgrund einer großen lokalen Schädigung (hoher Chloridgehalt) ein Querschnitt als maßgeblich für den Zustand des Gesamtbauwerks erweisen kann, der nicht in der Trägermitte liegt.

Mithilfe der vorgeschlagenen Methode der Systemmodellierung können sehr umfassende und detaillierte Modelle aufgebaut werden, die weitere Schädigungen und Bauteile in Betracht ziehen und eine Prognose für komplexere Gesamtbauwerke ermitteln können.

5.6.3 Einbezug probabilistischer Ansätze

Die Verknüpfungselemente zwischen den einzelnen Elementen eines Einflussbaums sind frei definierbar. Empirische bzw. deterministische Schädigungsmodelle können somit in die Logikelemente implementiert werden. Dies stellt jedoch nach (THÖNS 2012) häufig eine grobe Vereinfachung dar, da sich sowohl die Parameter der untersten Ebene, als auch Schädigungsprozesse bzw. Bauteilreaktionen nicht exakt deterministisch bestimmen lassen. Die zufälligen Streuungen der genannten Parameter müssen daher mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen definiert werden.

Darüber hinaus kann der Tatsache, dass aus technischen bzw. wirtschaftlichen Gründen nicht alle benötigten Messwerte über Sensorik in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden können, ebenfalls über die Anwendung stochastischer Methoden Rechnung getragen werden. Die Verwendung von Markov-Ketten in einem Einflussbaumsystem ermöglicht hierbei die Prognose künftiger Bauwerkszustände. Die prognostizierte Wahrscheinlichkeit

kann hierbei mittels zeitdiskretem Parameter-Updating aktualisiert werden. Eine Voraussetzung stellt hierbei die Berücksichtigung kausaler Zusammenhänge innerhalb des Einflussbaums dar. Mittels Bayes'scher Netze kann die Kausalität für die Anwendung von Markov Ketten abgebildet werden. Dies erfordert eine Anpassung des frei definierbaren Einflussbaumes, bei welchem nicht zwischen Ursache bzw. Wirkung von Schädigungen unterschieden werden muss. Die Einführung dynamischer Bayes'scher Netze ermöglicht es nach (THÖNS 2012), die starren Annahmen von Markov-Ketten hinsichtlich kausaler Zusammenhänge zu umgehen.

5.7 Vergleich der Ergebnisse mit herkömmlichen Methoden der Bauwerksprüfung

Vergleichend werden die Beispiele für Bewehrungskorrosion der RI-EBW-PRÜF mit den Ergebnissen des hier vorgestellten Ansatzes gegenübergestellt.

Im Schadensbeispielkatalog der RI-EBW-PRÜF wird hinsichtlich der Korrosion schlaffer Tragbewehrung und des Spannstahls unterschieden. Die Kategorisierung der Gefährdung durch Korrosion des Betonstahls erfolgt in Abhängigkeit des Bewehrungsausfalls. So wird unter der BSP_ID 002-04 für korrodierte Bewehrung ohne nennenswerte Querschnittsminderung eine Bewertung von S/V/D=1/0/2 vergeben. Einsetzende Querschnittsminderung (S/V/D=2/0/3), fortgeschrittene Querschnittsminderung (S/V/D=3/0/3) bis zum teilweisen Ausfall von Tragbewehrung BSP_ID 002-08 führen zur höchstmöglichen Bewertung hinsichtlich Standsicherheit und Dauerhaftigkeit von S/V/D=4/0/4.

Eine Bewertung gemäß des Schadensbeispielkatalogs der RI-EBW-PRÜF liefert jedoch keine direkten Rückschlüsse auf die Ursachen des Schadens bzw. den zugrundeliegenden Schädigungsmechanismus. Es wird lediglich anhand der fünf relevanten Schadensbeispiele (Korrosion der Betonstahlbewehrung) auf Basis einer subjektiven Beurteilung durch den Bauwerksprüfer eine Einzelschadensbewertung vorgenommen. Zudem

erfolgt keine Untergliederung des Hauptbauteils (hier: Überbau in Form des Längsträgers) in einzelne, statisch unterschiedlich beanspruchte Abschnitte. Eine korrodierte Bewehrung nahe dem Auflagerbereich resultiert somit in einer identischen Bewertung hinsichtlich standsicherheitsgefährdender Auswirkungen wie Bewehrungskorrosion in Feldmitte.

Die Bewertung eines Bauwerkes mittels eines Einflussbaumes liefert hingegen eine Nachvollziehbarkeit des Zustandes des Gesamtbauwerks über die einzelnen Strukturelemente zu den zugehörigen Schädigungsmechanismen inklusive der schadensauslösenden Parameter. Eine Untergliederung wichtiger Strukturelemente (hier: Längsträger) in mehrere identische Unterelemente (hier: Rechteck-QS) ermöglicht hierbei eine Berücksichtigung des statischen Systems bzw. weiterer lokal divergierender Einflüsse. Der modulare Ansatz ermöglicht durch eine Implementierung des Einflussbaumes in eine Software derartige Untergliederungen ohne großen Mehraufwand. Zudem liegt ein wesentlicher Vorteil der Verwendung eines Einflussbaumes in einer softwaregestützten Simulation der Auswirkungen hypothetischer Veränderungen von Einflussparametern. Kritische Parameter, Schädigungsmechanismen bzw. Strukturelemente – sogenannte Hot Spots – können somit identifiziert werden. Im Gegensatz zu einer herkömmlichen Brückenprüfung auf visueller Basis können über eine Simulation des Einflussbaumes auch Einflussparameter an nicht zugänglichen Stellen berücksichtigt werden und anschließend bei Neubauprojekten am realen Bauwerk entsprechende Messsensoren angeordnet werden.

