

Lebensdauerprognose für Betonbrücken – Wo stehen wir heute?

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller ¹⁾

Dipl.-Ing. Michael Vogel ²⁾

¹⁾ SMP Ingenieure im Bauwesen GmbH, Karlsruhe

²⁾ Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH)

Zusammenfassung

Betonbrücken unterliegen vielfältigen und hohen Beanspruchungen aus nutzungs- und umweltbedingten Einwirkungen, die insbesondere aus Witterung, Verkehrsbelastung, Verkehrsabgasen und Tausalzen resultieren. Die hierdurch ausgelösten Schäden nehmen mit der Bauwerkslebensdauer zu und verursachen erhebliche Kosten, insbesondere wenn die Instandhaltung durch zufällig eintretende Schäden bestimmt wird und nicht auf der Berechnung des fortschreitenden Dauerhaftigkeitsverlustes beruht. Das Ziel der Bemessung von Brücken muss darin bestehen, die Gesamtkosten unter Berücksichtigung der planmäßigen Nutzungsdauer zu minimieren. Dies setzt jedoch voraus, dass die Schadensentwicklung zuverlässig prognostiziert wird, was heute in einem erheblichen Maße bereits möglich ist. Dabei ist es von großem Nutzen, wenn keine deterministischen, sondern probabilistische Aussagen getroffen werden. Erst hierdurch wird es möglich – in ingenieurmäßiger Form – einen definierten Grenzzustand mit einem entsprechenden Zuverlässigkeitsniveau zu versehen. In diesem Beitrag werden die Grundlagen der Lebensdauerprognose und Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken aufgezeigt. Dabei fließt der aktuelle wissenschaftliche Kenntnisstand auf dem Gebiet der Modellierung dauerhaftigkeitsrelevanter Schädigungsprozesse bei Brückenkonstruktionen aus Beton ein.

1 Lebensdauerprognose als zentrales Element der Lebenszyklusanalyse

Die Lebenszyklusanalyse erlangt erst allmählich im Betonbau die ihr innewohnende Bedeutung. Dabei versteht man unter einer Lebenszyklusanalyse im Allgemeinen die Erfassung, Analyse und meist monetäre Quantifizierung und Bewertung aller Aufwendungen für die Herstellung, Nutzung und ggf. für den Rückbau einer Baukonstruktion im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung über die gesamte Nutzungs- bzw. Lebensdauer (Lebenszyklus), siehe Bild 1.

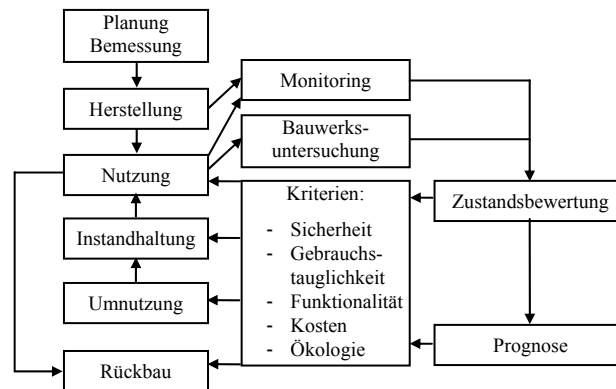


Bild 1: Lebenszyklus eines Bauwerks in Verbindung mit Zustandserfassung, Prognose und Entscheidungskriterien

Das primäre Ziel einer Lebenszyklusbetrachtung liegt in der Erhaltung des bestmöglichen Zustands eines Bauwerks während seiner planmäßigen Nutzungsphase bei geringst möglichem Kapitaleinsatz. Insbesondere das Monitoring und/oder Bauwerksuntersuchungen sowie die hierauf aufbauende Zustandsbewertung und Lebensdauerprognose ermöglichen eine technisch und wirtschaftlich optimierte Instandhaltung. Das zentrale Element innerhalb einer Lebenszyklusanalyse bildet die probabilistische Lebensdauerprognose, die im Nachfolgenden beleuchtet werden soll.

2 Beurteilung und Prognose der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken

Nach DIN 1045-1 wird i. d. R. die Dauerhaftigkeit eines Tragwerks als sichergestellt angesehen, wenn u. a. die Anforderungen an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Betons gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 eingehalten sind. Dabei werden zunächst den erwarteten Umgebungsbedingungen eines Bauteils die jeweils entsprechenden Expositionsklassen zugewiesen. Diesen Expositionsklassen, die Einwirkungen darstellen, werden danach als Widerstände betontechnologische Mindestanforderungen zugeordnet, die als Grenzwerte eingehalten werden müssen.

Diesem so genannten „deskriptiven“ Bemessungskonzept in DIN 1045-2 liegt eine erwartete mittlere Nutzungsdauer von 50 Jahren – unter Berücksichtigung eines „angemessenen“ Instandhaltungsaufwands – zugrunde. Dabei beruhen die betontechnologischen Angaben der Norm auf Erfahrungswerten. Eine ingenieurmäßige Bemessung auf Dauerhaftigkeit, d. h. der rechnerische Nachweis für eine bestimmte Lebensdauer, ist nicht vorgesehen. Somit führt die Anwendung der Norm zu unwirtschaftlichen und/oder mangelhaften bautechnischen Lösungen, wenn die Nutzungsdauer eines Bauwerks z. B. nur 10 Jahre oder aber 100 Jahre betragen soll.

Ein weiterer wesentlicher Nachteil des deskriptiven Konzeptes besteht darin, dass dem planenden Ingenieur nicht ersichtlich ist, mit welcher Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit ein Bemessungswert über- oder unterschritten wird. Des Weiteren bleibt dem Anwender des deskriptiven Konzeptes verborgen, welcher Sicherheitsabstand zwischen Einwirkung und Widerstand vorliegt. Abhilfe schaffen kann hier ein geeignetes Performance-Konzept, welches auf einer probabilistischen Basis – analog der Bemessung auf Tragfähigkeit – das Dauerhaftigkeitsverhalten einer Betonkonstruktion beschreibt [1]. Ein solches Konzept wird im Folgenden näher betrachtet.

Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen der Lebensdauerprognose für ein bereits bestehendes Brückenbauwerk und der Bemessung auf Dauerhaftigkeit (Lebensdauer) bei einem neu zu errichtenden Bauwerk. Hinsichtlich der wesentlichen Elemente einer Lebensdauerprognose bzw. Dauerhaftigkeitsbemessung – Schädigungs-Zeit-Gesetze, probabilistische Methodik, Grenzzustandsdefinitionen und -betrachtungen etc. – und ihrer Anwendung bestehen jedoch keine Unterschiede.

Zur Durchführung einer Lebensdauerprognose für ein bestehendes Brückenbauwerk sind die Kenntnis seines aktuellen Zustands und die aus den jeweiligen Schädigungsmechanismen resultierenden weiteren Schadensverläufe unerlässlich. Ausreichende Informationen über die maßgebenden Zusammenhänge zwischen Umwelteinwirkungen einerseits und Bauwerkswiderständen (z. B. Betoneigenschaften) andererseits bilden die Grundlage für eine Herleitung bzw. Verwendung wirklichkeitsnaher Einwirkungs- bzw. Widerstandsmodelle. Letztere entsprechen den benötigten Materialgesetzen.

Bei neu zu errichtenden Brücken, also bei der Bemessung auf Lebensdauer, entfällt zwar die Bauwerksuntersuchung, dafür aber sind die verwendeten Betone und der Herstellungsprozess (z. B. realisierte Betondeckung, Umgebungsklima, Nachbehandlung etc.) näher zu betrachten. Hinzu kommen die verbesserten Möglichkeiten für die Installation eines Monitoringsystems, welches Zustandsänderungen bei Bauteilen erfasst, insbesondere in der Einleitungsphase der Schadensausbildung. Die nachfolgenden Ausführungen, die einen exemplarischen Charakter besitzen, beziehen sich vorrangig auf die Prognose der Lebensdauer bestehender Bauwerke.

