

# Zustandsbasierte Inspektionsplanung – Möglichkeiten für ein optimiertes Erhaltungsmanagement von Infrastrukturbauwerken

Marc Zintel<sup>1)</sup>, Christoph Gehlen<sup>1)</sup>, Daniel Straub<sup>2)</sup>, Till Felix Mayer<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Technische Universität München

<sup>2)</sup> Fachgebiet Risikoanalyse und Zuverlässigkeit, Technische Universität München

<sup>3)</sup> Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH, München

## Zusammenfassung

*Angesichts alternder Bauwerksbestände stellt die nachhaltige und systematische Erhaltung von Infrastrukturbauwerken eine zentrale Aufgabe für den Bauwerksbetreiber dar. Eine realitätsnahe Bewertung des Bauwerkszustands über die gesamte Nutzungsdauer ist hierfür unerlässlich. Durch den Einsatz anerkannter probabilistischer Schädigungsmodelle können zuverlässige Aussagen über den aktuellen Zustand sowie die zukünftige Zustandsentwicklung getroffen werden. Allerdings sind diese durch hohe Unsicherheiten in den Modellparametern geprägt, welche letztlich zu einem erhöhten Schadensrisiko führen. Hohe Unsicherheiten der Modellparameter können durch Bauwerksuntersuchungen erheblich reduziert werden. Da Bauwerksuntersuchungen einerseits einen Kostenfaktor darstellen, andererseits jedoch den Kenntnisstand über den tatsächlichen Bauwerkszustand erhöhen, kommt der sinnvollen Festlegung von Inspektionsintervallen sowie –umfang und –methoden eine wesentliche Bedeutung zu. Im Kontext eines prädiktiven Lebensdauermanagementsystems (PLMS) wird zur Minimierung der Gesamtkosten über die Nutzungsdauer eine erste praxisgerechte Umsetzung einer zustandsbasierten Inspektionsstrategie für Bestandsbauten vorgestellt.*

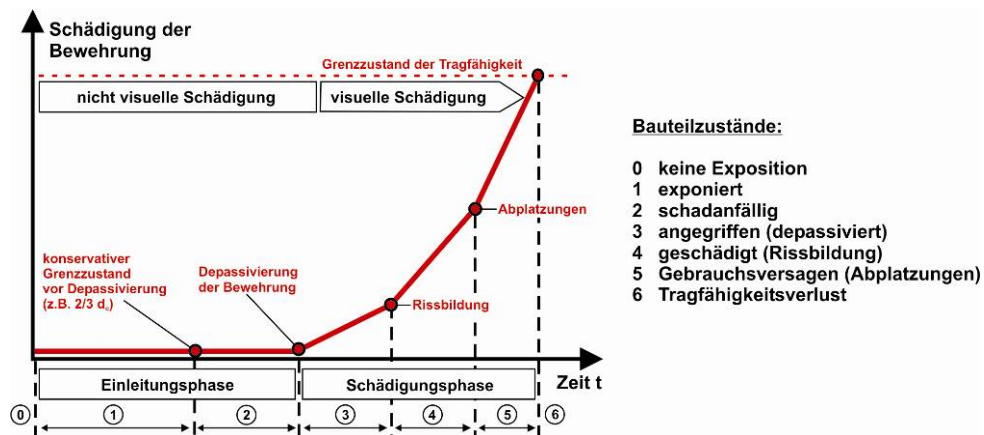
## 1 Einleitung

Das deutsche Bundesfernstraßennetz umfasst insgesamt rund 38.000 Brückenbauwerke, die durch den Bund und die Auftragsverwaltungen der Länder unterhalten werden müssen. Rund 90% der Brücken sind Stahl- oder Spannbetonbauwerke [1]. Ungefähr 40% dieses Bestandes weisen Schäden auf, die eine Instandsetzung innerhalb der nächsten Jahre erforderlich machen (Stand 2007). Circa 70% der registrierten Schäden an Brückenbauwerken im deutschen Autobahnnetz können der Bewehrungskorrosion, die durch Carbonatisierung des Betons oder noch mehr durch Eindringen von Chloriden (Tausalz) bis zur Bewehrungslage ausgelöst wird, zugeordnet werden. Allein im Jahr 2004 wurden ca. 268 Mio. Euro in die Erhaltung der Brücken und Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen investiert. Neben dem Bund sind auch andere Betreiber großer Bauwerksbestände (z.B. Städte) oder Betreiber-gesellschaften im Zuge von PPP-Projekten (Public-Private-Partnership-Projekte) in den letzten Jahren verstärkt mit der Aufgabe konfrontiert, älter werdende Infrastrukturbauwerke mit begrenzten Finanzmitteln unterhalten bzw. zukünftige Betriebskosten objektiv kalkulieren zu müssen. Um mit den vorhandenen Mitteln einen optimalen Zustand eines Bauwerks gewährleisten zu können, ist sowohl die genaue Kenntnis des derzeitigen Bauwerkszustands, als auch eine zuverlässige Prognose der zukünftigen Zustandsentwicklung erforderlich.