Das Konzept des Einflussbaums ermöglicht die Anbindung der herkömmlichen RI-EBW-PRÜF Methode. Dazu müssen die Bewertungsskala des Einflussbaums und die logischen Verknüpfungen zwischen den Elementen entsprechend den Regeln der RI-EBW-PRÜF (siehe Tab. 7) angepasst werden. Darüber hinaus ist es möglich, Zustandsnoten als Parameter der Querschnittskomponente einzugeben und danach die Fortpflanzung der Bewertung bis zum Gesamtbauwerk zu berechnen.

Schadensbewertung „Standsicherheit“	
Bewertung	Beschreibung
0	Der Mangel/Schaden hat keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauteils/Bauwerks .
1	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Standsicherheit des Bauteils , hat jedoch keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauwerks . Einzelne geringfügige Abweichungen in Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen und geringfügige Abweichungen hinsichtlich der planmäßigen Beanspruchung liegen noch deutlich im Rahmen der zulässigen Toleranzen . Schadensbeseitigung im Rahmen der Bauwerksunterhaltung .
2	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Standsicherheit des Bauteils , hat jedoch nur geringen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauwerks . Die Abweichungen in Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen oder hinsichtlich der planmäßigen Beanspruchung aus der Bauwerksnutzung haben die Toleranzgrenzen erreicht bzw. in Einzelfällen überschritten . Schadensbeseitigung mittelfristig erforderlich.
3	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Standsicherheit des Bauteils und des Bauwerks . Die Abweichungen in Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen oder hinsichtlich der planmäßigen Beanspruchung aus der Bauwerksnutzung übersteigen die zulässigen Toleranzen . Erforderliche Nutzungseinschränkungen sind nicht vorhanden oder unwirksam. Eine Nutzungseinschränkung ist gegebenenfalls umgehend vorzunehmen. Schadensbeseitigung kurzfristig erforderlich.
4	Die Standsicherheit des Bauteils und des Bauwerks ist nicht mehr gegeben . Erforderliche Nutzungseinschränkungen sind nicht vorhanden oder unwirksam. Sofortige Maßnahmen sind während der Bauwerksprüfung erforderlich. Eine Nutzungseinschränkung ist umgehend vorzunehmen. Die Instandsetzung oder Erneuerung ist einzuleiten .

Tab. 7: Schadensbewertung nach RI-EBW (2007-11) für Standsicherheit

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Schlussbericht wurde ein neu entwickelter Modellierungsansatz für die Bauwerksprüfung und Zustandsbewertung für Brückenbauwerke vorgestellt, der eine detaillierte Abbildung von Schädigungsmechanismen ermöglicht. Einschränkungen bisher existierender Modellierungsansätze, wie z.B. Zuverlässigkeitsblockdiagramm, Logikdiagramm und Fehlerbaum, liegen in der binären Abbildung von Zuständen (das Bauteil versagt oder versagt nicht). Da die Einflüsse des Zustands eines Bauteils auf den Gesamtzustand des Bauwerks jedoch eine deutlich komplexere Modellierung erfordern, wurden diese existierenden Ansätze als nicht hinreichend bewertet.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen des hier dokumentierten Projekts ein neuer Ansatz entwickelt, der auf dem sogenannten Einflussbaum beruht. Der Einflussbaum erweitert das Konzept des Fehlerbaums um eine flexiblere Logische Verknüpfung. Im Gegensatz zu reinen Boole'schen Verknüpfungen kann dieses Element auf verschiedene Arten die komplexen Zusammenhänge des Einflusses von Schäden abbilden. Die Verknüpfungen können frei definierte Gleichungen bzw. Vorschriften beinhalten, mit deren Hilfe der Einfluss des Zustands eines untergeordneten Elements auf das übergeordnete Element beschrieben werden kann. Auf diese Weise können mit den Logischen Verknüpfungen sowohl einfache grenzwertbasierte als auch vollprobabilistische (zuverlässigkeitsbasierte) Zustandsbewertungen abgebildet werden. Eine Integration der Ergebnisse des Teilprojekts FE 15.0508 (Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen) in das erarbeitete Systemmodell ist somit möglich.