Der zeitlich veränderliche Zustand eines Bauteils lässt sich anhand einer für den jeweiligen Schädigungsprozess gültigen Einwirkungs- und Widerstandsfunktion (E bzw. R) beschreiben, siehe Bild 2, oberes Diagramm. Da sowohl die Einwirkungen als auch die Widerstände Streuungen unterliegen können, wie durch die Verteilungskurven angedeutet wird, müssen die jeweiligen physikalischen Modelle probabilistisch formuliert sein. Die Größe des mit der Zeit zunehmenden Überschneidungsbe-

reichs der beiden Verteilungskurven bildet ein Maß für die Schädigungswahrscheinlichkeit (Versagenswahrscheinlichkeit, P_f).

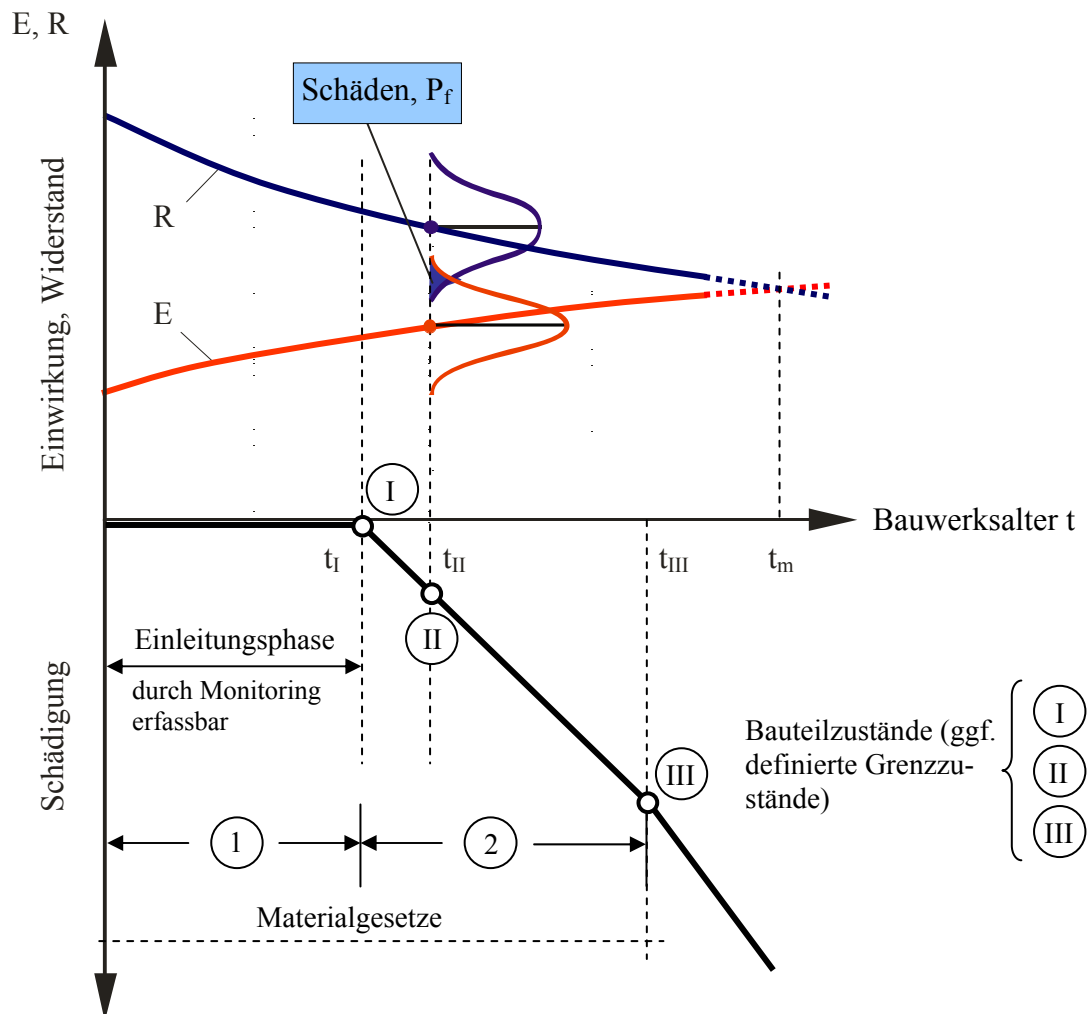


Bild 2: Zustandsentwicklung eines Betonbauteils infolge veränderlicher Einwirkung und veränderlichem Widerstand

Der an Betonbauteilen zu erwartende bzw. identifizierte Schädigungsprozess für einen bestimmten dauerhaftigkeitsrelevanten Angriff kann prinzipiell in verschiedene Schädigungsphasen unterteilt werden. Dabei gehorchen die einzelnen Phasen üblicherweise unterschiedlichen Materialgesetzen. Bild 2 (unteres Diagramm) veranschaulicht die mit dem Bauwerksalter verbundene zunehmende Schädigung und definiert maßgebende Bauteilzustände (Grenzzustände). Weitere Zusammenhänge werden nachfolgend erläutert.

3 Wesentliche Grundlagen

Eine Bemessung auf Dauerhaftigkeit bzw. die Prognose der Lebensdauer erfordert neben der Kenntnis der Einwirkungs- und Widerstandsfunktion für die jeweils betrachteten Beanspruchungen die Berücksichtigung verschiedener statistischer Kenngrößen und die Anwendung probabilistischer Prozeduren. Bei letzteren handelt es sich um „Werkzeuge“, die heute verfügbar sind, deren Benutzung dem Ingenieur aber noch nicht vertraut ist. Vergleichbar ist dies mit der Einführungen von FE-Methoden im konstruktiven Ingenieurbau, die anfangs ausschließlich von universitären Einrichtungen beherrscht wurden, heute inzwischen aber von jedem Ingenieur sicher gehandhabt werden können und selbst auf Taschenrechnern verfügbar sind.

3.1 Schädigungs-Zeit-Gesetze

Schädigungs-Zeit-Gesetze beschreiben den zeitlichen Verlauf einer Schädigung. Sie werden auch als Materialmodelle, Materialgesetze oder Stoffgesetze bezeichnet. Eine zielsichere Lebensdauerprognose für ein Bauteil hängt entscheidend davon ab, wie genau das gewählte Schädigungs-Zeit-Gesetz die chemisch/physikalischen Vorgänge, die in der Realität ablaufen, abbildet bzw. beschreibt. Derzeit existieren vor allem Schädigungs-Zeit-Gesetze, die hinreichend genau Veränderungen (den „Schädigungsverlauf“) für den Zeitraum der Einleitungsphase beschreiben können (vgl. Bild 2). Geeignete Modelle zur Beschreibung der physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten im Beton sind beispielsweise das Karbonatisierungsmodell und das Modell für die Chloriddiffusion, die innerhalb des Brite EuRam III-Projektes (DuraCrete) entwickelt worden sind [2, 3, 4]. Sie beschreiben das Vorschreiten der Karbonatisierungs- bzw. der Chloridfront in den Beton hinein. Dieser Einwirkung steht als Widerstand u. a. die Betondeckung gegenüber. In Bezug auf Bild 2 wären z. B. die Einwirkung als Funktion $E(t) = d_c(t)$ und der Widerstand als $R(t) = c = \text{konst.}$ darzustellen, mit d_c = Karbonisierungstiefe und c = Betondeckung.

3.2 Statistische Quantifizierung der Modellparameter

Die meisten Parameter der jeweiligen Einwirkungs- als auch der Widerstandsfunktion bzw. der Materialmodelle sind keine festen Werte, sondern streuende Größen. Daher ist es notwendig, eine statistische Quantifizierung für diese Parameter durchzuführen. Hierzu sind eingehende Baustoff- bzw. Betonuntersuchungen bei neu zu errichtenden Bauwerken sowie zusätzliche Bauteiluntersuchungen bei bereits bestehenden Bauwerken unerlässlich. Sie liefern die wesentlichen statistischen Kennwerte.

Dies sind i. d. R. der Typ der Verteilungsfunktion (z. B. die Normalverteilung), der Mittelwert und die Standardabweichung.