## 2 Stand der Technik - Zustandsbewertung

Zu Infrastrukturbauwerken, deren Nutzungsdauer vorrangig von der technischen Lebensdauer der Konstruktion und den angreifenden Umwelteinwirkungen abhängen, zählen insbesondere

Brücken und Tiefgaragen. Im Degradationsverlauf der zwei dominierenden Schädigungsmechanismen (carbonatisierungs- bzw. chloridinduzierte Bewehrungskorrosion) unterscheidet man zwei Phasen (siehe Bild 1).



**Bild 1:** Zeitliche Entwicklung der Bewehrungskorrosion inklusive Zustandsnotendefinitionen (0 bis 6)

Während der ersten Phase, der so genannten Einleitungsphase, dringen  $\text{CO}_2$  oder Chloride infolge unterschiedlicher Transportmechanismen von der Bauteiloberseite in den Beton ein. Eine Schädigung der Bewehrung selbst findet in dieser Phase nicht statt. Die Einleitungsphase endet mit der Depassivierung der Bewehrungsoberfläche, wenn die Carbonatisierungsfront die Bewehrung erreicht oder der Chloridgehalt an der Bewehrungsoberfläche den kritischen Chloridgehalt übersteigt [2]. Die Bewehrungskorrosion setzt erst in der an die Depassivierung anschließenden Schädigungsphase ein. Rissbildungen und Abplatzungen der Betondeckung als erste visuell erkennbare Folge der Bewehrungskorrosion treten erst im fortgeschrittenen Stadium auf, wenn es für ein wirtschaftlich optimiertes Eingreifen im Sinne eines präventiven Erhaltungsmanagements meist schon zu spät ist. Für die Beschreibung der Depassivierung der Bewehrung stehen anerkannte vollprobabilistische Modelle [3] zur Verfügung. Durch die Quantifizierung des Bauteilwiderstands (verwendeter Beton und Betondeckung) und der Einwirkung (z.B. Chloridbeaufschlagung) kann mit Hilfe dieser Modelle der aktuelle Zustand sowie die zu erwartende Zustandsentwicklung berechnet werden. Als Ergebnis der Berechnungen wird für einen betrachteten Grenzzustand (z.B. Depassivierung der Bewehrung als Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit) die Wahrscheinlichkeit  $p_f(t)$ , dass dieser zum Zeitpunkt  $t$  erreicht wird, bzw. der korrespondierende Zuverlässigkeitsindex  $\beta(t)$  bestimmt [4].

Durch Berücksichtigung aktueller Ergebnisse aus Bauwerksuntersuchungen können die z.T. anfänglich hohen Streuungen infolge von Unsicherheiten bei den Modelleingangsgrößen sukzessive reduziert werden (Bayes'sches Update). Dadurch kann die Genauigkeit der Zustandsprognose mit fortschreitender Nutzungsdauer immer weiter verbessert werden.

Um Bauteilzustände griffig und eindeutig beschreiben zu können, haben sich in der Praxis Zustandsnoten etabliert, die zudem eine bessere Vergleichbarkeit der Zustände mehrerer Bauteile untereinander ermöglichen. Für die hier empfohlene Vorgehensweise werden Zustandsnoten von 0 (keine Exposition) bis 6 (Tragfähigkeitsverlust) vergeben (siehe Bild 1) [5]. Der Übergang zwischen zwei Bauteilzuständen wird jeweils durch eine Grenzzustandsgleichung in der Modellierung beschrieben.