Der konzipierte Einflussbaum besteht aus drei Modellebenen: der Strukturebene, der Ebene der Schadensbilder und der Parameterebene. Die Strukturebene bildet die Struktur des Bauwerks ab und gibt die Untergliederung des Systems Brücke in Bauteile und Unterbauteile wider. Die Ebene der Schadensbilder beschreibt den Zusammenhang zwischen einem aufgetretenen Schaden und dem Zustand des betroffenen (Unter)bauteils und stellt die Verknüpfung mit messbaren Eingangsgrößen (Parametern) bereit, die in der untersten Ebene definiert wurden (Parameterebene). Für die Beschreibung aller Ebenen des Einflussbaums kommt die graphische Notationssprache SysML zum Einsatz.

Mithilfe von SysML und des resultierenden Einflussbaums können zum einen bestehende Schädigungsabläufe simuliert werden. Der Einflussbaum kann somit im Rahmen der Zustandsbewertung von Bauwerken eingesetzt werden und darüber hinaus als Prognosetool zur Ermittlung des künftigen Bauwerkszustands herangezogen werden.

Die durchgeführte Modellierungen und Simulationen wurden mithilfe der Software Sparx Enterprise Architect durchgeführt. Wichtigstes Entscheidungskriterium bei der Auswahl der Software war die Integration einer Simulations-Engine, welche die dynamische Auswertung von SysML-Parameterdiagrammen ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil der Modellierung mit SysML ist die Modularisierungsmöglichkeit von Teilen des Einflussbaums. Hierbei können Gruppen von Einflussbaumelementen als Modul definiert werden mit dem Ziel diese Gruppen wiederzuverwenden. Dies beschleunigt den Modellierungsprozess, weil der Planer nicht alle Elemente neu definieren muss, sondern komplett fertiggestellte Strukturteile in das Gesamtmodell einfügen kann. Module können beliebig vom Benutzer definiert werden oder von anderen Projekten übernommen werden. Ein Beispiel für ein Modul bilden die Schadensbilder mit den zugehörigen Parametern. Eine Erweiterung dieser Module ist deren Verknüpfung mit der zugehörigen Bauteilkomponente. Dadurch müssen nur Bauteile in das Modell eingefügt werden, und die dazugehörigen Schadens- und Parameterelemente werden automatisch hinzugefügt. Eine horizontale Gruppierung von Elementen ermöglicht eine schnelle Modellierung z.B. von verschiedenen Tragwerksystemen, wo nach der Auswahl des gewünschten Systems die nötigen Überbau- und Auflagersystemelemente automatisch generiert werden. Bei der Modularisierung ist von Vorteil, dass nicht nur die Struktur sondern auch die hinterlegten Logik-Elementen des Moduls unverändert in Systemmodelle für ähnliche Brückenbauwerke übernommen werden. Dies ermöglicht die schnelle Einbindung der Module in das Gesamtmodell.

Um das Vorgehen bei der Simulation eines Einflussbaums zu illustrieren, wurde eine einfache Brückenstruktur mit den Schädigungsmodellen der maßgeblichen Schädigungsmechanismen betrachtet. Zur Modellierung dieser Mechanismen wurden aus der Praxis bekannte Gleichungen und Ungleichungen eingesetzt und in den logische Verknüpfungen zwischen den Elementen des Einflussbaums abgebildet.

Die Simulationen wurden mit der gewählten Software Sparx Enterprise Architect durchgeführt. Dabei wurden die Logik-Elemente so erweitert, dass sie auch zusätzlich zu den Eingangswerte von der Parameterebene, weitere Parameter in das Modell einfließen lassen, um auf diese Weise beispielsweise Eigenschaften des Querschnitts und weitere allgemeine Eigenschaften des Bauwerks (z.B. Länge) berücksichtigt zu können. Die Umsetzung der logischen Verknüpfungen erfolgte mithilfe von sogenannten Constraint Blocks, die es ermöglichen, die hinterlegte Logik einer Verknüpfung als JavaScript-Code zu definieren.

Mithilfe des entwickelten Einflussbaums ist es möglich, HotSpots des Gesamtsystems zu identifizieren und damit kritische Querschnitte oder Bauteilkomponenten des Tragwerks zu erkennen. Auf Grundlage des ermittelten kritischen Querschnitts oder sensibler Bauteile können weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um die Zustandsentwicklung des betrachteten Bauteils oder des Gesamtsystems prognostizieren zu können. In diesem Zusammenhang erfolgte eine parametrische Untersuchung für das Gesamtsystem, mit deren Hilfe gezeigt wurde, dass die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Querschnitte zur Beurteilung des Zustands des Gesamtbauwerks sinnvoll und notwendig ist. Dies ermöglicht die Betrachtung von mehreren Eingangsparametern, und damit auch die Ermittlung des Zustands von mehreren Querschnitten des Tragwerks. Das führt zu einer genaueren Bezeichnung und detailliertere Modellierung des Gesamtsystems. Somit kann der Zustand des Gesamtmodells ebenfalls genauer ermittelt werden. Die Verwendung entsprechend mannigfaltiger Eingangsparameter eröffnet die Möglichkeit der Verbindung des Systemmodells mit entsprechend angeordneter Sensorik.

