

# KANN DIE LEBENSDAUER VON INGENIEURBAUWERKEN VERLÄNGERT WERDEN? – EIN BEITRAG ZUM SICHERHEITSKONZEPT

## CAN THE LIFETIME OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES BE EXTENDED? – A CONTRIBUTION TO THE SAFETY CONCEPT

---

Alfred Strauss & Konrad Bergmeister (Universität für Bodenkultur Wien)

---

### KEYWORDS

Bestandsbauwerk; Lebensdauererlängerung; Schadensfolgeklassen; Sicherheitskonzept; Monitoring.

### KURZFASSUNG

Ein ganz wesentlicher Beitrag zur Verbesserung der Nachhaltigkeit unseres Bauwerksbestandes ist die Verlängerung der Nutzungsdauer. Daher kommt der Bewertung von Ingenieurbauwerken und der erforderlichen Sicherheit von bestehenden Tragwerken für eine bestimmte weitere Nutzungsdauer eine besondere Bedeutung zu.<sup>1</sup>

Mit ausreichender Sicherheit sollen sowohl die Tragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit über eine bestimmte Zeit gewährleistet werden.

Viele bestehende Bauwerke genügen nach jahrzehntelangem Betrieb nicht mehr den Anforderungen an die Tragsicherheit. Teilweise kann dies auf eine Veränderung der Lasten zurück-

geführt werden, die größer sein können als im Entwurfsstadium, wie die Verkehrslasten auf vielen Brücken. Ein weiterer Grund kann eine Baustoffverschlechterung sein, die zu einer Verringerung der Tragfähigkeit infolge reduzierter mechanischer Eigenschaften und eines Verlusts der Querschnittsfläche von Konstruktionsmaterialien führt. Weiters wurden die Bauwerke auf der Grundlage von Bemessungsregeln aus der Vergangenheit geplant und konstruiert, die heute mit neueren Erkenntnissen aktualisiert wurden. Wenn der Zustand eines Bauwerks bewertet wird, stellt sich schließlich die Frage, wie sich dieser in der nächsten Zeit entwickeln und wie hoch die verbleibende Nutzungsdauer sein wird.

### ABSTRACT

One very important contribution to improving the sustainability of our existing structures is to extend their service life. Therefore, the assessment of engineering structures and the required safety of existing structures is of particular importance.

With sufficient safety, both the load-bearing capacity and the serviceability should be guaranteed over a certain period of time.

---

<sup>1</sup> Ahrens et al., Lebensdauerorientierter Entwurf, Konstruktion, Nachrechnung, in Bergmeister/Fingerloos/Wörner (Hrsg.), Beton-Kalender 2013 (2012) 17.

Many existing structures no longer meet the requirements for structural safety after decades of operation. In some cases this is due to a change in loads that may be higher than at the time of design, such as the live loads on many bridges. Another reason can be a deterioration of the construction material, leading to a reduction in load-bearing capacity due to reduced mechanical properties and a loss of cross-sectional area of concrete or steel construction materials. In addition, structures were designed and built based on design rules from the past that have now been updated with more knowledge that is recent. Once the condition of a structure has been assessed, the final question is how the structure will develop in the near future and what the remaining service life will be.

## 1. EINLEITUNG

Die genannten Aspekte, die mit möglichen erhöhten oder veränderten Lasten, verschlechterten Materialeigenschaften oder der früheren Anwendung nicht konformer Konstruktions- und Detaillierungsregeln aus der Vergangenheit zusammenhängen, können einzeln oder in Kombination auftreten. Darüber hinaus hat eine verlängerte Lebensdauer von Bauwerken und Strukturen einen enorm positiven Effekt in Bezug auf die Nachhaltigkeit. Derzeit arbeiten internationale Vereinigungen, wie die Fédération international du béton (fib) an einer neuen Musternorm für Betonbauwerke (Model Code 2020),<sup>2</sup> die Regeln sowohl für den Entwurf neuer Bauwerke als auch für die Bewertung bestehender Bauwerke vorgibt. Die strukturelle Erhaltung bestehender Bauwerke ist daher eine wichtige neue Komponente. Auf der Grundlage einer detaillierten Bewertungsanalyse wurden bereits fundierte Modelle ausgearbeitet, die innovativ die Inspektions-, Überwachungs-, Monitoring- und Analyseergebnisse in ein ganzheitliches, sicherheitsorientiertes Bemessungs- und Leistungsformat integrieren (siehe Abbildung 1).

## 2. WIE IST DIE LEBENSDAUER DEFINIERT?

Die technische Lebensdauer (Nutzungsdauer) von Bauwerken oder Bauteilen kann auf der Grundlage des Eurocode EN 1990.2002,<sup>3</sup> Tabelle 2.1. – wie in Tabelle 1 gezeigt – ge-

<sup>2</sup> fib, Model Code for Concrete Structures (in Begutachtung, 2022).

<sup>3</sup> European Committee for Standardization, CEN, BS EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design (2010).

plant werden. In Abschnitt 2.1. des Eurocode EN 1990.2002 wurde definiert, dass ein Tragwerk so zu planen und zu errichten ist, dass es sowohl während des Baus als auch während der Nutzungsdauer mit angemessener Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit den Einwirkungen standhält.

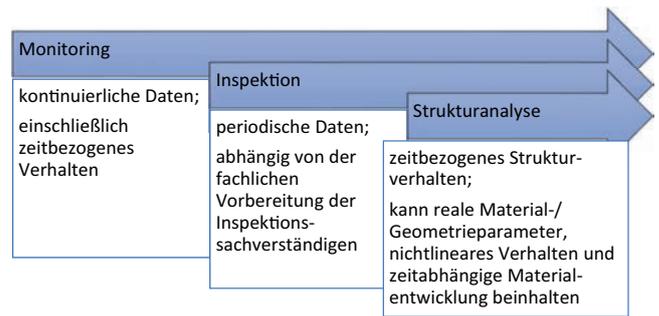


Abbildung 1: Integrierter, ganzheitlicher Ansatz der Bauwerksbewertung (© fib, Model Code [2022]; COST Action TU1406)

Zur Gewährleistung einer definierten Zuverlässigkeit über die technische Lebensdauer von Bauwerken müssen die einzelnen Bauteile und das gesamte Bausystem eine definierte Qualität aufweisen. In verschiedenen Richtlinien wurde für das Lebenszyklusmanagement unterschiedlicher Ingenieurtragwerke eine Zustandsüberwachung über die Nutzungsdauer entwickelt. Die dazugehörigen Lebenszykluskosten umfassen kumulativ den gesamten Lebenszyklus von Entwurf und Planung über Herstellung, Betrieb, Instandhaltung, Abbruch bis hin zur Entsorgung.

Eine potenzielle Möglichkeit der Kostenreduktion und einer Verbesserung der Nachhaltigkeit besteht in der Verlängerung der Lebensdauer bestehender Bauwerke. Mithilfe einer zuverlässigen Einschätzung des Zustands der Bauwerke, basierend auf einer geeigneten Bauwerksüberwachung (visuell sowie automatisiert), kann die verbleibende Nutzungsdauer besser beurteilt werden, die Instandsetzung zeitgerecht erfolgen und damit die Reinvestitionen im Voraus effizienter geplant werden. Bei der Zustandsüberwachung ist die visuelle Inspektion eine erste, vornehmlich qualitative und in Abhängigkeit von der Erfahrung des Prüfenieurs subjektive Zustandsbewertung. Die Ausgangsbasis jeder weiteren Entscheidung muss eine profunde Zustandsaufnahme und Bewertung des Bauwerks sein. Hierbei können sowohl zerstörende als auch nichtzerstörende Prüfverfahren und innovative Monitoring-

Klasse der Nutzungsdauer	Nutzungsdauer (in Jahren)	Schadensfolgeklassen	Beispiele
1	10	CC1	Tragwerke mit befristeter Standzeit
2	20 bis 25	CC2	Lagerhallen
3	30	CC1	Landwirtschaftlich genutzte Tragwerke
4	50	CC2	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
5	100	CC3	Monumentale Gebäude, Brücken, Tunnel, Staudämme
6 <sup>1)</sup>	>100 bis 150 <sup>2)</sup> und 200 <sup>3)</sup>	CC4	Strategisch wichtige Infrastruktur- und Bauprojekte sowie Schlüsselschutzbauwerke

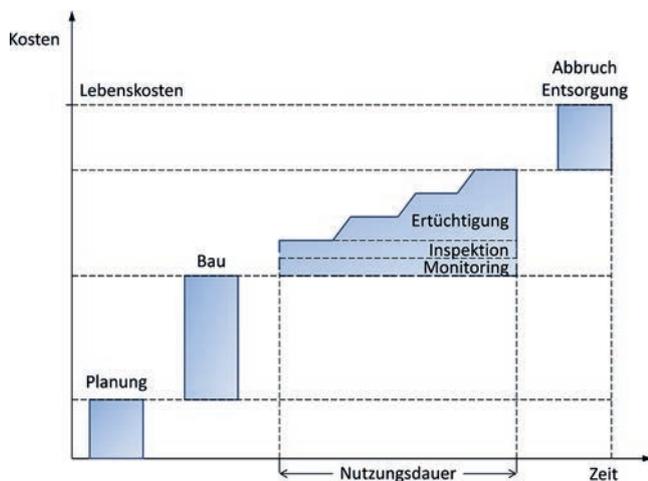
Tabelle 1: Technische Lebensdauer von Bauwerken und zugeordnete Schadensfolgeklassen

<sup>1)</sup> Für den Lebens- und Wirtschaftsraum wichtige Bauwerke; nicht im Eurocode vorgesehen.