### 3 Optimierte Erhaltungsmanagement im Bestand

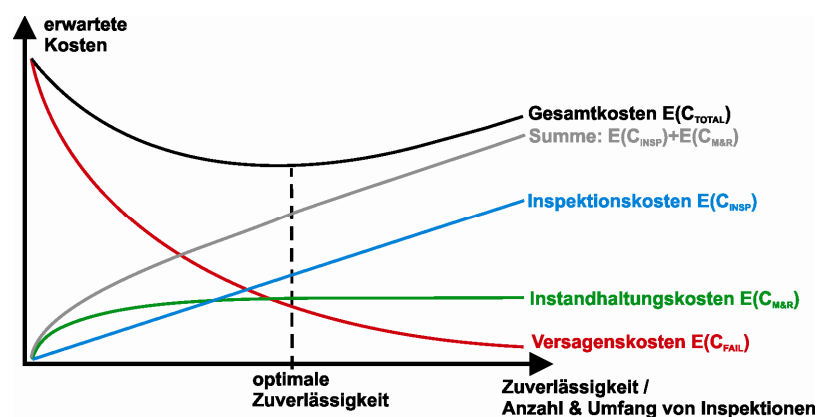
Das Ziel eines optimierten Erhaltungsmanagements für Bauwerke im Bestand ist die Sicherstellung einer ausreichend hohen Gebrauchstauglichkeit bei Minimierung der Gesamtkosten über die Restnutzungsdauer.

Bei Bestandsbauwerken sind in der Regel die Planungs- und Ausführungsphase abgeschlossen, so dass eine Optimierung der Gesamtkosten über die Nutzungsdauer unter Berücksichtigung der Erstellungskosten nicht mehr möglich ist. Um eine Investition in der Nutzungsphase aus ökonomischer Sicht eingehend beurteilen zu können, müssen alle zu erwartenden Folgekosten von Inspektion  $E(C_{INSP})$ , anfallenden Erhaltungsmaßnahmen  $E(C_{M\&R})$  bis hin zu Versagens- bzw. Risikokosten  $E(C_{FAIL})$  in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit einfließen. Demnach sollte das Ziel von Inspektions- sowie Instandhaltungsplanungen in der Nutzungsphase die Minimierung der zu erwartenden Gesamtkosten  $E(C_{TOTAL})$  sein, siehe hierzu Gleichung (1):

$$E(C_{TOTAL}) = E(C_{INSP}) + E(C_{M\&R}) + E(C_{FAIL}) \quad (1)$$

Um die zu erwarteten Folgekosten zuverlässig abschätzen zu können, ist eine realitätsgetreue Prognose der Zustandsentwicklung eines Bauwerks, wie bereits in Abschnitt 2 erläutert, unerlässlich. Die Beurteilung des Bauwerkszustands erfolgt derzeit überwiegend auf Grundlage visueller Bauwerksuntersuchungen (reaktives Erhaltungsmanagement) ohne Zustandsprognose bzw. unter Verwendung bestenfalls empirischer Schädigungsmodelle. Zerstörungsfreie Prüfverfahren oder Monitoringsysteme in Verbindung mit vollprobabilistischen Schädigungsmodellen finden bei Bauwerksinspektionen bisher kaum Berücksichtigung, da der erhöhte Untersuchungsaufwand für ein derartiges präventives Bauwerksmanagement mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Andererseits bietet die frühzeitige Kenntnis der zu erwartenden Zustandsentwicklung dem Betreiber die Möglichkeit, Maßnahmen langfristig zu terminieren und so dem jeweiligen Budget anzupassen oder umgekehrt das Budget entsprechend einzuteilen. Dadurch wird eine Verstetigung der erforderlichen Finanzmittel erreicht, die zudem eine langfristige Planung erleichtert [5], [6].

Um die Gesamtkosten über die Nutzungsdauer zu minimieren, muss eine Balance zwischen dem Vorteil einer Risikoreduktion (Verringerung der Versagenskosten) durch intensivere und/oder umfangreichere Bauwerksuntersuchungen (Informationsverdichtung, zuverlässigere Detektion von Schäden) und den mit diesem Mehraufwand verbundenen Kosten gefunden werden. Dieses Optimierungsproblem ist in Bild 2 dargestellt.