Das Hauptergebnis des Projekts FE15.038 ist ein neues, systemmodellbasiertes Bauwerkszustandsermittlungssystem, bezeichnet als Einflussbaum, welches die Berechnung des Zustands nicht nur für das Gesamttragwerk, sondern auch für dessen einzelne Komponenten ermöglicht. Für die Berechnungen können nicht nur deterministische, sondern auch probabilistische Methoden angewendet werden. Mithilfe des Einflussbaums ist es möglich, besonders sensible Teile des Tragwerks zu identifizieren. Diese Funktionalität bietet eine Entscheidungsgrundlage für die Platzierung von Sensoren.

Zusätzlich ist es möglich parametrische Untersuchungen durchzuführen, um die Zustandsentwicklung der aufgetretenen Schäden weiterzuerfolgen. Zudem können weitere Prognosen über den

Zustand des Gesamtbauwerks ermittelt werden. Im Vergleich der neuen Systemmodell-basierten Methode mittels Einflussbaum und einer herkömmlichen Bauwerksbewertung liegt der Hauptunterschied darin, dass eine Bewertung gemäß RI-EBW-PRÜF keine direkten Rückschlüsse auf die Ursachen des Schadens liefert. Eine Systemanalyse mit einem Einflussbaum zeigt hingegen den zugrundeliegenden Schädigungsmechanismus auf. Durch die neu entwickelte Methodik werden detailliert die Eingangsparameter für Schädigungen, die jeweiligen vorherrschenden Schädigungsprozesse und die betroffenen strukturellen Komponenten ermittelt. Dies trägt zu einem tieferen Verständnis der Zustandsentwicklung von Bauwerken bei und ermöglicht einerseits eine realitätsnahe Zustandsbeurteilung und andererseits auch eine Berücksichtigung des Erkenntnisgewinns in der Planung von Neubauten hinsichtlich potentieller Schwachstellen bzw. eines effektiven Einsatzes von Monitoringkonzepten.

Um einen leistungsstarken Einflussbaum benutzen zu können, müssen noch weitere für das Modell relevante Schädigungsmechanismen untersucht und parametrisch modelliert werden. Danach kann der Einbau dieser Mechanismen in den Einflussbaum als Schädigungsmodule erfolgen. Mithilfe dieses Einflussbaums kann eine detaillierte parametrische Untersuchung für eine Beispielbrücke durchgeführt werden und die Ergebnisse mit den Ergebnissen einer RI-EBW-PRÜF Bewertung evaluiert werden. Als Erweiterung des Einflussbaums können zunächst die deterministischen logischen Verknüpfungen zwischen den Elementen mit probabilistischen Ansätzen ersetzt werden und dadurch zuverlässigkeitsbasierte Bewertungen und Prognosen für das Bauwerk ermittelt werden. Die Umsetzung dieser Erweiterung und die Evaluierung der Ergebnisse anhand einer Beispielbrücke ist eines der Ziele des Projekts FE 15.0546.

Im Rahmen von zukünftigen Projekten sollte die Verknüpfung eines Einflussbaums mit einem am Bauwerk installierten Sensoriknetzwerk untersucht werden, um eine Identifizierung von neuen Schäden der Brücke und die Nachverfolgung von existierenden Schäden in Echtzeit zu ermöglichen.