<sup>2)</sup> Nutzungsdauer des Koralm- und Semmering Basistunnels.

<sup>3)</sup> Nutzungsdauer des Brenner Basistunnels.

Methoden angewandt werden. Damit können ein höherer Detaillierungsgrad als bei der visuellen Inspektion erreicht und der Degradationszustand der Baustoffe bewertet werden. Auch die zeitliche Entwicklung der Einwirkungsseite muss mitbetrachtet werden (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Lebenszykluskosten (© Bergmeister/Strauss/Hoffmann, Digitale Zustandserfassung von Gebäuden, Infrastrukturbauwerken und Naturgefahren, in Bergmeister/Fingerloos/Wörner [Hrsg.], Beton-Kalender 2022 [2022] 533)

Ein wesentlicher Aspekt ist aber sicherlich die kontinuierliche Aktualisierung und Feinabstimmung der numerischen und mechanischen System- und Werkstoffannahmen bei adaptiven Modellen zur Schadensvorhersage. Sehr viel genauere und objektivere Schlüsse können aus einem kontinuierlichen Monitoring gewonnen werden. Die laufenden Entwicklungen in der Komponentenentwicklung von Sensor- sowie rechnergestützten Mess- und Datenverarbeitungs- und Kommunikationstechnologien haben zur Entwicklung einer Vielzahl von Konzepten und Systemen zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und Bauwerksüberwachung geführt. Dennoch sind solche teilweise automatisierten Systeme zur Bauwerksüberwachung vielmehr als Ergänzung und nicht als Ersatz für die visuelle Inspektion aufzufassen.

### 3. MONITORING ZUR VERLÄNGERUNG DER NUTZUNGSDAUER

Im klassischen Ingenieurwesen wird unter Monitoring die Beobachtung und die Dauerbeobachtung oder Überwachung eines Systems oder eines Bauwerks verstanden. Da der Begriff Monitoring in der Ingenieursprache bereits sehr gut etabliert ist, wird der Begriff Monitoring im folgenden Diskurs stellvertretend für die zeitdiskrete und kontinuierliche Überwachung verwendet.

#### 3.1. Allgemeines

Gerade bei Bestandsbauwerken wie gealterten Brücken kann Monitoring ein sehr effizientes Mittel sein, um Restnutzungen, Tragfähigkeitsreserven oder die Systemtragfähigkeit zu identifizieren, die bei Nachrechnungen mit Ersatzmodellen<sup>4</sup> wie Balken oder Platten nicht nachweisbar sind. Gründe sind oft Unsicherheiten in Eingangsparametern des numerischen Modells, den tatsächlich wirkenden Verkehrslasten oder Materialparametern und der sich ständig fortentwi-

ckelnde Anspruch an Bauwerke, der gealterte Strukturen im Vergleich zu neuwertigen im Sinne einer „konzeptionellen Ableitung auf dem Papier“ („conceptual aging“) zusätzlich abfallen lässt.<sup>5</sup> Monitoring umgeht größtenteils die Umwege von Modellen und versucht, die tatsächlich relevanten Daten am Bauwerk direkt zu messen, also z.B. die reale Belastung eines Spannstahls. Dabei geht es darum, sensitive Tragelemente zu identifizieren, mit geeigneter Strategie aussagekräftige Daten messtechnisch zu erfassen und diese mit möglichst realitätsnaher Aussage zur Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit oder einer erwarteten Restnutzungsdauer auszuwerten. Bei ungünstigen Konstellationen können die Unterschiede zwischen rechnerischer Abschätzung und realen Messungen ganze Größenordnungen erreichen.

Monitoring bietet also bei Bestandsbauwerken besondere Möglichkeiten, erfordert aber Erfahrung in Bezug auf geeignete Methoden, Messstellen und Auswertungen.<sup>6</sup> Es gewinnt zunehmend an Bedeutung, nicht zuletzt aufgrund der kontinuierlich alternden Bausubstanz, die mit fortschreitender Nutzung und in der Regel steigenden Beanspruchungen bzw. Degradationen besonderes Augenmerk erfordert.

Im fib-Bulletin<sup>7</sup> und in den Berichten 3.1. und 3.2. des IM-SAFE-Forschungsprojekts<sup>8</sup> wird ein Überblick über die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Monitoring- und Sensortechnik sowie über deren Übertragung auf die Zustands-/Lebensdauerbewertung von Ingenieurbauwerken gegeben. Unter anderem werden auch Vorschläge für eine mögliche Normentwicklung zur Integration einer auf dateninformierten Monitoring basierten Bewertung von Infrastrukturbauwerken gemacht.

#### 3.2. Drohnenbilder als Hilfe zur Zustandsbewertung

Neben den klassischen Zustandsbewertungen können heute mit Hochleistungsdrohnen und-sensoren sehr detaillierte Bilder und Videos von Bestandsbauwerken aufgenommen sowie 3D-Modelle erarbeitet werden (siehe Abbildung 3). Mit Photogrammetrie, Laserscan, Thermografie und Hyperspektralanalyse eröffnen sich neue Perspektiven zur Erfassung und Bewertung des Bauwerkszustands. Die Verarbeitung der Daten mit Algorithmen zur Auswertung der Bilder und die Modellierung eines digitalen Zwillings sind weitere Schritte zur Identifikation des zeitlich veränderlichen Zustands und zur Quantifizierung der Nutzungsdauer.

In Kombination mit künstlicher Intelligenz gelingt es, eine (teil)automatisierte digitale Erfassung und Auswertung durchzuführen. In mehreren Werken werden die Anwendbarkeit solcher digitalen Methoden bereits aufgezeigt und wertvolle praktische Hinweise für die Durchführbarkeit sowie für die Anwendungsgrenzen als auch die Einschätzung der Nutzungsdauer gegeben.<sup>9</sup>

5 Bergmeister et al., Innovative Monitoringstrategien für Bestandsbauwerke, in Bergmeister/Fingerloos/Wörner (Hrsg.), Beton-Kalender 2015 (2014) 315.

6 Bergmeister/Santa, Brückeninspektion und -überwachung, in Bergmeister/Wörner (Hrsg.), Betonkalender 2004 (2004) 409.

7 Bergmeister/Santa in Bergmeister/Wörner, Betonkalender 2004, 409.

8 H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.1: Appraisal of methods for safety evaluation and risk management (2020) 216; H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.2: Background Materials for implementation of decision-making regarding maintenance strategies (2020) 170.

9 Z.B. Bergmeister/Strauss/Hoffmann in Bergmeister/Fingerloos/Wörner, Beton-Kalender 2022, 533.

### 3.3. Verhaltensbasierte Bewertung für die Nutzungsdauer

Im Bereich des Bauwesens kann das Konzept einer performancebasierten Bewertung auf verschiedenen Ebenen angewandt werden. Für Infrastrukturen lassen sich die relevanten Verhaltensebenen wie folgt spezifizieren:

- » **Netz – Korridor:** Eine Gruppe miteinander verbundener Bauobjekte, die gemeinsam eine bestimmte Funktion erfüllen (z.B. ein Korridor von Tunneln, Brücken usw.).
- » **System – Bauwerk:** Ein Bauwerk, das einer bestimmten Kombination von Einwirkungen Widerstand leistet (z.B. Schutzbauwerke usw.) oder eine bestimmte Funktion erfüllt (z.B. Brücken, Tunnel etc.).
- » **Komponente – Bauteil:** Einzelfindbarer Teil eines Systems, das aus einem oder mehreren Elementen besteht und eine bestimmte Funktion für das System erfüllt (z.B. Balken, Stütze, Scheibe, Platte, Schale usw.).