**Bild 2:** Schematische Darstellung des Optimierungsproblems für den Inspektionsaufwand von Bauwerken in der Nutzungsphase, nach [7]

## 4 Konzepte zur Steuerung des Inspektionsaufwands – Erfassung des Bauwerkzustands

Da Bauwerksuntersuchungen einerseits einen nicht unerheblichen Kostenfaktor darstellen, andererseits jedoch den Kenntnisstand über den tatsächlichen Bauwerkzustand erhöhen, kommt der sinnvollen Festlegung von Inspektionsintervallen und dem anzuwendenden Untersuchungsaufwand eine wesentliche Bedeutung zu. Zu kurze Inspektionsintervalle führen zu keinem wesentlichen Informationsgewinn, da der Bauwerkzustand sich seit der letzten Untersuchung nicht signifikant verändert hat. Bei zu lang gewählten Inspektionsintervallen besteht jedoch die Gefahr, die optimalen Eingreifzeitpunkte für Instandsetzungsmaßnahmen zu verpassen oder sogar sicherheitsrelevante Grenzzustände zu überschreiten.

### 4.1 Konzepte zur Festlegung von Inspektionsintervallen

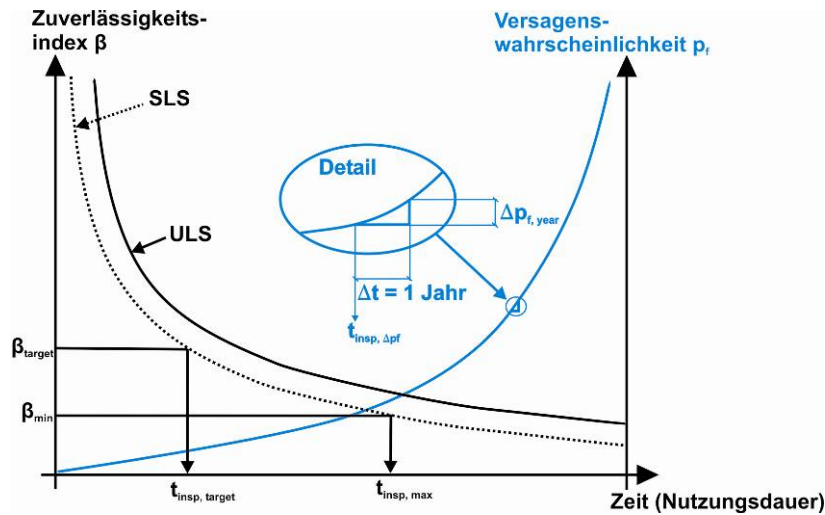
Grundsätzlich können zwei unterschiedliche Konzepte zur Festlegung von Inspektionsintervallen betrachtet werden.

#### 4.1.1 Durchführung von Inspektionen nach festen Intervallen

Das Konzept, Bauwerksuntersuchungen nach festgelegten Inspektionsintervallen durchzuführen, wird heute für Bauwerke im Geltungsbereich der DIN 1076 angewandt. Nach dieser Norm findet alle sechs Jahre eine Hauptprüfung und jeweils zwischen zwei Hauptprüfungen zusätzlich eine einfache Prüfung statt. Derartige „starre“ Bauwerksinspektionskonzepte lassen keine Anpassung an den tatsächlichen Bauwerkzustand zu. Durch die relativ kurzen Abstände zwischen zwei Untersuchungen kann zwar verhindert werden, dass kritische Bauwerkzustände übersehen werden, allerdings bedingt dieses Vorgehen vergleichsweise hohe Kosten. Aus diesem Grund werden nach heutiger Praxis fast ausschließlich visuelle Untersuchungsmethoden angewandt, die zwar kostengünstig sind, besonders aber in einem früheren Schädigungsstadium, in dem noch keine visuell erkennbare Schädigung vorliegt, keinen Informationszuwachs liefern.