3.3 Schädigungsprozesse und Grenzzustände

Ein an Betonbauteilen identifizierter Schädigungsprozess ist meist durch verschiedene Schädigungsphasen charakterisiert, wobei jede Schädigungsphase ggf. mit einem eigenen Schädigungs-Zeit-Gesetz beschrieben werden muss. Bild 2 (unteres Diagramm) beschreibt die mit der Zeit zunehmende Schädigung und zeigt mögliche Grenzzustände. Dabei kennzeichnet einen Grenzzustand, dass bei seiner Überschreitung festgelegte Nutzungsbedingungen für ein Bauteil oder Tragwerk nicht mehr eingehalten sind. Im Fall einer karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion ist ein möglicher Grenzzustand erreicht, wenn der passivierende Schutz des Bewehrungsstahls aufgehoben wird, d. h. wenn die Karbonatisierungsfront den Bewehrungsstahl erreicht hat und damit das Ende der Einleitungsphase eingetreten ist.

3.4 Versagenswahrscheinlichkeit und Nutzungsdauer

Anhand der Gegenüberstellung von Widerstand R und Einwirkung E , die bei Dauerhaftigkeitsbetrachtung meist zeitvariabel sind, ist es möglich, die Grenzzustandsfunktion G zu formulieren, siehe Gleichung (1):

$$G = R - E \quad (1)$$

Die Funktion G stellt die elementare Form einer Zustandsfunktion dar, wobei R und E in Gleichung (1) Zufallsvariablen sind. Nimmt G den Wert Null an, ist der Grenzzustand gerade erreicht. Werden die Zufallsvariablen R und E der Grenzzustandsfunktion G als stochastisch unabhängig und normalverteilt angenommen und mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ beschrieben, lassen sich die stochastischen Eigenschaften der Funktion G in Form einer Verteilungsfunktion darstellen, siehe Bild 3.

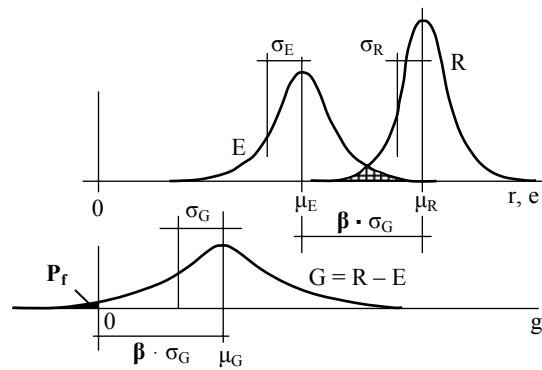


Bild 3: Grenzzustandsfunktion G , Versagenswahrscheinlichkeit P_f und Zuverlässigkeitsindex β

Mit der Einführung des so genannten Zuverlässigkeitsindex β (auch Sicherheitsindex genannt) kann ein direkter Zusammenhang zwischen der Versagenswahrscheinlichkeit P_f und dem Zuverlässigkeitsindex β hergestellt werden. Bei normalverteilter Grenzzustandsfunktion G kann die Versagenswahrscheinlichkeit P_f mit Gleichung (2) direkt ermittelt werden:

$$P_f = P(G \leq 0) = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

In Gleichung (2) ist $\Phi(\cdot)$ die Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung. Der Zusammenhang zwischen dem Zuverlässigkeitsindex β und der Versagenswahrscheinlichkeit P_f ist aus Tabelle 1 ersichtlich. Die bei Materialprüfungen beispielsweise häufig herangezogene Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f = 5 \cdot 10^{-2}$ (5 %-Quantil) entspricht in diesem Fall dem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 1,645$. Da P_f eine Funktion der Zeit ist (siehe Bild 2), hängt auch β von der Zeit ab (siehe Bild 5).

Tabelle 1: Beziehung zwischen dem Zuverlässigkeitsindex β und der Versagenswahrscheinlichkeit P_f [5]

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Liegen mehrere oder beliebig verteilte Variablen und/oder nichtlineare Grenzzustandsfunktionen vor, werden Näherungsverfahren (z. B. FORM = First Order Reliability Method) zur Ermittlung der Zuverlässigkeit bzw. Versagenswahrscheinlichkeit angewandt.

Da Dauerhaftigkeitsprobleme an Betonkonstruktionen mit zeitabhängigen Schädigungsprozessen verbunden sind, muss zur Beurteilung der Bauteilzuverlässigkeit ein Bezugszeitraum (Nutzungsdauer) angegeben werden. Die Nutzungsdauer eines Bauwerks ist eine Planungsgröße. Ingenieurbauwerke,

wie beispielsweise Brücken oder Tunnel, werden planmäßig für einen Nutzungszeitraum von 100 Jahren und mehr ausgelegt.

Die Tabelle 2 enthält Zielwerte für den Zuverlässigkeitsindex β für ein Bauwerkselement und bei einer geplanten Nutzungsdauer bis zum Erreichen des Grenzzustandes der Gebrauchsfähigkeit. Die Abstufung der Werte des Zuverlässigkeitsindex β in Tabelle 2 spiegelt die Tatsache wider, dass bei einem im Zuge der Bauwerkserstellung bereits getätigten großen Aufwand zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit eines Betonbauteils (z. B. Betonqualität oder Nachbehandlungsdauer) die Wahl eines niedrigen Zuverlässigkeitsniveaus zum Ende der beabsichtigten Nutzungsdauer des Bauteils gerechtfertigt ist.

Tabelle 2: Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β nach [6]

Zuverlässigkeitsindex β (Zielwert)	Kosten für Sicherheitsmaßnahmen
1,3	hoch
1,7	mittel
2,3	niedrig

Unter Anwendung der oben aufgeführten Zusammenhänge gelingt es, die zeitabhängige Wahrscheinlichkeit, wann ein zuvor definierter Grenzzustand erreicht wird, zu berechnen. Das Erreichen des Grenzzustands wird als „Versagen“ eingestuft. Bei Dauerhaftigkeitsbetrachtungen handelt es sich i. d. R. nicht um ein tatsächliches Versagen der Konstruktion, sondern um einen ungewollten Bauteilzustand (Schadensausmaß), der vor dem Hintergrund ökonomischer Überlegungen nicht überschritten werden sollte.

4 Vorgehensweise zur Lebensdauerprognose

Die Prognose der Lebensdauer kann sich auf einzelne Bauteile beschränken, sich aber auch auf ganze Bauwerke beziehen, die aus verschiedenen Bauteilen bestehen und unterschiedlichen dauerhaftigkeitsrelevanten Beanspruchungen unterworfen sein können. Nachfolgend wird die Vorgehensweise zur Lebensdauerprognose für beide Fälle in ihren Grundzügen aufgezeigt.

4.1 Lebensdauerprognose für Bauteile

Die Herangehensweise zur Erstellung einer Lebensdauerprognose für Bauteile untergliedert sich in mehrere Arbeitsschritte, die in der nachfolgenden Tabelle 3 aufgeführt sind.

Tabelle 3: Arbeitsschritte zur Durchführung einer Lebensdauerprognose

I	<p>Bauteil- bzw. Bauwerksuntersuchungen:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Identifikation des Bauteil- bzw. Bauwerkzustands bzw. der Schäden ^{*)} 2. Bestimmung relevanter Materialparameter des Bauteilbetons 3. Erfassung, Klassifizierung und Quantifizierung der Einwirkungen $E(t)$ und der Widerstände $R(t)$ 4. Identifikation der Schädigungsart zur Festlegung geeigneter Schädigungs-Zeit-Gesetze 5. Statistische Quantifizierung der Parameter des Berechnungsmodells
II	<p>Festlegungen zum Bauteil bzw. Bauwerk:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Definition von Grenzzuständen für entsprechende Schädigungsprozesse 7. Festlegung der Nutzungsdauer und der zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit bzw. der erforderlichen Zuverlässigkeit
III	<p>Analytisch-statistische Untersuchungen:</p> <ol style="list-style-type: none"> 8. Statistische Modellierung der Parameter der Einwirkungs- und Widerstandsfunktion 9. Berechnung der grenzzustandsbezogenen Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit 10. Abschätzung der Lebens- bzw. Restlebensdauer des betreffenden Bauteils bzw. des Bauwerks

^{*)} entfällt bei der Lebensdauerbemessung für ein neues Bauwerk

Die Arbeitsschritte 4 bis 7 aus Tabelle 3 wurden in Kapitel 3 bereits näher erläutert. Die Schritte 8 bis 10 werden im Folgenden an Fallbeispielen aufgezeigt.