Auf all diesen Verhaltensebenen müssen z.B. die für das Lebenszyklusmanagement festgelegten Ziele erreicht werden. Dabei sind die verschiedenen Zielebenen, die Anforderungen und Beschränkungen mit sich bringen, zu unterscheiden und zu berücksichtigen.

Wie in Abbildung 4 schematisch dargestellt, werden die primären Ziele des Lebenszyklusmanagements auf der höchsten strategischen Ebene durch politische Vorgaben (z.B. Gesetzgebung, Verwaltungsvereinbarungen etc.) festgelegt. Solche Ziele sind z.B. Vorgaben für die Mobilität (z.B. Nachfahrverbot, Verlagerung von Gütern auf die Schiene etc.), für die Klimaverträglichkeit (z.B. Reduktionspfade für Emis-

sionen) oder für die Kreislaufwirtschaft (z.B. Verpflichtung für Baustoffrecycling) oder auch für die Energieneutralität.

Das Verhalten kann mit Verhaltenskriterien wie Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit und Sicherheit (RAMS), erweitert um Gesundheit, Umwelt, Wirtschaft und Politik (RAMSSHEEP), beschrieben werden.

Die Hauptanforderungen können in Form von Schlüsselkennwerten (Key Performance Indikatoren – KPI) festgelegt werden. In Tabelle 2 werden solche KPI mit Bezug auf die RAMSSHEEP-Überlegungen sowohl für Tunneln als auch für Brücken beschrieben.

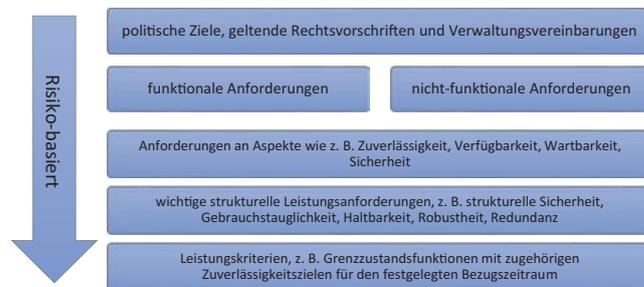


Abbildung 4: Multiple Zielebenen bei der Ermittlung von Anforderungen an Infrastrukturanlagen nach IM-SAFE D3 (© H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.1, 216; H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.2, 170)

### 3.4. Datengestützte Ansätze (Monitoring) für die Nutzungsdauerverlängerung

Die Verhaltensbewertung einer Struktur, eines Bauwerks oder einer Anlage sowie in der Folge auch die damit verbundene Bewertung der möglichen Nutzungsdauerverlängerung kann gemäß den internationalen Richtlinien

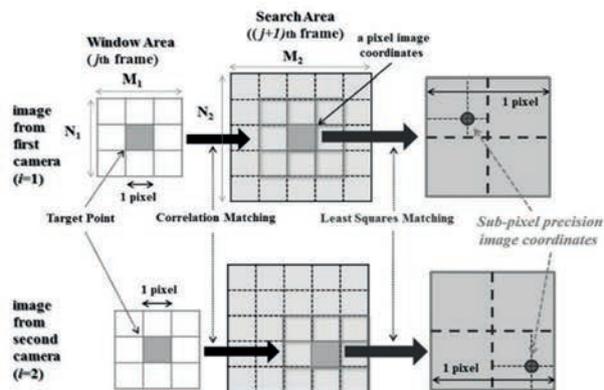
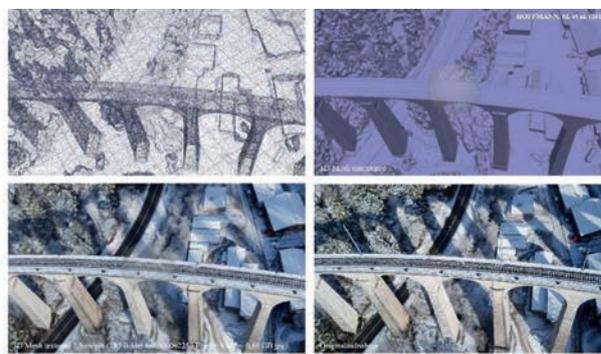
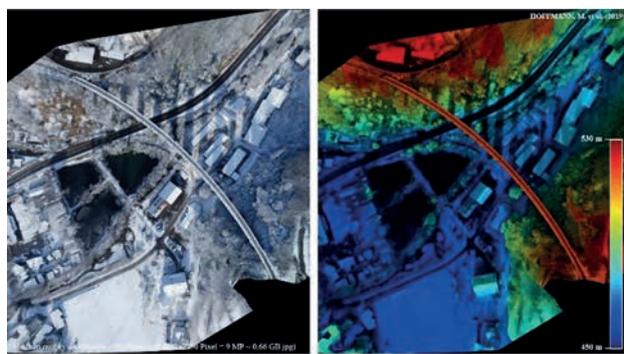


Image Matching für Subpixel – Genauigkeit mit Korrelationsanalyse (LEE, H. et al. 2016)

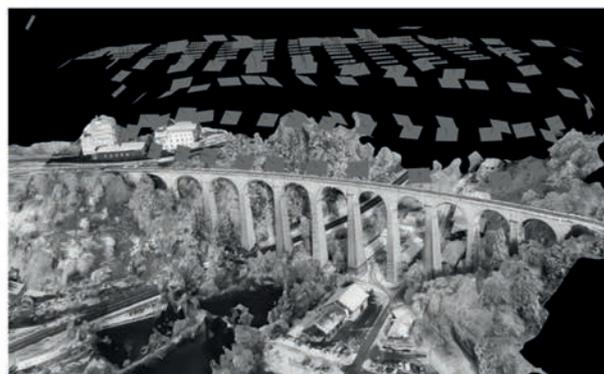


Image Matching mit Agisoft Metashape am Beispiel Pont St. Ursanne (Hoffmann, M. et al. 2019)

Abbildung 3: Drohnen basierte Objektaufnahmen und Zustandsbewertungen (© Bergmeister/Strauss/Hoffmann in Bergmeister/Fingerloos/Wörner, Beton-Kalender 2022, 533)

(fib-bulletin<sup>10</sup>) in mindestens drei Stufen erfolgen, um den Entscheidungsprozess und die Optimierung der Instandhaltung effektiv zu gestalten:<sup>11</sup>

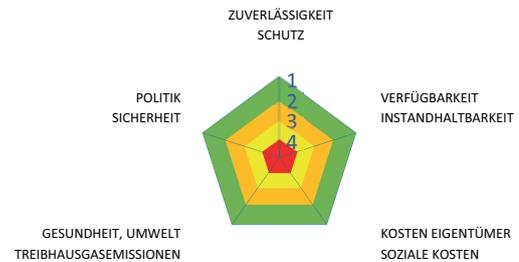
- » **Stufe I:** visuelle Inspektionen;
- » **Stufe II:** detaillierte Inspektionen, Prüfungen und Structural Health Monitoring (SHM);
- » **Stufe III:** SHM & Modellierung.

Dieser mehrstufige Ansatz der Verhaltensbewertung spiegelt sich in dem Entscheidungsprozess wider und bildet auch einen Rahmen für die datengestützte Zuverlässigkeitsbewertung,<sup>12</sup> der eng mit dem Lebenszyklusmanagement von Strukturen verknüpft ist. Der vorgeschlagene Ablauf beschreibt die verschiedenen Phasen der Bewertung neuer und bestehender Bauwerke, wobei der Schwerpunkt auf den Ebenen (Netz, System und Komponente) liegt und die verfügbaren Daten während der Lebensdauer und des Instandhaltungsprozesses des Bauwerks berücksichtigt werden.

Nähere Details zu den in den einzelnen Ebenen durchzuführenden Bewertungs-, Entscheidungs-, und Analyseprozessen sind in den für die CEN Normgebung entwickelten Deliverab-

les 3.1. und 3.2.<sup>13</sup> enthalten, wobei in diesen Prozessen im Speziellen die Schlüsselkennwerte und Schlüsselkennwertanforderungen nach Tabelle 2 und Abbildung 5 bewertet werden.