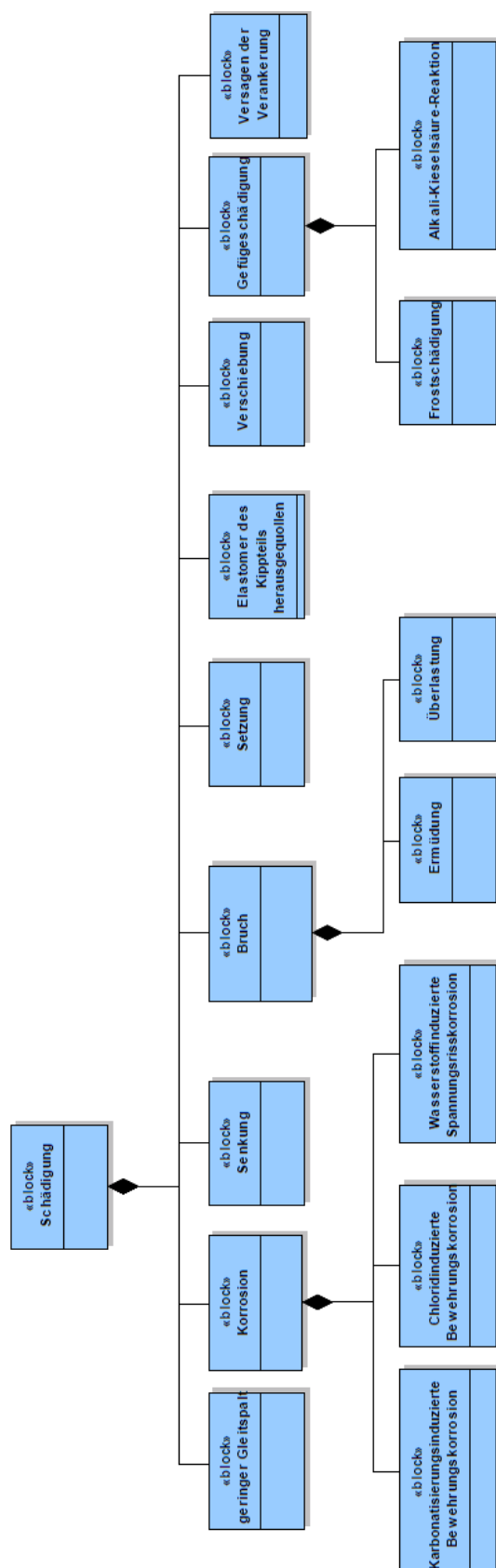
7 Literatur

- AHRENS, M.A.; MARK, P. (2011): Lebensdauer-simulation von Betontragwerken – Stochastische Strukturberechnungen über die Zeit am Beispiel einer gealterten Bogenbrücke. In: Beton- und Stahlbeton, Jg. 106, H. 4, S. 220–230.
- ASB-ING (2008-03): Anweisung Straßeninformati-onsbank Teilsystem Bauwerksdaten. Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung.
- BROOMFIELD, J. P. (2003): Corrosion of Steel in Concrete. Understanding investigation and repair: Taylor & Francis. DIN 1076, 1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung.
- DIN 25 419:1985-11: Ereignisablaufanalyse – Verfahren, graphische Symbole und Auswertung.
- DIN 25 424-1:1981-09: Fehlerbaumanalyse – Methoden und Bildzeichen.
- DIN 25 424-2:1990-04: Fehlerbaumanalyse – Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes.
- DIN 488-1:2009-09: Betonstahl – Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung.
- DIN EN 60812:2006-11: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und – auswirkungsanalyse (FMEA).
- DIN EN 61078:2006-10: Techniken für die Analyse der Zuverlässigkeit - Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Boole'sche Verfahren.
- DIN-FB 102, 2009-03: DIN-Fachbericht 102 - Betonbrücken.
- DURACRETE - The European Union - Brite EuRam III (Hg.) (1998): DuraCrete - Modelling of Degradation. DuraCrete - Probabilistik Performance based Durability Design on Concrete Structures. Contract BRPR-DT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R4-5.
- FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, A. (2008): A practical guide to SysML: the systems modeling language. Elsevier/Morgan Kaufmann, Boston.
- GEHLEN, C. (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Herausgegeben von Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin. (Heft 510).
- GEYER, P.; NEMETH, I.; LANG, W; WULFHORST, G.; SCHINABECK, J.; PRIESTER, R.: Systems modeling considering qualities and quantities for strategies of sustainable development of a livable urban district in Nuremberg, EG-ICE Konferenz 2012, München.
- HAARDT, P. (1999): Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, H. 22).
- HAARDT, P. (2010): Vom schadensbasierten zum zuverlässigkeitsorientierten Erhaltungsmanagement für Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen. In: Peil, U. (Hg.): Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung. Abschluss-Symposium 2010 - Sonderforschungsbereich 477, S. 11–16.
- KLINZMANN, C. (2008): Methodik zur computer-gestützten, probabilistischen Bauwerksbewertung unter Einbeziehung von Bauwerksmonitoring. Dissertation. Braunschweig. Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz.
- MEHLHORN, G.(2007): Handbuch Brücken - Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten, Springer-Verlag Berlin, ISBN 3-540-29659-X
- MINER, M.-A (1945): Cumulative Damage in Fatigue. In: Journal of Applied Mechanics, Jg. 12, S. A159-A164.
- MÜLLER, H. S.; VOGEL, M. (2009): Lebensdauerprognose für Betonbrücken - Wo stehen wir heute? In: Stritzke, J. (Hg.): 19. Dresdner Brückenbausymposium - Tagungsband. Dresden: Inst. für Massivbau, S. 261–275.
- NOVAK, B.; BROSGE, S.; REICHERT, F. (2002): Weiterentwicklung von Verhaltensmodellen im Rahmen des BMS. Schlussbericht zum F+E-Projekt FE 15.370/2002/HRB der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- PALMGREN, A. (1924): Die Lebensdauer von Kugellagern. In: Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, Jg. 68, S. 339–341.
- RI-EBW-PRÜF (2007-11): Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076. Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung.
- SARJA, A.; VESIKARI, E. (1996): Durability design of concrete structures. Report of RILEM Technical Committee 130-CSL. 1. ed. London: Spon. (RILEM reports, 14).