Zuvor sei in Bezug auf Tabelle 3 nochmals darauf hingewiesen, dass bei der Lebensdauerprognose für eine neu zu errichtende Konstruktion die Arbeitsschritte unter I nur geringfügig zu modifizieren sind. Im Wesentlichen entfällt nur der Teilschritt I.1. Gewisse Änderungen in der jeweils konkreten Vorgehensweise ergeben sich insbesondere bei den Teilschritten I.2, I.4 und I.5.

4.1.1 Bestehendes Brückenbauwerk

Nachfolgend wird für den möglichen Schadensfall der karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion die Ermittlung der grenzzustandsbezogenen Restnutzungsdauer exemplarisch anhand einer bestehenden Betonbrücke (Überbau) aufgezeigt. In Bild 4 ist beispielsweise ein Brückenüberbau zu sehen, welcher der dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkung „Karbonatisierung“ ausgesetzt war. Die Folge der eingetretenen karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion ist ein Absprengen der Betondeckung über den korrodierenden Bewehrungsstählen.



Bild 4: Betonabplatzungen an einer Stahlbetonbrücke infolge karbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion

Die exemplarische Berechnung der Depassivierungswahrscheinlichkeit P_f für die Bewehrung der betrachteten Stahlbetonbrücke wird nachfolgend unter Verwendung der Software STRUREL [7] aufgezeigt. Die in das Programm implementierte Grenzzustandsfunktion ist durch die Gleichung (2) definiert. Der Soll-Zeitraum (Nutzungsdauer) bis zum Erreichen des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit wurde mit $t = 100$ Jahre angenommen. Der Zielwert des Zuverlässigkeitsindex wurde im hier gewählten Rechenbeispiel mit $\beta = 1,7$ festgelegt (vgl. Tabelle 1) und entspricht einer Depassivierungswahrscheinlichkeit von ungefähr 5 %, die nach 100 Jahren erreicht bzw. nicht überschritten werden soll. Die Betondeckung beträgt im Mittel $c = 39$ mm und ist log-normal verteilt. Die Wahl des Schädigungs-Zeit-Gesetzes unter Berücksichtigung der vorliegenden Betoneigenschaften sowie die Parametrisierung erfolgten anhand von Angaben in der entsprechenden Fachliteratur [3].

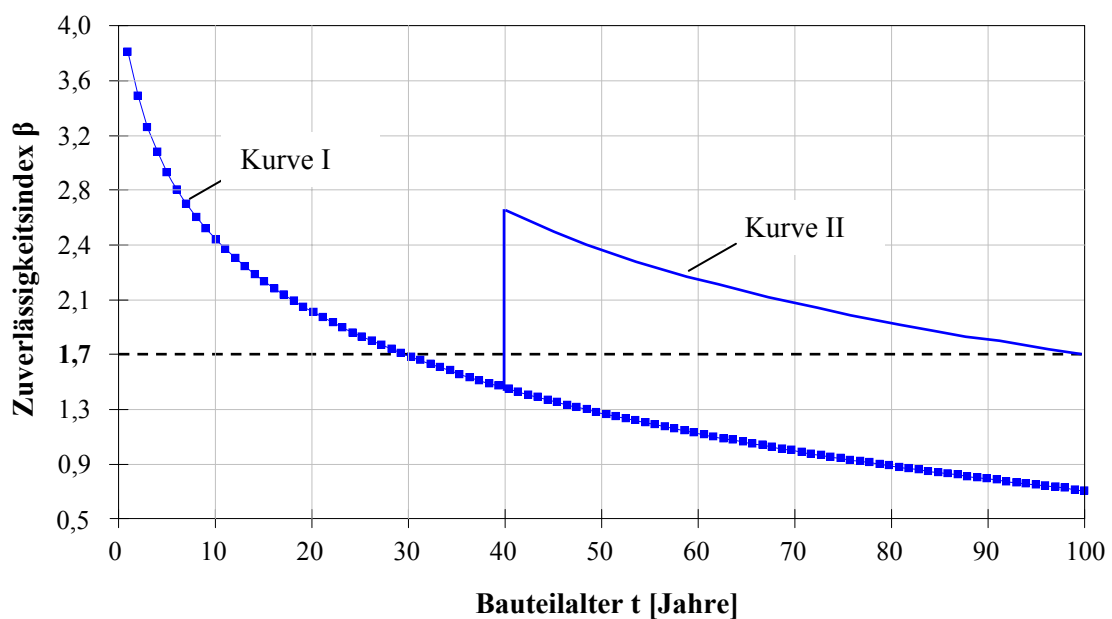


Bild 5: Zeitabhängiger Verlauf der grenzzustandsbezogenen Bauteilzuverlässigkeit für die Schädigungsursache Karbonatisierung ohne (Kurve I) und mit Instandsetzung nach 40 Jahren (Kurve II)

Die Darstellung des gewonnenen Berechnungsergebnisses (Kurve I) in Bild 5 zeigt, dass der geforderte Zuverlässigkeitsindex β von 1,7 zum Zeitpunkt $t = 100$ Jahre unterschritten wird. Bereits nach $t \approx 30$ Jahren wird der Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung“ mit der festgelegten Wahrscheinlichkeit von etwa 5 % erreicht. Wäre beispielsweise ein höherwertiger Beton verwendet worden, so würde sich der Verlauf der Kurve I derart ändern, dass sie um ein bestimmtes Maß nach oben verschoben wird (höhere β -Werte) und damit nach 100 Jahren der Zuverlässigkeitsindex von 1,7 nicht unterschritten wird. Andere Ergebnisse erhält man auch für geänderte Kennwerte der Betondeckung.

Die Zuverlässigkeit einer Prognose kann durch Bauteiluntersuchungen oder ein adäquates Monitoring laufend verbessert werden (Bayessches Updating). Ebenfalls können die Auswirkungen von Instandsetzungsmaßnahmen abgeschätzt werden, siehe Kurve II in Bild 5. So gewährleistet die hier exemplarisch im Bauteilalter von 40 Jahren durchgeführte Instandsetzung, dass die Zuverlässigkeit am Ende der Lebensdauer den Zielwert nicht unterschreitet.

4.1.2 Neu erstelltes Bauwerk – Dauerhaftigkeitsbemessung

Die Überprüfung von in der Planung vorgegebenen konstruktiven und betontechnologischen Maßnahmen zur Sicherstellung der geforderten Dauerhaftigkeit eines betrachteten Bauteils bzw. Bauwerksbereichs ist ein wesentlicher Bestandteil einer umfassenden Lebenszyklusanalyse. Hierzu sind die zu ermittelnden Kenngrößen, die nach Erstellung des Bauteils oft mit zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden gewonnen werden können, in die ursprüngliche Lebensdauerbemessung aufzunehmen. Anschließend kann unter Verwendung dieser „richtigen“ Kenngrößen die anfängliche Zuverlässigkeitsanalyse präzisiert werden.

Als Beispiel wird hier die Betondeckung eines Brückenüberbaus herangezogen. Gerade die Betondeckung unterliegt vielfältigen materialbedingten und fertigungstechnischen Einflüssen. Dabei ist sie als Widerstandsparameter für die Dauerhaftigkeit von zentraler Bedeutung.