Wie in Tabelle 2 und Abbildung 5 zu erkennen ist, beruht die Bewertung des Verhaltens auf Zustandsnoten. Die Schlüsselkennwerte umfassen neben der Zuverlässigkeit sowohl die Aspekte der Verfügbarkeit der Kosten, der Umwelt und Gesundheit als auch der Politik, Sicherheit und Resilienz. Dieser holistische Ansatz ermöglicht somit auch eine umfassende Herangehensweise bei der Bewertung der verbleibenden Nutzungsdauer bzw. der möglichen Nutzungsdauerverlängerung.



**Abbildung 5:** Holistische Verhaltensbewertung entsprechend dem RAMSS-HEEP-Ansatz als Basis für eine mögliche Nutzungsdauerverlängerung (© H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.1, 216; H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.2, 170; Strauss et al., Vortrag vom 16.6.2022)

10 fib, Model Code for Concrete Structures (2022).

11 Strauss et al., Performance indicators for an objective assessment and through-life management of bridges and tunnels, Vortrag gehalten am fib Congress am 16.6.2022 in Oslo.

12 H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.1, 216; H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.2, 170.

13 H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.1, 216; H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.2, 170; Strauss et al., Vortrag vom 16.6.2022.

	Definition
<b>Zuverlässigkeit</b>	Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauwerk für einen bestimmten Zweck geeignet, d.h. in der Lage ist, die vorgesehene Aufgabe innerhalb bestimmter Leistungsgrenzen für eine bestimmte Zeitspanne unter bestimmten Bedingungen während seiner Lebensdauer zu erfüllen. Die Zuverlässigkeit in Bezug auf die strukturelle Sicherheit ist hierbei zu berücksichtigen.
<b>Schutz</b>	Der Aspekt der Sicherheit steht für die Sicherheit eines Systems im Hinblick auf bewusst unsichere menschliche Handlungen, wie Vandalismus, Terrorismus etc.
<b>Verfügbarkeit</b>	Zeitanteil, in dem sich ein System in einem funktionsfähigen Zustand befindet, einschließlich möglicher Unterbrechungen für geplante Inspektionen oder Wartungseingriffe.
<b>Instandhaltbarkeit</b>	Die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte aktive Instandhaltungsmaßnahme für ein Objekt unter bestimmten Nutzungsbedingungen innerhalb eines bestimmten Intervalls durchgeführt werden kann. Die Instandhaltbarkeit bezieht sich auf Eigenschaften, mit denen eine Struktur gewartet wird. Dabei sollen Schäden oder Ursachen behoben, defekte Komponenten repariert oder ersetzt werden. Unvorhergesehene Instandhaltungsmaßnahmen sollten möglichst vermieden werden.
<b>Kosten des Eigentümers</b>	Angemessene Lebenszykluskosten für den Eigentümer, einschließlich der Bauunterhalts- und Betriebskosten, Kosten für Schäden etc.
<b>Soziale Kosten</b>	Akzeptable Risiken und damit einhergehende Kosten (z.B. Umwege/Unfälle im Zusammenhang mit der Minimierung der langfristigen Kosten und der Instandhaltungsaktivitäten während der Lebensdauer eines Bauwerks). Die durch Umwege und Verspätungen entstehenden Nutzerkosten werden hier nicht berücksichtigt.
<b>Umwelt – Nachhaltigkeit Treibhausgasemissionen</b>	Durch Material- und Strukturoptimierung müssen die negativen Auswirkungen auf die Umwelt während des Lebenszyklus eines Bauwerks minimiert und die Auswirkungen mit dem Nutzen des Bauwerks in Einklang gebracht werden. Intelligente Planungs-, Herstellungs- und Baulösungen sollen sowohl die Kreislaufwirtschaft ermöglichen als auch ein ressourcensparendes Bauen, Betreiben und Erhalten ermöglichen.
<b>Ressourceneffizienz</b>	
<b>Abfallvermeidung</b>	
<b>Gesundheit</b>	Das körperliche, geistige und/oder soziale Wohlbefinden bezieht sich auf die Nutzer der Infrastruktur oder auf Personen, die auf oder in der Nähe der Infrastruktur arbeiten.
<b>Politik</b>	Bezieht sich auf politisch-administrative und soziale Folgen, z.B. die Beseitigung der Ursachen für öffentliche Proteste, Auswirkungen auf die Reputation der Verwaltungsorganisation oder Folgen für das Ansehen der politisch/administrativ Verantwortlichen etc.
<b>Sicherheit</b>	Sicherheit ist ein auf Wahrscheinlichkeitsrechnung basierender und kulturell akzeptierter Wert für verbleibende Risiken, der sich auf die gesamte Nutzungsdauer eines Bauwerks bezieht (der Verlust von Leib und Leben aufgrund von Bauwerksversagen wird nicht berücksichtigt).

Tabelle 2: KPI für Tunnel und für Brücken

## 4. DATENBASIERTE ZUVERLÄSSIGKEITS- ODER RISIKOBEWERTUNG VS. NUTZUNGSDAUER-VERLÄNGERUNG

### 4.1. Zuverlässigkeitsniveau in Abhängigkeit der Nutzungsdauer und Schadensfolgeklassen

Wie aus den Tabellen und Grafiken in Abbildung 6 ersichtlich, erlauben die einschlägigen internationalen Normen und Regelwerke eine eindeutige Beziehung zwischen der Nutzungsdauer, den Schadensfolgeklassen und den Zielzuverlässigkeitsindizes. Diese Beziehungen bilden auch die Grundlage für die Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte sowohl für neue als auch für bestehende Bauwerke, wie im Model Code 2020 empfohlen und in Abbildung 6 gezeigt wird.

In den folgenden Tabellen werden für Nutzungsdauern von 50, 100, 150 Jahren die für die jeweilige Schadensfolgeklasse notwendige zu erzielende Zuverlässigkeit in Form von Sicherheitsindizes  $\beta$  dargestellt. Wie klar ersichtlich wird, sollen die Bauwerke am Ende ihrer Nutzungsdauer noch eine gewisse Sicherheit (akzeptables Risiko) aufweisen (z.B. nach 100 Jahren Nutzungsdauer für RC2 noch ein  $\beta = 3,8$ ).

Die Verhaltensbewertung bestehender Bauwerke unterscheidet sich von neuen Bauwerken in mehreren Aspekten. Ein bestehendes Bauwerk hat schon eine bestimmte Zeit seine Funktion ausgeübt und weist daher nicht mehr das gleiche Zuverlässigkeitsniveau wie ein neues Bauwerk auf.

Bei der Planung von Eingriffen an bestehenden Bauwerken zur Anhebung des Verhaltensniveaus auf das für neue Bauwerke erwartete Niveau müssen im Allgemeinen erhebliche Kosten in Kauf genommen werden. Die verbleibende Nutzungsdauer bestehender Bauwerke ist oft kürzer als die Bemessungslebensdauer neuer Bauwerke (50 oder 100 bzw. bei Infrastrukturen 200 Jahre). Zusätzlich liegen vermehrt Informationen aus Inspektionen und Überprüfungen oder von einem Monitoring vor. Eine Neukalibrierung der angestreb-

ten Zuverlässigkeitsniveaus  $\beta_{\text{target}}$  und der entsprechenden partiellen (oder globalen) Sicherheitsfaktoren  $\gamma$  ist daher erforderlich. Auf der Grundlage der für das Bauwerk gesammelten Informationen wird das Zuverlässigkeitsniveau bewertet,<sup>14</sup> wobei das Risiko für den Verlust von Menschenleben oder für die Auswirkungen auf die Umwelt im Wesentlichen unverändert bleibt.

Ähnlich wie bei der Planung neuer Bauwerke ist bei der Bewertung bestehender Bauwerke nachzuweisen, dass bei einem angemessenen Zuverlässigkeitsniveau kein Grenzzustand überschritten wird. Auf dieser Grundlage besteht das Ziel der zukünftigen Normung für bestehende Bauwerke, ein angemessenes Zuverlässigkeitsniveau ( $\beta_{\text{Soll}}$ ) im Hinblick auf die Restlebensdauer des Bauwerks für eine Bezugsperiode  $t_{\text{ref}}$  zu bewerten. Dabei müssen auch mögliche Unsicherheiten bei der Ermittlung der Bewertungsparameter berücksichtigt werden.