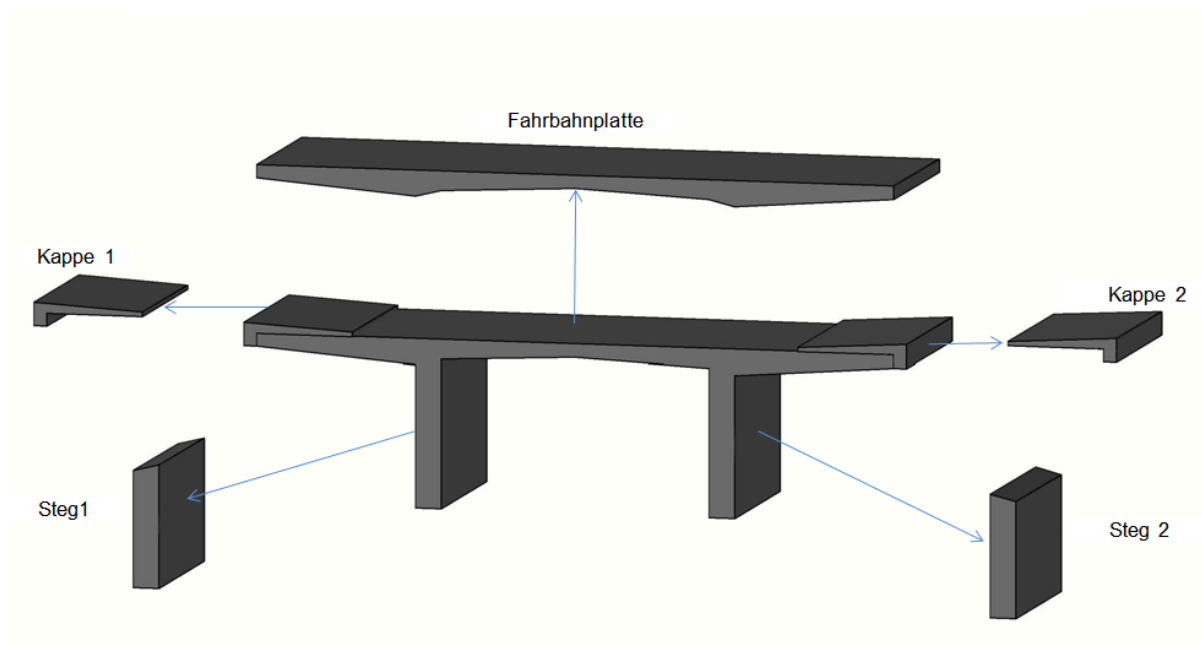
- SCHIEßL, P. (1976): Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons. Herausgegeben von Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin. (Heft 255).
- SCHIEßL, P. (1986): Einfluß von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen. Herausgegeben von Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin. (Heft 370).
- SCHIEßL, P.; MAYER, T. (2007): Lebensdauer-managementsystem - Teilprojekt A2. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.): Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens "Nachhaltig Bauen mit Beton". Berlin (Heft 572).
- THÖNS, S.; STRAUB, D.; SCHNEIDER, R.; FISCHER, J. (2012): Intelligente Bauwerke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen. Sachstandsbericht zum F+E-Projekt FE 15.0508/2011/KRB der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht).
- TUUTTI, K. (1982): Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm.
- VDI 4001-Blatt 2:2006-07: Terminologie der Zuverlässigkeit.
- VDI 4003:2007-03: Zuverlässigkeitsmanagement.
- VDI 4008-Blatt1:1986-05: Voraussetzungen und Anwendungsschwerpunkte von Zuverlässigkeitsanalysen.
- VDI 4008-Blatt2:1998-05: Boolesches Modell.
- VDI 4008-Blatt6:1999-04: Monte-Carlo-Simulation.
- VDI 4008-Blatt7:1986-05: Strukturfunktion und ihre Anwendung.
- VOLKWEIN, A. (1991): Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chloriden in Beton. Dissertation. München. Technische Universität München, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung.
- WPM-Ingenieure (ohne Jahr): SIB-Bauwerke. DV-Programm zur Erfassung, Speicherung und Auswertung von Bauwerksdaten.
- WYMORE, W. (1993): Model-Based Systems Engineering, Boca Raton, FL: CRC Press.
- ZILCH, K.; ZEHETMAIER, G. (2010): Bemessung im konstruktiven Betonbau. Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2). 2., neu bearb. u erw. Aufl. Berlin: Springer.