Die Tabelle 4 fasst die Ergebnisse einer statistischen Analyse zum Einfluss der Betondeckung zusammen. Hierbei entspricht der Fall A dem projektierten Zustand, bei dem von einer mittleren Betondeckung von $c = 55$ mm und einer Standardabweichung von $s = 5$ mm ausgegangen worden war. In Ver-

bindung mit dem eingesetzten Beton wird damit nach einer Nutzungsdauer von 100 Jahren der angestrebte Zuverlässigkeitsindex von $\beta \approx 1,7$ erreicht, was der Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f = 4,5\%$ entspricht.

Tabelle 4: Parameterstudie zum Einfluss der Betondeckung bei einem Brückenüberbau auf dessen Lebensdauer. Der Fall A entspricht der Planung

Fall	Betondeckung		Zuverlässigkeitsanalysen		
	Mittelwert \bar{x} [mm]	Standard- abweichung s [mm]	Zuverlässig- keitsindex β [-]	Versagens- wahrschein- lichkeit P_f [%]	Erreichen des Grenzzustan- des $\beta = 1,7$ [Jahr]
A	55	5	1,7	4,5	100
B	55	15	1,5	7,1	74
C	45	5	1,3	9,9	62

Bei der Betrachtung des Falles B wird angenommen, dass bei der Herstellung des Betonbauteils die geforderte mittlere Größe der Betondeckung zwar eingehalten wird, jedoch die Maßhaltigkeit eine geringe Qualität aufweist, was sich in einer Verdreifachung der Standardabweichung auf $s = 15$ mm ausdrückt. Als Folge ist die Versagenswahrscheinlichkeit (Umfang der Depassivierung) nach 100 Jahren um das 1,6-fache auf $P_f \approx 7\%$ gestiegen. Anders betrachtet bedeutet dieses Ergebnis, dass das vorgegebene Sicherheitsniveau von $\beta = 1,7$ bereits nach 74 Jahren Nutzungsdauer unterschritten wird. Um dieses Sicherheitsniveau bis zum Ende der Nutzungsdauer dennoch zu halten, müssten also Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Beim Fall C sei bei der Bauteilherstellung die geforderte Betondeckung versehentlich zu gering ausgeführt worden ($\bar{x} = 45$ mm statt $\bar{x} = 55$ mm), wobei die Maßhaltigkeit mit $s = 5$ mm jedoch eingehalten wurde. Bei dieser Abweichung von den Planvorgaben ist die Versagenswahrscheinlichkeit am Ende der Bauteillebensdauer mehr als 2-mal größer als planmäßig vorgesehen. Hinsichtlich der Notwendigkeit und des Zeitpunktes von Instandsetzungsmaßnahmen gilt das zuvor Gesagte.

Zu diesem Berechnungsbeispiel sei abschließend bemerkt, dass selbst geringe Abweichungen der maßgebenden Modellparameter bzw. Basisvariablen einen großen Einfluss auf die Prognose der Bauteillebensdauer ausüben. Somit ist der Ermittlung bzw. Überprüfung der maßgebenden Modellparameter in der Planungsphase und später am Brückenbauwerk eine hohe Aufmerksamkeit zu widmen.

4.1.3 Neu zu errichtendes Brückenbauwerk – Dauerhaftigkeitsbemessung

Bei neu zu errichtenden Brückenbauwerken kann mit Hilfe der oben dargelegten probabilistischen Betrachtungsweise die geforderte Dauerhaftigkeit für die jeweiligen Tragwerkselemente von Brückenbauwerken ingenieurmäßig bemessen werden. Die wesentlichen Elemente und Randbedingungen für eine Dauerhaftigkeitsbemessung sind ein wirklichkeitsnahes Modell zur Beschreibung des zeitabhängigen Schädigungsverlaufes, die Festlegung eines Grenzzustandes, die erforderliche Bauteil- bzw. Bauwerkszuverlässigkeit zum Ende der betrachteten Nutzungsdauer sowie die zu den Einwirkungen und Widerständen gehörenden statistischen Kennwerte.

Den zentralen Parameter bei der Dauerhaftigkeitsbemessung bilden die anzusetzenden Betoneigenschaften bzw. die Materialkennwerte, die sich aus einer Berechnung unter Berücksichtigung der dauerhaftigkeitsrelevanten Anforderungen ergeben. In Analogie zur Tragwerksbemessung werden die Materialeigenschaften bzw. Abmessungen des zu bemessenden Bauteils so gewählt, dass die geforderte grenzzustandsbezogene Bauteilzuverlässigkeit zum Ende der betrachteten Lebensdauer erreicht wird.

Am Beispiel der Betondeckung, die eine zentrale Rolle bei Dauerhaftigkeitsbetrachtungen von Stahlbeton spielt, soll das Prinzip der Bemessung anhand von Bild 6 verdeutlicht werden. Hierbei wurden die Randbedingungen aus Kapitel 4.1.1 zugrunde gelegt (Beton geringer Güte). Soll zum Ende der Bauteillebensdauer von 100 Jahren ein Zuverlässigkeitsindex von beispielsweise $\beta = 1,7$ erreicht werden, so kann dies sichergestellt werden, wenn der Mittelwert der Betondeckung etwa $c = 60$ mm beträgt.

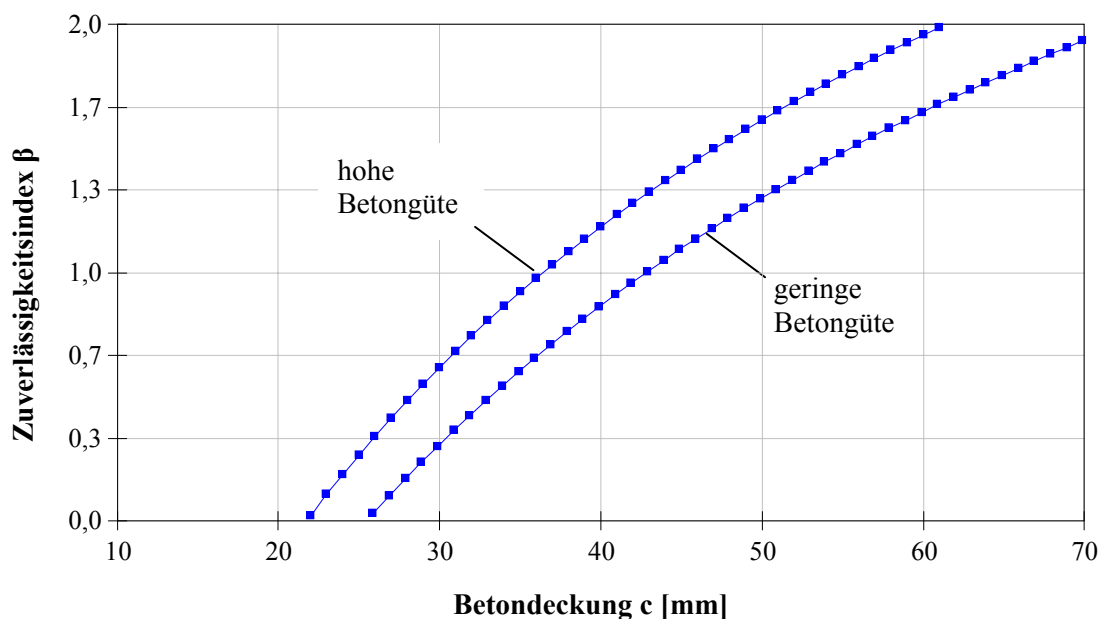


Bild 6: Bemessung eines Stahlbetonbauteils auf Dauerhaftigkeit in Bezug auf die Betondeckung für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahre

Ähnlich der Tragwerksbemessung ist es bei der Dauerhaftigkeitsbemessung von Beton natürlich sinnvoll, an mehreren „Stellschrauben“ zu drehen. So sollten zur Erreichung der geforderten Bauteilzuverlässigkeit verschiedene Widerstandsparameter (z. B. Betondeckung und Diffusionswiderstand des Betons) gleichermaßen variiert werden. Damit wird verhindert, dass einzelne Widerstandsgrößen – beispielsweise die Betondeckung – unrealistische Werte annehmen. Dies wird auch durch die Kurve für eine „hohe Betongüte“ (entspricht hohem Diffusionswiderstand) in Bild 6 verdeutlicht.