Sowohl im Model Code 2020 als auch in den Ergebnissen des europäischen Forschungsprojekts IM-SAFE-Projekt wurden verschiedene Methoden der Bewertung untersucht (z.B. risikobasierte, zuverlässigkeitsbasierte und semiprobabilistische Methoden). Die genaueste Bewertungsmethode wäre die explizite Berücksichtigung aktualisierter Last- und Widerstandsvariablen durch Anwendung von zuverlässigkeitsbasierten Methoden oder risikobasierten Entscheidungsverfahren. Diese Verfahren erfordern jedoch ein hohes Maß an Wissen und werden im Allgemeinen auf strategische Strukturen oder Anlagen mit ungewöhnlichen Risikobedingungen für Menschenleben angewendet.

Das Zuverlässigkeitsniveau von bestehenden Bauwerken kann zwischen dem Zielniveau  $\beta_{\text{v}}$ , das das Mindestniveau darstellt, unterhalb dessen das Bauwerk unzuverlässig ist

<sup>14</sup> Bergmeister/Strauss/Hoffmann in Bergmeister/Fingerloos/Wörner, Beton-Kalender 2022, 533.

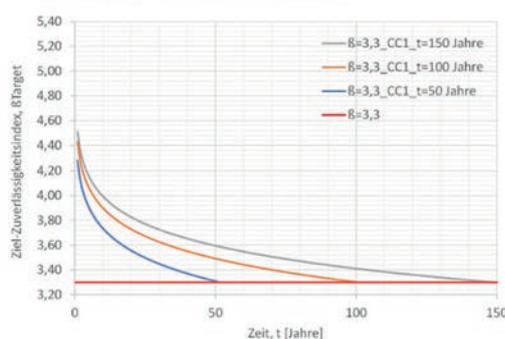
Schadensfolgeklassen	1 Jahr	50 Jahre
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

$\beta$  Zielwerte nach EN1990

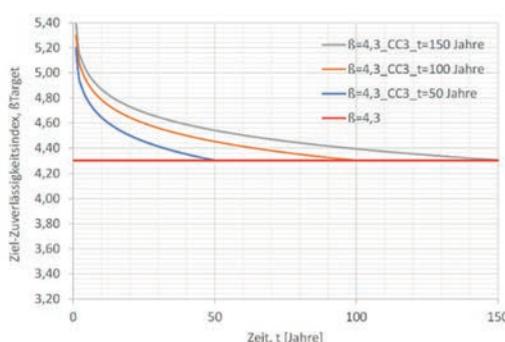
Schadensfolgeklassen	1 Jahr	100 Jahre
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,4	3,3

Schadensfolgeklassen	1 Jahr	150 Jahre
RC3	5,4	4,3
RC2	5,0	3,8
RC1	4,5	3,3

Minimale Ziel-Zuverlässigkeiten  $\beta$  für CC1



Minimale Ziel-Zuverlässigkeiten  $\beta$  für CC3



**Abbildung 6:** Zielzuverlässigkeitsindize  $\beta$  für Nutzungszeiträume von 50, 100 und 150 Jahren – Rekonstruktion der den CC1- und CC3-Klassen spezifischen Indize  $\beta$  pro Jahr aus dem Zielzuverlässigkeitsindex  $\beta = 3,3$  und  $\beta = 4,3$  für die Nutzungszeiträume 50, 100 und 150 Jahre.

und modernisiert werden müsste, und  $\beta_{up}$ , das das Zielniveau darstellt, das eine optimale Modernisierungsstrategie anzeigt, variieren.

Bei der Verhaltensbewertung von bestehenden Brücken und allgemeinen Bauwerken besteht in der korrekten Analyse und Modellierung der Degradationsphänomene und deren Auswirkungen auf die Tragfähigkeit eine der größten Herausforderungen. Bei der Bewertung der strukturellen Leistungsfähigkeit und des Zustands bestehender Bauwerke mithilfe eines datengesteuerten Ansatzes muss sich die Analyse auf verfügbare Informationen und Daten stützen, die bei Prüfungen, Inspektionen und Überwachungen gesammelt wurden. Diese Daten tragen zur Erstellung von Strukturmodellen bei, die sich für die Analyse des Zustands der Verschlechterung sowohl zum Zeitpunkt der Überprüfung als auch für die spätere Entwicklung im Laufe der Zeit eignen. Die Sammlung kontinuierlicher Überwachungsdaten ist auch für die Neukalibrierung der charakteristischen Werte der Basisvariablen und folglich der Teilfaktoren auf der Grundlage aktualisierter Informationen sowie für die Verbesserung von numerischen Finite-Elemente-Modellen von Bedeutung. In dieser Hinsicht wäre eine kontinuierliche Überwachung – (Structural Health Monitoring – SHM) – ein sehr wichtiges Instrument für die Bewertung des Strukturverhaltens während der Nutzungsdauer.

Es stehen mehrere Modelle zur Verfügung, um Elemente der probabilistischen Risikobewertung mit SHM zu kombinieren, indem Versagensarten von Bauwerken als Bayes'sche Netzwerkdarstellungen von Fehlerbäumen modelliert und dann den Versagensereignissen Kosten oder Nutzen zugewiesen werden.<sup>15</sup> Auch unvorhergesehene Risiken können mithilfe heuristischer Ansätze in den Fehlerbaum integriert werden, wobei die Unschärfe der Risiken die Festlegung geeigneter Vorkehrungen und Maßnahmen erfordert.<sup>16</sup>

## 4.2. Lebensdauermanagement und Nutzungsdauerverlängerung

Instandhaltung ist eine Kombination aus allen technischen, administrativen/organisatorischen und Managementaktivitäten, die während der Nutzungsdauer eines Bauwerks durchgeführt werden, um seine Leistungsfähigkeit und künftige Funktionalität zu erhalten oder wiederherzustellen, sodass es die erforderliche Funktion erfüllen kann. Mangelnde Instandhaltung in Verbindung mit suboptimalen Strategien für das Infrastrukturmanagement und unzureichenden Ressourcen beschleunigen den strukturellen Verfall und erhöhen folglich das Risikoniveau. Obwohl die Anwendung von präventiver und zustandsorientierter Instandhaltung stetig zunimmt, besteht eine der wichtigsten Herausforderungen, die es kurzfristig zu bewältigen gilt, darin, den Übergang von korrigierenden und zeitbasierten Instandhaltungsansätzen zu einem risikobasierten Verfahren zu erleichtern, indem die zustandsorientierten Instandhaltungsstrategien und -prakti-

15 *fib TG 3.3, Existing concrete structures: Life management, testing and structural health monitoring, fib Bulletin 2022 (in Begutachtung); Hughes et al., A probabilistic risk-based decision framework for structural health monitoring, Mechanical Systems and Signal Processing 2021, 107339.*

16 *H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.1, 216; H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.2, 170; fib TG 3.3, fib Bulletin 2022; Bergmeister (Hrsg.), Models for Financing, Cost and Risk Assessment: Major Railway Tunnel Projects in Europe (2022).*

ken auf lokaler, nationaler und EU-Ebene standardisiert und harmonisiert werden.<sup>17</sup>

Ein solches Lebenszyklusmanagement erfordert daher eine Risikobewertung für die gesamte Nutzungsdauer der Anlage und eine Bewertung der Lebenszykluskosten (LCC) sowie eine Lebenszyklusanalyse (LCA) der Umweltauswirkungen und des Nutzens. Dabei müssen die verschiedenen Bewertungsebenen (z.B. Netz, System, einzelne Komponente eines Bauwerks) berücksichtigt und jede einzelne Ebene überwacht werden. Darüber hinaus müssen die Risikoszenarien im Laufe der Zeit angemessen aktualisiert werden, um die Folgen der laufenden Veränderungen zu berücksichtigen.

Bei neuen Bauwerken muss der Ansatz für das geplante Instandhaltungsmanagement bereits in der Planungsphase festgelegt und dann erforderlichenfalls anhand der Ergebnisse der nach dem Bau durchgeführten Überwachung angepasst werden. Die Angemessenheit des Instandhaltungsmanagementkonzepts und der Instandhaltungsstrategie muss auch während der Betriebsphase bewertet werden, um sicherzustellen, dass sie weiterhin gültig sind. Im Fall von Eingriffen zur Änderung/Verbesserung des Bauzustands müssen Informationen über die durchgeführten Eingriffe und die Veränderung der Leistungsfähigkeit nach den Eingriffen bei der Überprüfung des Instandhaltungsmanagementkonzepts und der Instandhaltungsstrategie in der Phase nach dem Eingriff gesammelt, bewertet und aufgezeichnet werden. Die während des Lebenszyklusmanagements einer Anlage gesammelten Daten sind von grundlegender Bedeutung, um die Eignung des Bauwerks für die zirkuläre Wiederverwendung von Elementen oder Komponenten für das Re- oder Upcycling von Baumaterialien zu beurteilen.