8 Anhang

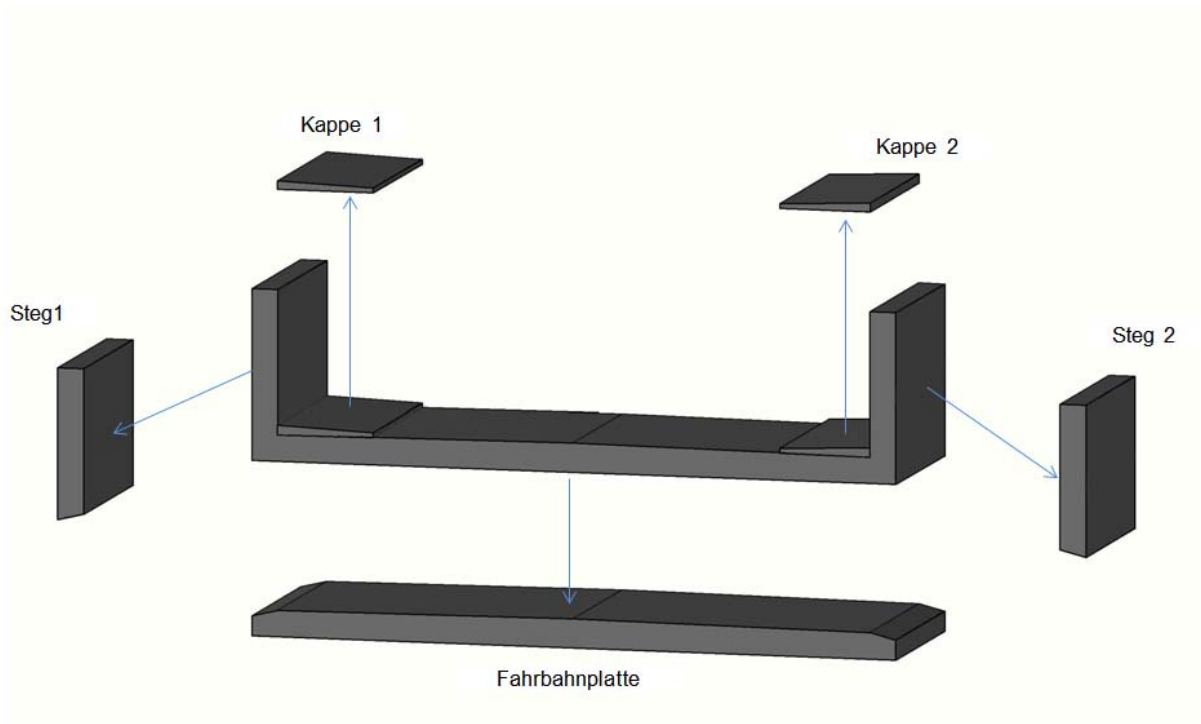
Strukturierung der Schadensbilder:



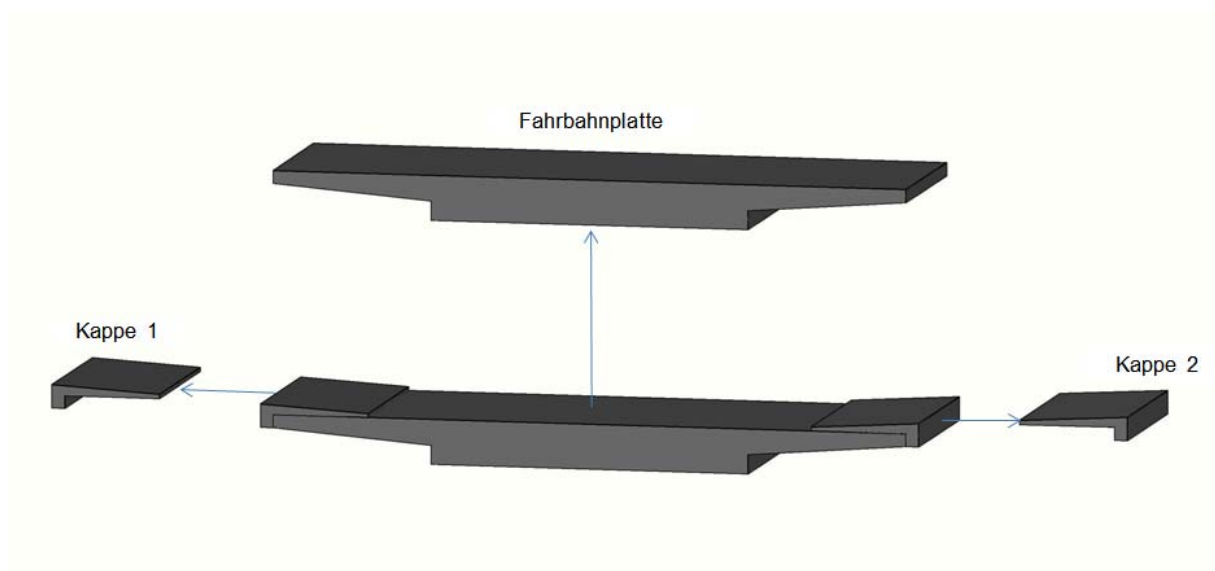
Systembeschreibung Plattenbalkenquerschnitt