4.2 Lebensdauerprognose von Bauwerken

Die oben dargelegten Zuverlässigkeitsbetrachtungen bezogen sich auf Bauteile, also auf einzelne Elemente eines Brückenbauwerks. Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit eines gesamten Bauwerks bzw. Systems sind weitere Arbeitsschritte notwendig, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Elemente einer Risikoanalyse [8]

I	Durchführung einer Systemanalyse: <ul style="list-style-type: none"> • Systembeschreibung • Ausfalleffektanalyse • Fehlerbaumanalyse
II	Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten der Systemelemente und Analyse des Systemversagens
III	Quantifizierung des Risikos

Nachdem die Zustandsentwicklung der einzelnen Bauteile unter den maßgebenden Einwirkungen zunächst losgelöst vom Gesamtsystem prognostiziert wurde, müssen zur Abschätzung der Lebens- bzw. Restlebensdauer eines komplexen Gesamtbauwerks die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bauteilen sowie die Bedeutung der Bauteile für das Gesamtsystem erfasst werden. Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Untersuchung der Bauwerkszuverlässigkeit ist die Beurteilung des möglichen Versagens der einzelnen Bauteile in Verbindung mit den dazugehörigen Schadensfolgen. Die Lösung dieser Problemstellung ist Gegenstand einer Risikoanalyse. Sie wird im Folgenden exemplarisch am Fallbeispiel des Überbaus einer Stahlbetonbrücke aufgezeigt.

4.2.1 Systemanalyse

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

Systembeschreibung

Zunächst müssen im Zuge einer Systembeschreibung die tabellarische Auflistung und grafische Darstellung („Zerlegung“) der wesentlichen Systemelemente eines Bauwerks durchgeführt werden. Die Darstellung in Bild 7 zeigt eine sinnvolle Untergliederung des Systems „Brückenüberbau“ in seine wichtigsten Systemelemente (Bauteile).

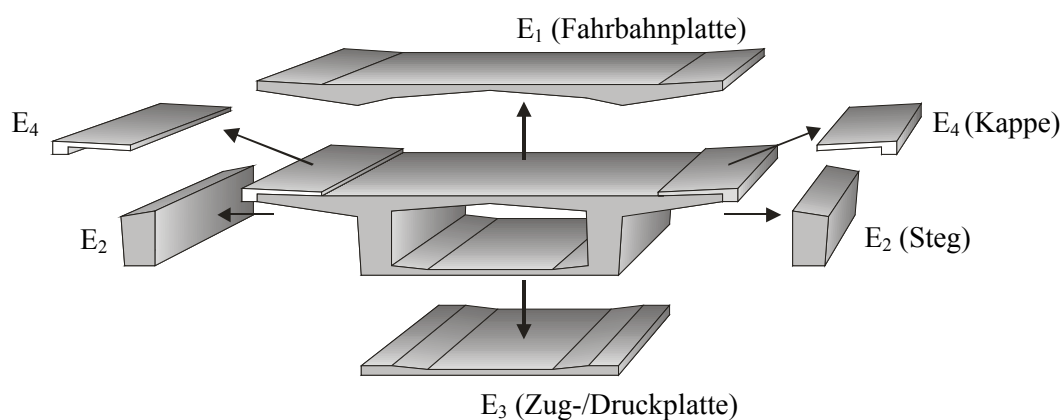


Bild 7: Prinzip der Untergliederung eines Bauwerks (hier: Hohlkastenquerschnitt eines Brückenüberbaus)

Den Systemelementen E₁ bis E₄ nach Bild 7 sind die jeweiligen dauerhaftigkeitsrelevanten Betonschädigungen, die im Zuge einer Bauwerksinspektion identifiziert wurden, zuzuordnen, siehe Tabelle 6 [9].

Tabelle 6: Zuordnung der am Bauwerk identifizierten Schäden zum jeweiligen Bauteil

Element	Bezeichnung	maßgebende Schädigungsart(en)
E ₁	Fahrbahnplatte (auskragend)	–chloridinduzierte Bewehrungskorrosion
E ₂	Stege des Hohlkastens	–karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion –Frostschäden
E ₃	Untere Zug-/Druckplatte	–karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion
E ₄	Kappen	–chloridinduzierte Bewehrungskorrosion –Frostschäden

Der erforderliche Detaillierungsgrad der Systembeschreibung hängt u. a. von der Schädigung einzelner Systemelemente ab und kann auch bei großen Bauwerken oftmals vergleichsweise einfach gewählt werden.

Ausfalleffektanalyse

Die Systemelemente (Bauteile) eines Bauwerks stehen miteinander in einer funktionalen Beziehung. Dabei entscheidet das jeweilige (planmäßige oder unplanmäßige) Zusammenwirken der einzelnen Systemelemente über die Funktionsfähigkeit des Bauwerks. Abhängig von der Art und Weise der funktionalen Verbindung der Systemelemente kann ein vereinzelt oder kombiniertes Versagen der Elemente zum Systemversagen oder zum Versagen bestimmter Systembereiche führen. Um sich über diesen Sachverhalt Klarheit zu verschaffen, muss im nächsten Schritt der Systemanalyse eine Ausfalleffektanalyse durchgeführt werden, siehe Bild 8.

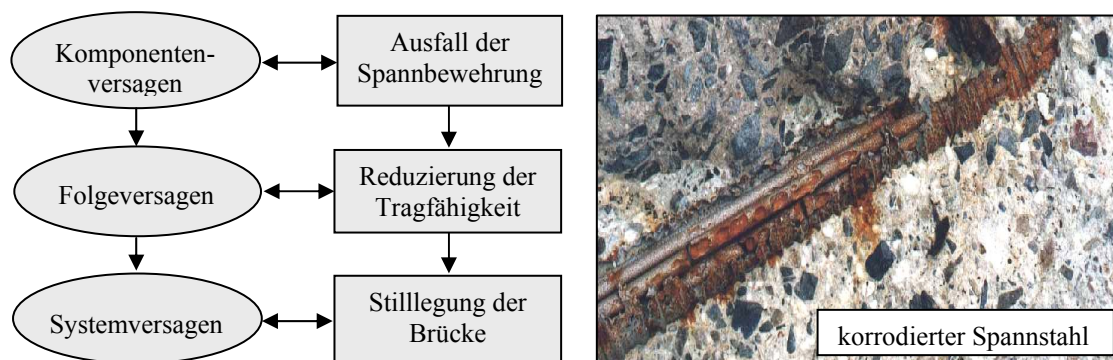


Bild 8: Ausfalleffektanalyse am Beispiel einer korrodierten Spannbewehrung

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

Fehlerbaumanalyse

Ziel der Fehlerbaumanalyse ist die systematische, deduktive Identifikation aller möglichen Ursachen, die zu dem unerwünschten Ereignis führen [10], siehe Bild 9. Die Fehlerbaumanalyse stellt bereits einen wesentlichen Baustein zur Ermittlung des Gesamtversagens des Systems dar.