Bei der Wahl der Instandhaltungsstrategie sollte berücksichtigt werden, dass es Situationen gibt, in denen Instandhaltungsmaßnahmen nicht durchführbar sind. Dies gilt z.B. für Teile eines Bauwerks wie Fundamente, bei denen die Inspektion und Anwendung von Erhaltungsmaßnahmen sehr schwierig oder unpraktisch ist oder bei denen es unwirtschaftlich und/oder technisch schwierig wäre, vorbeugende oder korrigierende Maßnahmen zu ergreifen.

## 5. STAND DER AKTUELLEN NORMEN IN BEZUG AUF DIE LEBENSDAUER

### 5.1. Aktuelle Normen

Ein Bauwerk wird, wie in den vorherigen Abschnitten bereits umrissen, als sicher eingestuft, wenn bei vergleichbaren Situationen das vorhandene Risiko ein von der Gesellschaft akzeptiertes Restrisiko nicht übersteigt (Eurocode 1). Dieses akzeptierte Risiko wird in Form von Wahrscheinlichkeiten in Bezug auf eine Zeiteinheit ausgedrückt. Gerade um die Erhaltung von Bestandsbauwerken voranzutreiben und angepasste (reduzierte) Teilsicherheitsfaktoren verwenden zu können, sollte diese Bezugsdauer auf die restliche Nutzungszeit bezogen werden. Der Grenzzustand der Tragfähigkeit wird mit einer akzeptierten Versagenswahrscheinlichkeit von  $p_f = 10^{-6}$ /Jahr definiert.

17 *H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.1, 216; H2020 CSA IM-SAFE, Report 3.2, 170; Bergmeister/Strauss/Hoffmann in Bergmeister/Fingerloos/Wörner, Beton-Kalender 2022, 533; Daró et al, Lessons learned from proactive maintenance practices for concrete bridges, Vortrag gehalten am fib Congress am 16.6.2022 in Oslo.*

Die ÖNORM B1990-1:2013<sup>18</sup> und die ÖNORM EN 1990:2003<sup>19</sup> bilden die Grundlage für die Behandlung der Zuverlässigkeit von Tragstrukturen im Bauwesen, wobei für die Differenzierung der Zuverlässigkeit entsprechende Versagensfolgeklassen (bzw. Schadensfolgeklassen) eingeführt werden, bei denen die Auswirkungen des Versagens oder der Funktionsbeeinträchtigung eines Tragwerks betrachtet werden. Aktuell erfolgt die Überarbeitung der beiden Normen EN 1990 (bereits als O2. Entwurf vorliegend) bzw. ÖNORM B1990. In Anhang B der ÖNORM B1990:2013 sind Beispiele für die Zuordnung der Versagensfolgeklassen zu Hochbauten bzw. sonstigen Ingenieurbauwerken angeführt.

Die aktuelle ÖNORM EN 1990 bzw. die einschlägigen Normen decken derzeit eine maximale Nutzungsdauer von 100 Jahren mit den vorgegebenen Zuverlässigkeitsindizes ab. Für eine längere Nutzungsdauer, z.B. von 150 Jahren, müsste eine entsprechende Neuformulierung der Teilsicherheitsfaktoren erfolgen. Dies kann über eine Zuordnung der in der ÖNORM EN 1990 bzw. ÖNORM B 1990 formulierten Versagensfolgeklassen (CC) erfolgen. Dabei müssen die derzeitigen CC-Klassendefinitionen mit den akzeptablen Risikoelementen auf eine Nutzungsdauer von mehr als 50 Jahren entwickelt werden (siehe hierzu Abbildung 6 für die Versagensfolgeklasse 1 [CC1 bzw. RC1] und für die Versagensfolgeklasse 3 [CC3 bzw. RC3]).

## 5.2. Sicherheitsindizes für eine Nutzungsdauer größer gleich 50 Jahre

Für Ingenieurbauwerke mit einer Nutzungsdauer  $t_N \geq 50$  Jahren ist das den CC-Klassen zugeordnete Sicherheitsniveau, das durch Zielzuverlässigkeitsindizes  $\beta_{\text{target}}$  (siehe Tabellen in Abbildung 6) angegeben wird, wie folgt anzupassen.

1. Die Zielzuverlässigkeitsindizes  $\beta$  der jeweiligen CC-Klassen für die Nutzungsdauer von 50 Jahren (siehe Tabellen in Abbildung 6) werden als Zielzuverlässigkeitsindizes  $\beta_N$  der neu definierten Nutzungsdauer ( $\geq 50$  Jahre) definiert.
2. Die Zielzuverlässigkeitsindizes  $\beta_N$  der Nutzungsdauer  $t_N \geq 50$  Jahre werden auf einen Zielzuverlässigkeitsindex für den Bezugszeitraum von einem Jahr  $\beta_1$  wie folgt umgerechnet.

$$\beta_1 = -\Phi^{-1}(p_{f,1}) = -\Phi^{-1}\left(\sqrt[t_N]{p_{f,N}}\right) \quad (1)$$

mit

$$p_{f,N} = \Phi^{-1}(\beta_N) \text{ (siehe auch Tabelle 3)} \quad (2)$$

$\beta_1$  Zielzuverlässigkeitsindex für den Bezugszeitraum 1 Jahr

18 Austrian Standards Institute, ÖNORM B 1990-1, Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung – Teil 1: Hochbau – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990 und nationale Ergänzungen (Ausgabe: 1.1.2013).

19 Austrian Standards Institute, ÖNORM EN 1990, Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung (Ausgabe: 15.3.2013).

- $p_{f,1}$  Jährliche Versagenswahrscheinlichkeit für den Bezugszeitraum 1 Jahr
- $T_N$  Nutzungsdauer N in Jahren
- $\beta_N$  Zielzuverlässigkeitsindex zum Ende der Nutzungsdauer N
- $p_{f,N}$  Versagenswahrscheinlichkeit zum Ende der Nutzungsdauer N

Die Umrechnung der den Versagenswahrscheinlichkeiten zugeordneten Zuverlässigkeitsindizes kann auch gemäß der folgenden Tabelle 3 vorgenommen werden.

3. Der Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_c$  des Widerstands des Werkstoffs Beton kann unter der Annahme einer Normalverteilung für eine Nutzungsdauer  $\geq 50$  Jahre in Folge wie folgt ermittelt werden:

$$\gamma_{c,N} = \frac{f_{ck}}{f_{cd}} = \frac{1 - K_{p,c} \cdot V_{c,N}}{1 - \beta_{1,N} \cdot \alpha_c \cdot V_{c,N}} \quad (3)$$

- $\beta_{1,N}$  Zielzuverlässigkeitsindex für den Bezugszeitraum von einem Jahr berechnet aus dem  $\beta_N$  zum Ende der Nutzungsdauer N
- $K_{p,c}$  Vordefinierte fünf Prozent Fraktillfaktor der Verteilung des Widerstands; für eine Stichprobenanzahl  $n = \infty$  ist  $K_{p,c} = 1,645$
- $V_c$  Variationskoeffizient des Widerstands (Beton  $V_c$  0,08 – 0,12)
- $\alpha_c$  Sensitivitätsfaktor des Widerstands; für die obere Grenze  $\alpha_c = 0,8$

4. Der Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_s$  des Widerstands des Werkstoffs Stahl kann unter der Annahme einer Normalverteilung für eine Nutzungsdauer  $\geq 50$  Jahre in Folge wie folgt ermittelt werden:

$$\gamma_{s,N} = \frac{f_{sk}}{f_{sd}} = \frac{1 - K_{p,s} \cdot V_{s,N}}{1 - \beta_{1,N} \cdot \alpha_s \cdot V_{s,N}} \quad (4)$$

- $\beta_{1,N}$  Zielzuverlässigkeitsindex für den Bezugszeitraum von einem Jahr berechnet aus dem  $\beta_N$  zum Ende der Nutzungsdauer N
- $K_{p,s}$  Vordefinierte fünf Prozent Fraktillfaktor der Verteilung des Widerstands; für eine Stichprobenanzahl  $n = \infty$  ist  $K_{p,s} = 1,645$
- $V_s$  Variationskoeffizient des Widerstands (Stahl  $V_s$  0,03 – 0,05)
- $\alpha_s$  Sensitivitätsfaktor des Widerstands; für die obere Grenze  $\alpha_s = 0,8$

5. Der Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_h$  des Widerstands des Werkstoffs Holz kann unter der Annahme einer Normalverteilung für eine Nutzungsdauer  $\geq 50$  Jahre ähnlich wie für Beton ermittelt werden, jedoch mit einem  $V_h$  0,08 bis 0,15.