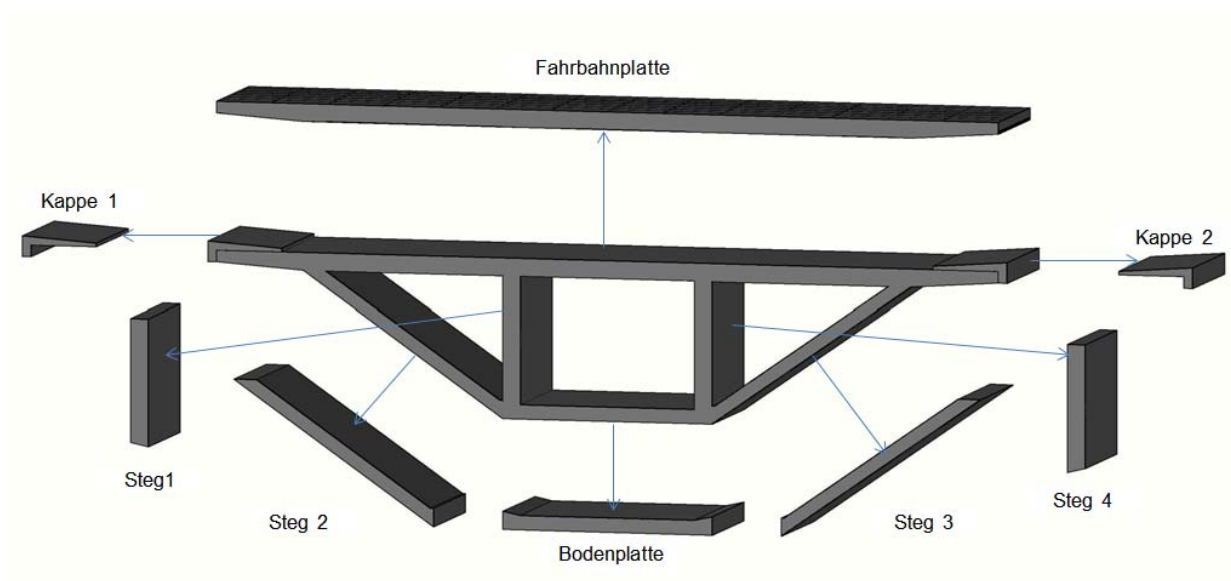
Systembeschreibung Trogquerschnitt



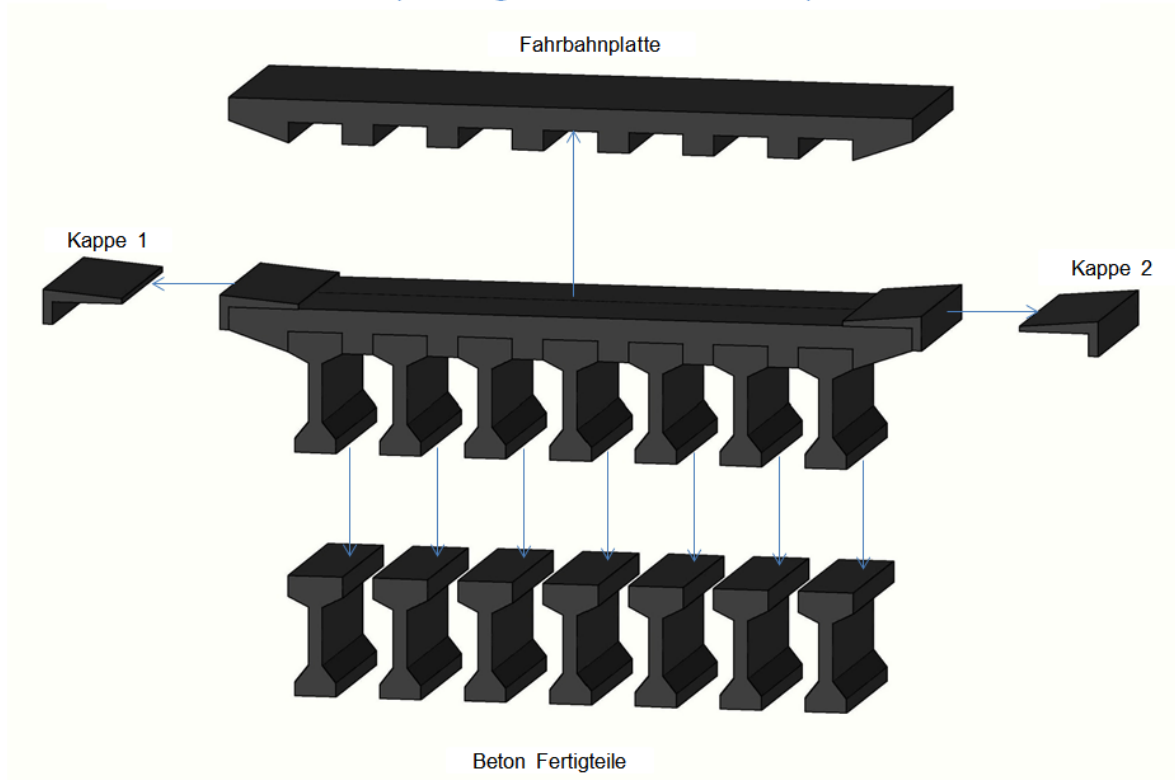
Systembeschreibung Massivplattenquerschnitt



Systembeschreibung Hohlkastenquerschnitt (mehrzellig verbunden)



Systembeschreibung Plattenbalkenquerschnitt (Fertigteilkonstruktion)



Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau

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 Expositions-kategorie 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, Staack € 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 Expositions-kategorie XF4
Bramshuber, 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.
Friese, 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
Weschpennig, 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 Eurocodes
Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“
Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“
Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“
Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“
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 Spannbetonbalken 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 € 15,50

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln
Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse
Müller, Vogel, Neumann € 14,50

B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand
Freundt, Böning € 16,00

B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00

B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00

B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50

B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton
Nguyen, Freitag € 13,50

2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen

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

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle in Vorbereitung

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn in Vorbereitung

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid in Vorbereitung

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken
Briebrecher, Städing in Vorbereitung

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
Borrmann, Fischer, Dori, Wild

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.