#### 4.1.2 Flexible Inspektionsintervalle aufgrund der erwarteten Zustandsentwicklung

Daneben besteht die Möglichkeit, Bauwerksinspektionen an zuvor definierte bzw. vorgegebene Zielzuverlässigkeiten  $\beta_{\text{target}}$  zu koppeln. Eine Inspektion wird zu dem Zeitpunkt ( $t_{\text{insp,target}}$ ) eingeplant, zu dem die Lebensdauermodellierung eine Unterschreitung von  $\beta_{\text{target}}$  ergibt. Dabei ist zu beachten, dass für unterschiedliche betrachtete Grenzzustände (z.B. Depassivierung, Rissbildung usw.) unterschiedliche Werte für  $\beta_{\text{target}}$  festgelegt werden müssen. Im Falle von Grenzzuständen der Tragfähigkeit (ULS) sind höhere Zielzuverlässigkeiten als bei Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (SLS) festzusetzen. Im Idealfall werden Zielzuverlässigkeiten auf Grundlage von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen vom Betreiber festgelegt. Beispielsweise können konservative Grenzwerte (siehe Bild 1) die Wirkung und damit die Wirtschaftlichkeit einer favorisierten präventiven Instandhaltungsmaßnahme, wie einer Beschichtung, gewährleisten. Unabhängig von einer gewählten Instandhaltungsstrategie ist eine Bauwerksinspektion grundsätzlich zu einem Zeitpunkt ( $t_{\text{insp,max}}$ ) durchzuführen, bevor ein sicherheitsrelevanter Grenzzustand ( $\beta_{\text{min}}$ ), z.B. nach EC 0, unterschritten wird. Das Verfahren der flexiblen Inspektionsintervalle ist in Bild 3 dargestellt. Als Kriterien können die Zielzuverlässigkeitsindizes sowohl als jährliche Änderungsrate als auch als Gesamtzuverlässigkeiten angegeben werden [8]. Dabei korrespondieren die jährlichen Zuverlässigkeiten mit den jährlichen Versagenswahrscheinlichkeiten  $\Delta p_{f,\text{year}}$  und die Gesamtzuverlässigkeiten mit den Versagenswahrscheinlichkeiten über die Restnutzungsdauer.



**Bild 3:** Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Zuverlässigkeit  $\beta$  und Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  sowie beispielhafte Illustration möglicher zukünftiger Inspektionszeitpunkte  $t_{insp}$  in Abhängigkeit vordefinierter Ziel- ( $\beta_{target}$ ) bzw. Mindestzuverlässigkeiten ( $\beta_{min}$ )

Zuverlässigkeitsindices und die damit verbundenen erforderlichen Inspektionstermine werden für einzelne Bauteile eines Bauwerks berechnet. Da Inspektionen in der Regel nicht für ein einzelnes Bauteil, sondern für ein gesamtes Bauwerk durchgeführt werden, können über das individuelle Zeitfenster jedes einzelnen Bauteils bauteilübergreifende Inspektionsmaßnahmen im Sinne der Betreiberphilosophie umgesetzt werden. Hilfreich hierzu kann die Betrachtung eines optimierten Zeitfensters für das Gesamtbauwerk sein, in welchem jedes Einzelbauteil Berücksichtigung findet. In Gleichung (2) ist dieser Zusammenhang abgebildet.

$$\min(t_{insp,target}) \leq t_{insp} \leq \min(t_{insp,\Delta pf}, t_{insp,max}) \quad (2)$$

#### 4.2 Konzept zur Festlegung des Inspektionsaufwands

Der Untersuchungsumfang sowie die eingesetzten Untersuchungsmethoden vor Ort sollten sich an den Ergebnissen der Inspektion selbst und der Art der Probenahme (Stichprobe bzw. statistisch repräsentative Probenahme) orientieren (zustandsbasierte Inspektion). Standardisierte Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Modelleingangsparameter sind insbesondere die Carbonatisierungstiefenbestimmung und die Entnahme von Chloridprofilen. Um Inspektionskosten weiter zu minimieren, sollten Grenzwerte für verschiedene Untersuchungsmethoden festgelegt werden, so dass im Fall von unkritischen Testergebnissen auf weitere Untersuchungen verzichtet werden kann. Für diese praxisnahe Aufgabenstellung wurden bislang nur unzureichend systematisierte Lösungsansätze entwickelt.

### 5 Umsetzung eines Konzepts zur zustandsbasierten Inspektionsplanung für Bestandsbauwerke im Fall von Bewehrungskorrosion

In Anlehnung an DIN 1076 wird für die hier entwickelte, zustandsbasierte Inspektionsplanung einem Bauwerk/-teil in Abhängigkeit vorherrschender Schädigungsmechanismen (Expositionsklassen) ein primäres Inspektionsintervall von 3 bzw. 6 Jahren zugeordnet (siehe Bild 4). Die Vorteile bei Verwendung starrer Inspektionsintervalle liegen in der Ankopplung an die bestehende Norm und der daraus resultierenden, klaren Festlegung des Verantwortungsbereichs; dieser liegt beim Bauwerksbetreiber. Die zustandsbasierte Steuerung des Inspektions-

umfangs vor Ort erfolgt über drei Untersuchungsstufen (I, II und III), welche sich durch Inspektionsintensität, –umfang sowie –methoden unterscheiden (siehe Bild 4). Dabei umfasst jede nächst höhere Untersuchungsstufe alle Untersuchungsmethoden der vorangegangenen Stufen.