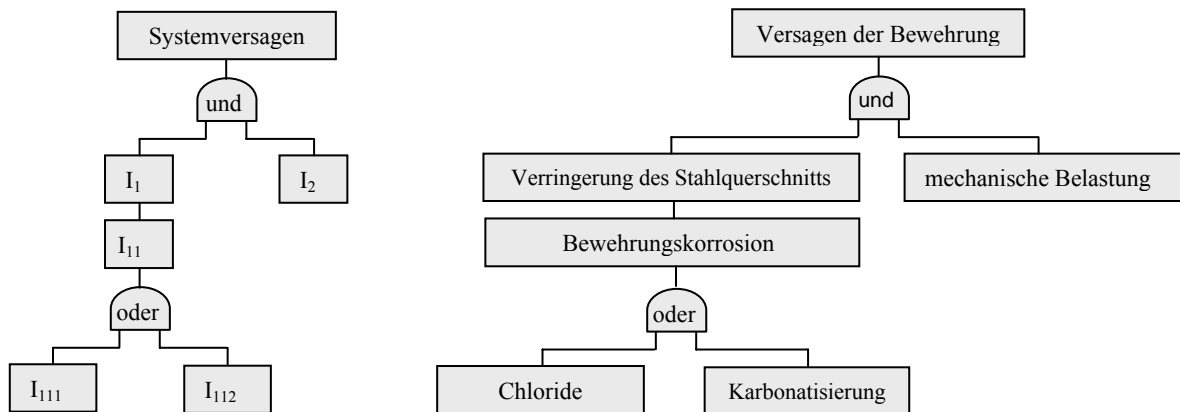


Bild 9: Schema einer Fehlerbaumanalyse ($I_i = \text{Ereignis } i$), links, und Übertragung auf karbonatisierungs- bzw. chloridinduzierte Bewehrungskorrosion, rechts

Mit Hilfe mathematischer Verknüpfungen auf der Grundlage der Berechnung von Serien- und Parallelsystemen kann die Wahrscheinlichkeit für das Versagen des Gesamtsystems ermittelt werden. Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Seriensystems (n hintereinander geschaltete Elemente) liegt in den nachfolgend aufgeführten Grenzen, siehe Rechenvorschrift (3):

$$\max [P_{fi}] \leq P_{f,\text{Serie}} \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{fi}) < \sum_{i=1}^n P_{fi} \quad (3)$$

Mit der Rechenvorschrift (4) kann die obere und untere Grenze der Versagenswahrscheinlichkeit für Parallelsysteme (n nebeneinander geschaltete Elemente) ermittelt werden:

$$\prod_{i=1}^n P_{fi} \leq P_{f,\text{Parallel}} \leq \min [P_{fi}] \quad (4)$$

Darin sind $P_{f,\text{Serie}}$ bzw. $P_{f,\text{Parallel}}$ die Versagenswahrscheinlichkeiten des Serien- bzw. Parallelsystems und P_{fi} die Versagenswahrscheinlichkeiten der entsprechenden Systemelemente [11].

4.2.2 Element- und Systemversagen

Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit der betrachteten Brückenelemente infolge ihrer jeweils maßgebenden dauerhaftigkeitsrelevanten Beanspruchung sowie die darauf aufbauende Analyse des Systemversagens soll nachfolgend beispielhaft näher aufgezeigt werden.

Versagenswahrscheinlichkeiten der Systemelemente

Die Zuverlässigkeitsanalysen in Bezug auf die Bauteile Fahrbahnplatte, Kastenstege sowie untere Zug-/Druckplatte wurden hier für den Fall der karbonatisierungs- und chloridinduzierten Bewehrungskorrosion mit dem DuraCrete-Modell nach [2, 3] und für die Schädigungsart der Frostbeanspruchung mit dem Modell nach Fagerlund [2, 12] durchgeführt. Die Planungsgröße der Nutzungsdauer des Brückenbauwerks wurde mit $t = 100$ Jahre angenommen. Der Zielwert des Zuverlässigkeitsindex wurde mit $\beta = 1,7$ festgelegt. Die für die beispielhaft durchgeführten Berechnungen notwendigen Angaben zu den Parametern der Einwirkungs- und Widerstandsfunktionen basieren auf einer Zustandsanalyse des Bauwerks und wurden u. a. der Fachliteratur [3] entnommen. Die Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der entsprechenden Zuverlässigkeitsanalysen.

Tabelle 7: Ergebnisse von Zuverlässigkeitsanalysen an unterschiedlich beanspruchten Bauteilen

Beanspruchungsart	Bauteil	Grenzzustand	Zeitpunkt des Grenzzustands ($\beta = 1,7$)
Chloride	Fahrbahnplatte	kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt an der Bewehrung	ca. 27 Jahre
Frost	Kastenstege	2/3 der Betonüberdeckung ist abgewittert	ca. 35 Jahre
Karbonatisierung	untere Zug-/Druckplatte	Karbonatisierungsfront erreicht die Bewehrung	ca. 30 Jahre

Wie aus der Tabelle 7 hervorgeht, werden nach ca. 27 Jahren Nutzungsdauer entsprechende Maßnahmen zur Instandsetzung der geschädigten Bauteile des Überbaus notwendig, wenn das vorgegebene Sicherheitsniveau gehalten werden soll.

Analyse des Systemversagens

Neben der Zustandsbeurteilung des Brückenüberbaus hinsichtlich der einzelnen dauerhaftigkeitsrelevanten Beanspruchungen ist, wie oben erläutert, auch das Zusammenwirken der identifizierten Beanspruchungen zu analysieren. Damit ist es möglich, die Auswirkungen kombinierter Umweltbeanspruchungen auf das Bauwerk (System) realitätsnah beurteilen zu können [13].

Im Nachfolgenden wird beispielhaft die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit für die Kombination der dauerhaftigkeitsrelevanten Beanspruchungen chloridinduzierte Bewehrungskorrosion (Fahrbahnplatte, E_1), Frostbeanspruchung (Kastenstege, E_2) und karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion (untere Zug-/Druckplatte, E_3) aufgezeigt. Hierbei sei angenommen, dass die Systemelemente zu einem Seriensystem „zusammengeschaltet“ sind, ohne die genauen Abhängigkeiten zwischen den Elementen

zu kennen, so dass die Versagenswahrscheinlichkeit $P_{f, \text{Serie}}$ für das System „Überbau“ innerhalb der elementaren Grenzen gemäß Rechenvorschrift (3) ermittelt werden muss. Für diesen Fall tritt ein Systemversagen dann ein, wenn Element 1 oder Element 2 oder Element 3 versagt. Das nachfolgend dargestellte Schaltbild, in Verbindung mit dem dazugehörigen Fehlerbaum, verdeutlicht diesen Sachverhalt, siehe Bild 10.

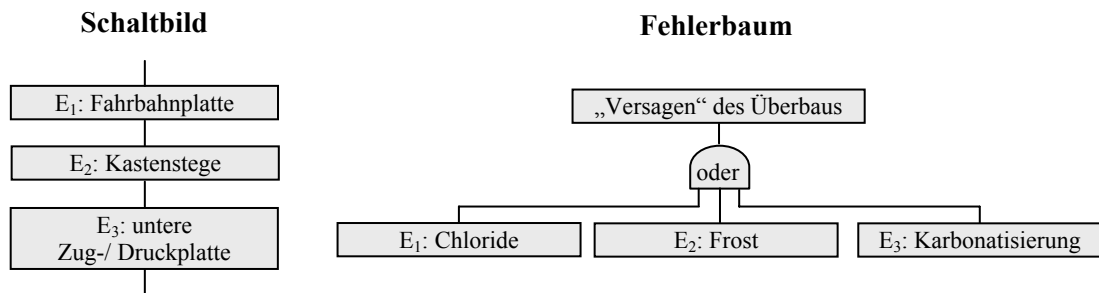


Bild 10: Schaltbild und Fehlerbaum für den Fall der Modellierung eines Seriensystems am Beispiel einer Hohlkastenbrücke

Für die oben getroffene Annahme einer kombinierten Beanspruchung aus Chloriden, Frost und Karbonatisierung für die Systemelemente Fahrbahnplatte, Kastenstege sowie untere Zug-/Druckplatte ist dann die grenzzustandsbezogene Versagenswahrscheinlichkeit für das modellierte Seriensystem innerhalb der elementaren Schranken zu berechnen. Das Berechnungsergebnis ist in Bild 11 dargestellt.