F (-b)	b
0	.500 00
1	.460 17
2	.420 74
3	.382 09
4	.344 58
5	.308 54
6	.274 25
7	.241 96
8	.211 86
9	.184 06
1.0	.158 66
1.1	.135 67
1.2	.115 07
1.3	.096 80
1.4	.080 76
1.5	.066 81
1.6	.054 80
1.7	.044 57
1.8	.035 93
1.9	.028 72
2.0	.022 75
2.1	.017 86
2.2	.013 90
2.3	.010 72
2.4	.008 20
2.5	.006 21
2.6	.004 661
2.7	.003 467
2.8	.002 555
2.9	.001 866
3.0	.001 499
3.1	.000 968
3.2	.000 687
3.3	.000 483
3.4	.000 337
3.5	.000 233
3.6	.000 159 1
3.7	.000 107 8
3.8	.000 072 3
3.9	.000 048 1
4.0	.000 031 7
4.1	.000 020 7
4.2	.000 013 3
4.3	.000 008 5
4.4	.000 005 4
4.5	.000 003 4
4.6	.000 002 1
4.7	.000 001 3
4.8	.000 000 8
4.9	.000 000 5

Tabelle 3: Zielzuverlässigkeitsindex  $\beta$  in Bezug auf die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$

Da die Festigkeitsbeiwerte der Werkstoffe nur positive Werte haben können, wird für die Teilsicherheitsfaktorenbestimmung entsprechend Gleichungen 3. und 4. auch gerne eine Lognormal-Verteilung herangezogen wodurch die Gleichungen in folgende Form übergehen:

$$V_{r,N} = \frac{f_{rk}}{f_{rd}} = \exp(V_{r,N}(\alpha_r \cdot \beta_{1,N} \cdot V_{r,N} - K_{p,r})) \quad (5)$$

Der in den Gleichungen 3. und 4. angegebene Ziel-Zuverlässigkeitsindex  $\beta_{1,N}$  kann einerseits aus den in Punkt 5.1. dargestellten einschlägigen internationalen Normen und Vorschriften entnommen oder abgeleitet werden. Weiters können Daten aus Monitoring oder Überprüfungen bis zur numerischen Simulationen in Form eines digitalen Zwillings einbezogen werden.<sup>20</sup>

### 5.3. Empfehlungen für Bestandsbauwerke nach dem Model Code 2020

Der neue Model Code 2020 wird derzeit im Rahmen der fib finalisiert und soll bis Ende 2022 als Endfassung vorliegen.

<sup>20</sup> Canestro/Strauss/Sousa, Multiscale modelling of the long-term performance of prestressed concrete structures, Engineering Structures 2021, 111761; Zimmermann/Strauss/Bergmeister, Numerical investigation of historic masonry walls under normal and shear load, Construction and Building Materials 2010, 1385; Strauss et al., Probabilistic response identification and monitoring of concrete structures, Beton- und Stahlbetonbau 1999, 967.

Die formale Genehmigung wird nach derzeitigem Kenntnisstand im Juni 2023 von der Technischen Kommission erfolgen und zur Veröffentlichung freigegeben. Der Model Code 2020 widmet sich ganz spezifisch auch der Berechnung bestehender Tragwerke.

Nachfolgend werden die darin erarbeiteten Teilsicherheitsfaktorenkonzepte (siehe Tabelle 4) mit den dazugehörigen Sensitivitätsfaktoren  $\alpha$  (siehe Tabelle 5) gezeigt. Die Grundlagen dieser Ausarbeitungen basieren auf dem in Punkt 4.1. vorgestellten Konzept „Zuverlässigkeitsniveau in Abhängigkeit der Lebensdauer und der Schadensfolgeklassen“ (siehe auch Abbildung 6).

Diese verschiedenen Hinweise (Tabellen 5 bis 7) für reduzierte Teilsicherheitsfaktoren bei Bestandsbauwerken zeigen, dass für bestehende Bauwerke, bei denen die Geometrie und damit das Eigengewicht bekannt ist ( $V_g < 0,04$ ), bei entsprechender fachlicher Begründung ein Teilsicherheitsfaktor bei der Schadensfolgeklasse CC2 (häufigster Fall) von 1,125 laut dem Vorschlag des ModelCode 2020 angesetzt werden kann.

Auch auf der Widerstandsseite kann für den Beton bei durchgeführten Druckfestigkeitsprüfungen an Bohrkernen mit einem Variationskoeffizienten  $V_{fc} = 0,08$  ein Teilsicherheitsfaktor von 1,125 bzw. bei einer Verifikation durch einen Schmidt'schen Schlaghammer mit einem Variationskoeffizienten  $= 0,15$  ein Teilsicherheitsfaktor von 1,15 angesetzt werden.

Variable	Teilsicherheitsbeiwert
Materialeigenschaft* (Lognormal-Verteilung, LN)	$V_M = \frac{R_k}{R_d} \approx \frac{\exp(-1.645 V_f)}{\mu_{\theta R} \mu_d \mu_n \exp(-\alpha_R \beta \sqrt{V_{\theta R}^2 + V_d^2 + V_n^2 + V_f^2})}$
Ständige Einwirkung (Normal-Verteilung, N)	$V_G = \frac{G_d}{G_k} \approx 1 - \alpha_E \beta \sqrt{V_{\theta E}^2 + V_G^2}$
Variable Einwirkung	<p>Gumbel-Verteilung, wenn zeitvariable Komponenten dominieren**</p> $V_Q = \frac{Q_d}{Q_k} \approx \delta \times \mu_{Q,tref} \times \left\{ 1 - V_{Q,tref} \left[ 0,45 + 0,78 \ln(-\ln \Phi(-\alpha_E \beta)) \right] \right\}$ <p>Lognormalverteilt, wenn zeitinvariante Komponenten vorherrschend sind***</p> $V_Q = \frac{Q_d}{Q_k} \approx \delta \times \mu_{Q,tref} \times \exp(-\alpha_E \beta V_{Q,tref})$ <p>mit</p> $\mu_{Q,tref} \approx \mu_{\theta E} \times \mu_{C0} \times \mu_{q,tref}$ $V_{Q,tref} \approx \sqrt{V_{\theta E}^2 + V_{C0}^2 + V_{q,tref}^2}$

**Tabelle 4:** Teilsicherheitsbeiwerte für bestehende Strukturen in Bezug auf den Zielzuverlässigkeitsindex  $\beta$  nach Model Code 2020

\* In der Bemessungssituation für die Bewehrung oder in der allgemeinen Bemessungssituation  $\mu_n$  und  $V_n$  bleiben unberücksichtigt.

\*\* Üblicherweise für klimatische und erzwungene Lasten verwendet.

\*\*\* Üblicherweise für Verkehrslasten verwendet.

\*\*\*\*  $\delta$  ist ein Korrekturfaktor für die Ungenauigkeit der Annäherung; er ist gleich 1,0 für den Entwurf und 1,05 für die Bewertung.

Referenzzeitraum (Jahre)	Sensitivitätsfaktoren	
	Einwirkungsseite: $\alpha(E)$	Widerstandsseite: $\alpha(R)$
Jahr	-0,8	+0,7
50 Jahre	-0,7	+0,8

**Tabelle 5:** Sensitivitätsfaktoren  $\alpha$  der Teilsicherheitsfaktorenkonzepte nach Model Code 2020; (LN = Lognormal-Verteilung, N = Normal-Verteilung)

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Aktuell gibt es keinen einheitlichen anerkannten Ansatz, um für bestehende Bauwerke ein bestimmtes Sicherheitsniveau auf der Grundlage eines einzigartigen Ansatzes für eine wahr-scheinlichkeitsbasierte und inspektions-/überwachungsbezo-gene Bewertung zu gewährleisten. Die nationalen Behörden oder einzelnen Infrastrukturbetreiber legen für ihre Bauwerke daher vielfach niedrige Instandhaltungsschwellenwerte fest, um die entsprechende Sicherheit zu erreichen.