Schädigungsmechanismus	Expositions-klassen	Inspektions-intervall [a]	Untersuchungsmethoden in Abhängigkeit von Untersuchungsstufen		
			I	II	III
Chlorid-eindringen	XD1/XS1	3	Unterlagenstudium, Sichtkontrolle, Betondeckung, Bohrmehlnahme (Chloridprofil)	Potentialfeldmessung, Elektrolytwiderstandsmessung (Wennersonde), Bewehrungs Sondierung	Fachmann: weitere elektrochemische- oder spektroskopische Verfahren, Tragfähigkeitsnachweise usw.
	XD2/XS2	3			
	XD3/XS3	3			
Carbonati-sierung	XC1	-	Unterlagenstudium, Sichtkontrolle, Betondeckung, Carbonatisierungstiefe	Elektrolytwiderstandsmessung (Wennersonde)	-
	XC2	-			
	XC3	6			
	XC4	6			

**Bild 4:** Primäre Inspektionsintervalle sowie Untersuchungsmethoden zugeordnet nach Untersuchungsstufen I bis III

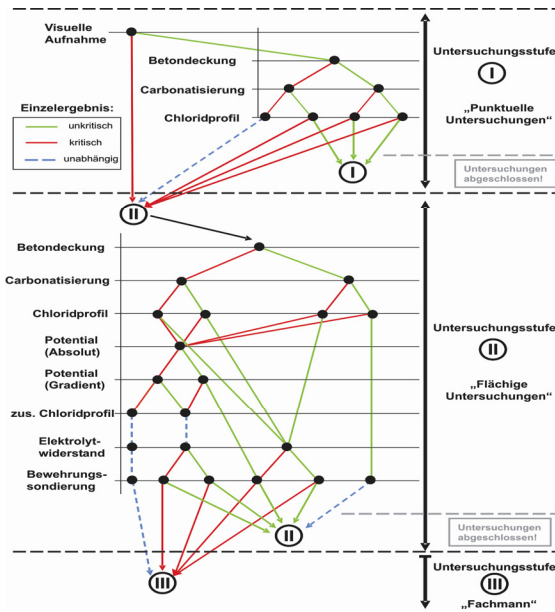
Durch Festlegung differenzierter Grenzwerte für die verschiedenen Untersuchungsmethoden und Untersuchungsstufen kann eine Bewertung der Untersuchungsergebnisse als kritisch bzw. unkritisch erfolgen. Dabei werden für die orientierenden, stichprobenartigen Untersuchungen in Stufe I deutlich konservativere Grenzwerte angesetzt als für die flächigen Untersuchungen auf Untersuchungsstufe II. Werden die Grenzwerte für eine Untersuchungsstufe verletzt, geht die Inspektion direkt auf eine höhere Untersuchungsstufe über. In Untersuchungsstufe II fallen die Grenzwerte differenzierter aus, nicht zuletzt aufgrund eines erhöhten Untersuchungsumfangs, der eine stochastische Auswertung erlaubt. In Bild 5 sind beispielhaft Grenzwerte der Untersuchungsstufen I und II tabellarisch dargestellt.