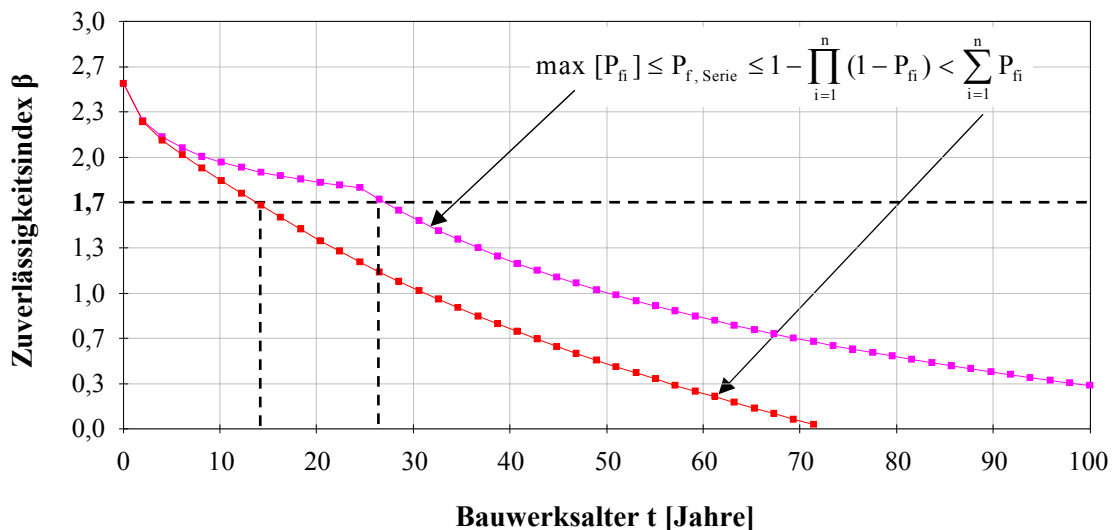


Bild 11: Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex für das Seriensystem „Brückenüberbau“

Die Analyse der Systemzuverlässigkeit zeigt, dass bei kombinierter dauerhaftigkeitsrelevanter Beanspruchung des Brückenüberbaus in Bezug auf ein Systemversagen der Eingreifzeitpunkt für eine Instandsetzungsmaßnahme bereits ab ca. 14 Jahren Betriebsdauer erfolgen sollte, falls sich die Annahme einer vollständigen Abhängigkeit der Schadensmechanismen der Systemelemente bestätigen würde. Bestehen keine Abhängigkeiten der Elemente untereinander, so ist das „schwächste“ Bauteil – gemäß Tabelle 7 die Fahrbahnplatte – maßgebend für den Zeitpunkt des Instandsetzungsbeginns (27 Jahre).

4.2.3 Quantifizierung des Risikos

Die Ermittlung des Risikos bzw. des Gesamtrisikos R_{ges} eines ungewollten Ereignisses kann mit der nachfolgenden Gleichung (5) durchgeführt werden:

$$R_{\text{ges}} = \sum (P_i \cdot K_{vi}) \quad (5)$$

Darin ist P_i die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses i und K_{vi} sind die Schadenskosten für das Ereignis i . Unter Verwendung der Gleichung (5) ist eine Verknüpfung der berechneten Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems bzw. der Systemelemente mit den zu erwartenden Schadenskosten möglich.

Abschließend sei festgestellt, dass weniger die quantitative Angabe des berechneten Risikos im Vordergrund einer Risikoanalyse steht als vielmehr die Untersuchung und Bewertung bestimmter ungewollter Bauteilzustände. Die Durchführung und Auswertung einer Risikoanalyse gibt Aufschluss über nachfolgend aufgeführte Punkte zur Aufstellung einer optimalen Instandhaltungsstrategie bei Stahlbeton- und Spannbetonbrücken:

- Identifikation der Bauwerkskomponenten bzw. -bereiche mit den größten zu erwartenden Versagenswahrscheinlichkeiten;
- Konzentration von Inspektions- bzw. Überwachungsmaßnahmen auf die identifizierten Schwachstellen am Bauwerk;
- Planung und Durchführung von Instandsetzungsmaßnahmen in Abhängigkeit von den zu erwartenden Schadensfolgen.

Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte kann eine kostenoptimierte Bauwerksunterhaltung realisiert werden. Dies bedeutet, dass Finanzmitteln nur im erforderlichen, d. h. im berechneten und nachgewiesenen Umfang eingesetzt werden.

5 Schlussbemerkungen

Im Rahmen eines umfassenden Bauwerksmanagements ist die Prognose der Schadensentwicklung bei komplexen Betonkonstruktionen wie Betonbrücken ein wesentlicher Baustein zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit für den Zeitraum der geplanten Nutzungsdauer. Einen wesentlichen Beitrag hierzu leistet die Dauerhaftigkeitsbemessung (Neubau) und/oder die Prognose der Zustandsentwicklung sowie die intervallmäßige Aktualisierung der Prognose (Neubau und bestehendes Bauwerk).

Der wesentliche Nutzen der in diesem Beitrag vorgestellten Werkzeuge und Methoden resultiert aus dem Sachverhalt, dass die Dauerhaftigkeit – im Gegensatz zu den Ansätzen nach DIN 1045 – ingenieurmäßig „quantifiziert“ wird. Damit ist das voraussichtliche Ausmaß dauerhaftigkeitsrelevanter Schädigungen an einer Betonkonstruktion auf der Basis der zuvor festgelegten ungewollten Bauteilzustände und eines definierten Sicherheitsniveaus rechnerisch ermittelbar. Dies bedeutet, dass z. B. Betonbrücken unter Beachtung der Nutzungsdauer kostengünstig erstellt und vorzeitig eintretende Schäden vermieden werden können. Weiterhin kann der ohnehin erforderliche Unterhaltungsaufwand bei Stahl- und Spannbetonbrücken optimiert – in wirtschaftlichem Sinne minimiert – werden. Bei bestehenden Bauwerken wird eine gesicherte technische und wirtschaftliche Bewertung von Lebensdauer erhöhenden Maßnahmen möglich. Da sich auf der geschaffenen Grundlage auch die langfristig anfallenden Unterhaltungskosten zutreffend abschätzen lassen, wird zudem eine wirtschaftliche Investitionsplanung in Bezug auf einen Neubau ermöglicht.

6 Literatur

- [1] Model Code for Service Life Design. fib Bulletin 34, Fédération Internationale du Béton (fib), Lausanne, 2006, ISBN 2-88394-074-6
- [2] The European Union – Brite EuRam III: Modelling of Degradation. DuraCrete: Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R4-5, December 1998
- [3] The European Union – Brite EuRam III: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions. DuraCrete: Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete

- Structures, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R9, January 2000
- [4] Schiebl, P., Gehlen, C., Sodeikat, C.: Dauerhafter Konstruktionsbeton für Verkehrsbauwerke. Betonkalender Teil 2, 93. Jahrgang, Ernst & Sohn Verlag, 2004, S. 157-220, ISBN 3-433-01668-2
- [5] DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Ausgabe März 2001, Beuth Verlag, 2001
- [6] Joint Committee on Structural Safety (JCSS). Probabilistic Model Code, Part I: Basis of Design, 2001
- [7] RCP GmbH: STRUREL, A Structural Reliability Analysis Program System, (STATREL Manual 1999; COMREL & SYSREL Manual, 2003). RCP Consulting GmbH München
- [8] Klingmüller, O., Bourgund, U.: Sicherheit und Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau. Vieweg Verlag, 1992, ISBN 3-528-08835-4
- [9] Brühwiler, E., Menn, C.: Stahlbetonbrücken. Springer Verlag, 2003, ISBN 3-211-83583-0
- [10] Siemens, A. J., Vrouwenvelder, A. C. W. M., Van den Beukel, A.: Durability of Buildings: a reliability analysis. Heron, Vol. 30, No. 3, 1985, ISSN 0046-7316
- [11] Thoft-Christensen, P., Baker, M. J.: Structural Reliability Theory and Its Applications. Springer Verlag, 1982, ISBN 3-540-11731-8
- [12] Sentler, L.: Stochastic Characterization of Concrete Deterioration. CEB – rilem, International Workshop: Durability of Concrete Structures, 18th – 20th May 1983, Copenhagen 1983, pp. 351-359
- [13] Enright, M. P., Frangopol D. M., Gharaibeh, E. S.: Reliability of Bridges under Aggressive Conditions. Applications of Statistics and Probability, Civil Engineering Reliability and Risk Analysis, R. E. Melchers, M. G. Stewart (eds.), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 323-330, 2000