Daher wurden hier die verschiedenen Methoden und Tech-nologien als ganzheitlicher Ansatz zur Bewertung des Zu-stands bestehender Bauwerke und zur Minimierung der Instandhaltung dargestellt. Dabei konnten folgende Erkennt-nisse gewonnen werden:

- » **Erkenntnis 1:** Neben den periodischen Inspektionen und Instandhaltungen kann durch ein kontinuierliches Moni-toring (Structural Health Monitoring) in Kombination mit einer probabilistischen Risikobewertung eine wesentlich verbesserte Kenntnis von kritischen Parametern gewon-nen werden.
- » **Erkenntnis 2:** Das Lebenszyklusmanagement sollte mit einer begleitenden Risikobewertung für die gesamte Nutzungsdauer der Anlage ergänzt werden. Dabei müs-sen die verschiedenen Bewertungsebenen (z.B. Netz, System, einzelne Komponente eines Bauwerks) berück-sichtigt und jede einzelne Ebene überwacht werden. Darüber hinaus sollten die Risikoszenarien im Laufe der Zeit angemessen aktualisiert werden, um die Folgen zeit-licher Veränderungen zu berücksichtigen.
- » **Erkenntnis 3:** Für Bestandsbauwerke können für die verbleibende oder angestrebte Nutzungsdauer unter

Einhaltung definierter Zuverlässigkeitsniveaus in Ab-hängigkeit der Schadensfolgeklassen reduzierte Teil-sicherheitsfaktoren angewandt werden. Dazu gibt es aktuell Vorschläge in Normungsgremien basierend auf Forschungsprojekten.

## DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Europäischen Union unter der Fördervereinbarung Nr. 958171 für die Finanzierung des IM-SAFE-Projekts durch das Forschungs- und Innovationspro-gramm Horizont 2020. Die Autoren bedanken sich auch für die Diskussionen und die Unterstützung der fib COM3 „Exis-ting Concrete Structures“ und der fib COM10 „Model Codes“.

## AUTOREN

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. **Alfred Strauss**  
 Universitätsprofessor am Institut für Konstruktiver Ingenieur-bau (IKI)  
 Universität für Bodenkultur Wien  
 Peter-Jordan-Straße 82  
 1190 Wien  
 alfred.strauss@boku.ac.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. phil. Dr. techn. **Konrad Bergmeister**,  
 MSc. Ph.D.  
 Universitätsprofessor am Institut für Konstruktiver Ingenieur-bau (IKI)  
 Universität für Bodenkultur Wien  
 Peter-Jordan-Straße 82  
 1190 Wien  
 konrad.bergmeister@boku.ac.at

Symbol	Ver-teilung	Variable		Bias	Cov	
$\theta_R$	LN	Unsicherheit des Widerstands-modells*	Versagensmodus: Biegung**	1,09	0,045	
			Versagensmodus: zerdrücken Stützen***	1,02	0,07	
$\theta_E$	LN	Unsicherheit des Lastmodells*		1,0	0,075	
$a$	LN	Geometrische Eigenschaft*	Entwurf	Fläche des Betonquerschnitts***	1	0,04
				Effektive Tiefe**	0,95	0,05
			Bewertung	Fläche des Betonquerschnitts***	1	0,015
				Effektive Tiefe**	1	0,01
$f$	LN	Material	Beton***	****	0,10	
			Stahl**	****	0,045	
$\eta$	LN	Umrechnungsfaktor Ortbeton		0,95	0,12	
$G$	N	Ständige Belastung	Eigengewicht	1,0	0,04	
			Andere Lasten	1,0	0,10	

**Tabelle 6:** Erweiterte Modelfaktoren nach Model Code 2020

\* Bei Fehlen weiterer Informationen.

\*\* Berücksichtigt für  $\gamma_s$ .

\*\*\* Berücksichtigt für  $\gamma_c$ .

\*\*\*\* Der Merkmalswert basiert auf dem Fünf-Prozent-Fraktile der Verteilung.



Symbol	Verteilung	Variable	Referenzperiode	Bias	Cov
$Q_{imp}$		Nutzlast	5 Jahre*	0,20	1,1
			50 Jahre	0,59	0,37
$v_b$		Basis-Windgeschwindigkeit	1 Jahr	0,72	0,15
			5 Jahre	0,86	0,13
			50 Jahre	1,05	0,10
$W = v_b^2$	Gumbel	Basis-Winddruck	1 Jahr	0,60	0,32
			5 Jahre	0,85	0,23
			50 Jahre	1,19	0,16
$T$	Gumbel	Verkehrslast	1 Jahr	0,73	0,075
			5 Jahre	0,80	0,069
			50 Jahre	0,90	0,061
$S$	Gumbel	Schneelast am Boden	1 Jahr	0,37	0,65
			5 Jahre	0,68	0,36
			50 Jahre	1,11	0,22

**Tabelle 7:** Statistische Eigenschaften der zeitvariablen Komponente der variablen Einwirkungen

\* Diese Werte werden auch im Fall eines Ein-Jahres-Bezugszeitraums verwendet. (LN = Lognormal-Verteilung)

Symbol	Verteilung	Variable	Bias	Cov
$C_{0Qimp}$	LN	Nutzlast	1	0,1
$C_{0W}$	LN	Wind	0,65	0,3
$C_{0T}$	LN	Straßenverkehr	1	0,1
$C_{0S}$	LN	Schnee	0,8	0,2

**Tabelle 8:** Statistische Charakteristika der zeitinvarianten Komponenten der variablen Lasten



Quelle			CC1	CC2	CC3
EN1990 Entwurf	$\gamma_c$		1,5	1,5	1,5
	$\gamma_s$		1,15	1,15	1,15
	$\gamma_G$		1,22	1,35	1,49
	$\gamma_Q$		1,35	1,5	1,65
MC2020 Entwurf $t_{ref} = 50y$	$\gamma_c$		1,4	1,5	1,6
	$\gamma_s$	Allgemeine Ungenauigkeit*	1,1	1,15	1,175
		Hohe Ausführungsqualität**	1,05	1,075	1,1
		Durchgeführte Messungen***	1,0	1,05	1,05
	$\gamma_G$	$V_g = 0,04$ (Eigengewicht)	1,2	1,25	1,25
		$V_g = 0,1$ (sonstige Lasten)	1,3	1,35	1,4
	$\gamma_Q$	Nutzlast****	1,3	1,5	1,7
		Wind	1,6	1,85	2,1
		Straßenverkehr	1,25	1,3	1,4
		Schnee	1,75	1,95	2,2
MC2020 Beurteilung $t_{ref} = 1y$ Kosten der Sicherheitsmaßnahmen: Groß (A)	$\gamma_c$	$V_{fc} = 0,08$ (mit Kernprüfungen)	1,1	1,125	1,15
		$V_{fc} = 0,15$ (ohne Kernprüfungen)	1,1	1,15	1,2
	$\gamma_s$	Allgemeine Unsicherheiten*	1,075	1,075	1,1
		Durchgeführte Messungen***	0,975	1,0	1,0
	$\gamma_G$	$V_g = 0,04$ (Eigengewicht); $V_{\partial E} = 0,025$ ****	1,125	1,125	1,15
		$V_g = 0,04$ (Eigengewicht); $V_{\partial E} = 0,075$	1,2	1,225	1,25
		$V_g = 0,1$ (sonstige Lasten); $V_{\partial E} = 0,025$ ****	1,25	1,275	1,3
		$V_g = 0,1$ (sonstige Lasten); $V_{\partial E} = 0,075$	1,3	1,325	1,375
	$\gamma_Q$	Nutzlasten****	1,0	1,075	1,25
		Wind	1,05	1,15	1,3
		Straßenverkehr	1,05	1,075	1,15
		Schnee	1,05	1,15	1,35

**Tabelle 9:** Gegenüberstellung der Teilsicherheitsbeiwerte der Versagensfolgeklassen CC1 bis CC3

\* Allgemeine Ungenauigkeit:  $\mu_o = 0,95$  und  $V_o = 0,05$ .

\*\* Hohe Ausführungsqualität oder eine effektive Tiefe von mehr als 200 mm:  $\mu_o = 0,975$  und  $V_o = 0,025$ .

\*\*\* Effektive Tiefe, gemessen in der fertigen Struktur:  $\mu_o = 1,0$  und  $V_o = 0,01$ .

\*\*\*\* Eine reduzierte Modellunsicherheit für den Lasteffekt darf nur bei entsprechender Begründung angenommen werden (siehe MC2020 Bergmeister et al in Bergmeister/Fingerloos/Wörner, Beton-Kalender 2015, 315.).

\*\*\*\*\* Auftretende Lasten in Bürogebäuden mit einem dominierenden Daueranteil der Last.