Untersuchung	zugeordneter Schädigungsmechanismus	Untersuchungsstufe I		Untersuchungsstufe II	
		Abgrenzung	Farbe	Abgrenzung	Farbe
visuelle Schadensaufnahme	Carbonatisierung/ Chlorideindringen	Risse (aus Korrosionsprodukten), Rostfahnen, Abplatzungen	kritisch = rot	Risse (aus Korrosionsprodukten), Rostfahnen, Abplatzungen	kritisch = rot
		ohne Befund	unkritisch = grün	ohne Befund	unkritisch = grün
Betondeckung $c$ [mm]: (je nach Expositions-klasse)	Carbonatisierung/ Chlorideindringen	z.B. $c < 35$ (XC3) <sup>1)</sup>	kritisch = rot	z.B. $c < 35$ (XC3) <sup>2)</sup>	kritisch = rot
		z.B. $c \geq 35$ (XC3) <sup>1)</sup>	unkritisch = grün	z.B. $c \geq 35$ (XC3) <sup>2)</sup>	unkritisch = grün
Carbonatisierungstiefe $X_c$ [mm]	Carbonatisierung	$X_c < 1/2 c$	unkritisch = grün	$X_c < 2/3 c$	unkritisch = grün
		$X_c \geq 1/2 c$	kritisch = rot	$X_c \geq 2/3 c$	kritisch = rot
Chloridgehalt $Cl$ [M-%/2]: (in Tiefe der Bewehrungslage)	Chlorideindringen	$Cl < 0,2$	unkritisch = grün	$Cl < 0,4$	unkritisch = grün
		$Cl \geq 0,2$	kritisch = rot	$Cl \geq 0,4$	kritisch = rot
Potential [mV]: (Absolutwerte)	Chlorideindringen	-	-	$X < -700$	unkritisch = grün
		-	-	$-700 \leq X < -250$	kritisch = rot
		-	-	$X \geq -250$	unkritisch = grün
Potential [mV/m]: (Gradient)	Chlorideindringen	-	-	$X < 100$	unkritisch = grün
		-	-	$X \geq 100$	kritisch = rot
Elektrolytwiderstand [kΩ]:	Chlorideindringen	-	-	$0 < X < 50$ (feucht)	kritisch = rot
		-	-	$50 \leq X \leq 1000$ (normal)	kritisch = rot
		-	-	$X > 1000$ (trocken)	unkritisch = grün
Bewehrungs Sondierung (Querschnittsverluste, QV):	Carbonatisierung/ Chlorideindringen	-	-	deutlicher Querschnittsverlust, Flugrost, leichte Korrosion	kritisch = rot
		-	-	blanker Stahl	unkritisch = grün

1) Qualitativer Nachweis nach DBV-Merkblatt (Juli, 2002): Betondeckung und Bewehrung  
2) Quantitativer Nachweis nach DBV-Merkblatt (Juli, 2002): Betondeckung und Bewehrung

**Bild 5:** Gewählte Grenzwerte auf Untersuchungsstufe I und II

Bei Über- bzw. Unterschreiten der Grenzwerte wird ein Entscheidungsbaum durchlaufen und der Untersuchungsaufwand somit an den tatsächlichen Bauwerkszustand angepasst (siehe Bild 6). Untersuchungsstufe I und II sind mit Entscheidungshilfen verknüpft, Stufe III ist nicht schematisiert und bedarf des Wissens und der Expertise eines fachkundigen Ingenieurs.

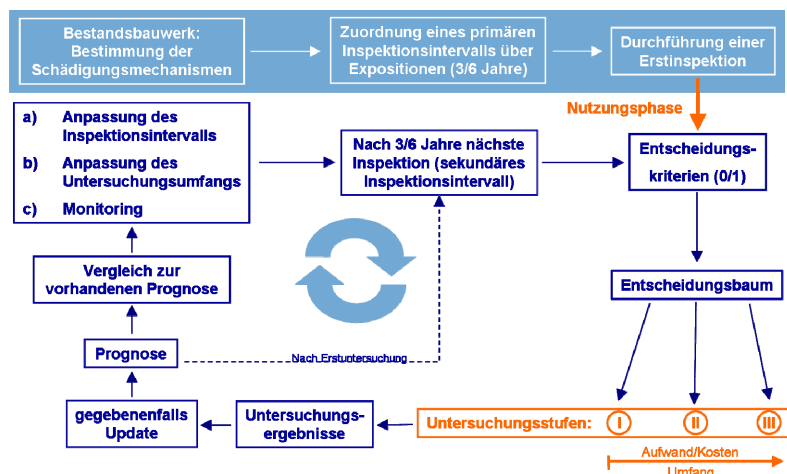


**Bild 6:** Darstellung des Entscheidungsbaumes für Bewehrungskorrosion zur Bestimmung der Untersuchungsstufen I bis III in Abhängigkeit erzielter Inspektionsergebnisse

Für Bauwerke, für die keine Lebensdauerprognose vorlag, kann diese auf Grundlage der erzielten Untersuchungsergebnisse erstmals erstellt werden. Für andere Bauwerke besteht die Möglichkeit, die neu erstellte Prognose mit einer vorangegangenen Prognose zu vergleichen bzw. eine vorherige Prognose zu aktualisieren (Update). Bei entscheidenden Abweichungen zu vorher prognostizierten Ergebnissen können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden:

- Anpassung des Inspektionsintervalls (sekundäres Inspektionsintervall):** Beispielsweise von 3 auf 6 Jahre im positiven bzw. von 6 auf 3 Jahre im negativen Fall. Zusätzlich können zustandsabhängige Konventionen vereinbart werden (z.B. ab Zustandsnote 3 eines Bauwerks ist ein 3-jähriger Inspektionsrhythmus einzuhalten).
- Anpassung der Untersuchungsstufen:** (z.B. I → II → III oder III → II → I).
- Einsatz geeigneter Monitoringsysteme:** Dadurch kann die Entwicklung des Bauwerkszustands zu jedem Zeitpunkt beurteilt und kritische Zustände frühzeitig erkannt werden.

Werden zuvor vereinbarte Mindestzuverlässigkeiten  $\beta_{\min}$  für die Gebrauchstauglichkeit unterschritten, müssen Instandsetzungsmaßnahmen ergriffen werden, welche sich direkt auf den vorherrschenden Bauwerkszustand auswirken. Ein Ablaufplan zur skizzierten Inspektionsstrategie ist in Bild 7 dargestellt.



**Bild 7:** Konzept einer zustandsbasierten Inspektionsstrategie für Bestandsbauwerke

Im vorliegenden Konzept für eine zustandsbasierte Inspektionsplanung, welches lediglich zur Unterstützung des Ingenieurs gedacht ist, kann in Abhängigkeit des Bauwerkszustands ein geeigneter Inspektionssaufwand (Inspektionsintervall und Inspektionsdurchführung) definiert werden, welcher unter dem Aspekt der Kosten- und Zuverlässigkeitsoptimierung eine belastbare Aussage über den aktuellen Bauteilzustand erlaubt.

## 6 Ausblick

Die Zustandsprognose und -bewertung erfolgte bisher ausschließlich auf Bauteilebene. Entscheidungen über erforderliche Inspektionen und Instandsetzungsmaßnahmen werden hingegen i.d.R. für das gesamte Bauwerk getroffen. Aus diesem Grund wird derzeit im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundforschungsprojekts („Nachhaltig Bauen mit Beton“) ein computergestütztes prädiktives Lebensdauermanagementsystem (PLMS) entwickelt, welches auf Basis eines dreidimensionalen, hierarchisch organisierten Bauwerksmodell probabilistische Schädigungsmodelle zur Zustandsprognose und zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden kombiniert [9]. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise Messergebnisse direkt am virtuellen Modell verankern und später dort ablesen. Außerdem ist das Ergebnis von Zustandsprognosen bauteilbezogen visualisierbar, wodurch Inspektions- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen leichter geplant werden können. Die zuvor dargestellten Ergebnisse sind Bestandteil dieses Vorhabens. Aufgrund der geplanten Flexibilität kann das PLMS auf unterschiedlichen Systemebenen (Bauteil bzw. Bauwerksebene) sowie für Bauwerke unterschiedlicher Komplexität angewandt werden und unterstützt somit Bauwerksbetreiber bei einem wirtschaftlich und nachhaltig optimierten Bauwerksbetrieb gemäß der Nutzeranforderungen.

## 7 Literatur

- [1] Bericht über die Qualität, Dauerhaftigkeit und Sicherheit von Spannbetonbrücken. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 2006.
- [2] Breit, W.: Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt von Stahl in Beton Dissertation, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, 1987.
- [3] Gehlen, Ch.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Heft 510 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
- [4] Schießl, P. et al.: “Model Code for Service Life Design”. FIB Bulletin 34, Lausanne, Schweiz, 2006.
- [5] Schießl P.; Mayer T.F.: „Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF – Verbundforschungsvorhabens "Nachhaltig Bauen mit Beton". Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 572“, Beuth-Verlag, Berlin, 2007.
- [6] Schießl, P.; Mayer, T.; Sodeikat, Ch.: Zustandsanalyse als Basis für eine fachgerechte Instandsetzung von Betontragwerken. Proceedings zur 16. ibausil, Weimar, 2006.
- [7] Straub, D.; Malioka, V.; Faber, M.H.: A framework for the asset integrity management of large deteriorating concrete structures, Structure and Infrastructure Engineering, Vol.5, No. 3, 2009.
- [8] Straub, D.; Faber, M.: Risikobasierte Inspektionsstrategien für den optimalen Unterhalt von Tragwerken. Stahlbau 75, Heft 5, 2006.
- [9] Lukas, K.; Borrmann, A.; Zintel, M.; Mayer, T.; Rank, E.: Developing a Life-Cycle Management System for Reinforced Concrete Buildings based on Fully-Probabilistic Deterioration Models. Proceedings of the 12th Int. Conf. on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Madeira, Portugal, 2009.