



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau [www.massivbau.tu-dresden.de](http://www.massivbau.tu-dresden.de)



# 28. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG  
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

12./13. MÄRZ 2018

© 2018 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen.

Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
Technische Universität Dresden  
Institut für Massivbau  
01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer, Angela Heller

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Plougastel Bridge, entnommen aus: Fernández Ordóñez, J. A.: Eugène Freyssinet.  
Barcelona: 2C Ediciones, 1978.

Druck: addprint AG, Am Spitzberg 8a, 01728 Bannewitz / Possendorf



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

**Institut für Massivbau** <http://massivbau.tu-dresden.de>

---

# **Tagungsband**

## **28. Dresdner Brückenbausymposium**

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens e.V.

TUDIAS GmbH

12. und 13. März 2018

## Inhalt

<b>Herzlich willkommen zum 28. Dresdner Brückenbausymposium</b> .....	<b>9</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen</i>	
<b>Vorwort zum 28. Dresdner Brückenbausymposium</b> .....	<b>13</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
<b>Bauwerksentwürfe nach RE-ING – Was ist neu?</b> .....	<b>17</b>
<i>TRDir Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn, TORR'in Yvonne-Christine Gunreben</i>	
<b>Development of cable-stayed bridges in China</b> <b>Entwicklung von Schrägkabelbrücken in China</b> .....	<b>25</b>
<i>Yaojun Ge, Professor and PhD</i>	
<b>Vom Rechnen und Wissen – Monitoring an den Talbrücken</b> <b>der Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle</b> .....	<b>41</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx, Dipl.-Ing. Marc Wenner, Dipl.-Ing. Max Käding, Frederik Wedel M. Sc.</i>	
<b>Nachrechnung und Ertüchtigung der Siegtalbrücke –</b> <b>größte Spannbetonbrücke der Sauerlandlinie (A45)</b> .....	<b>59</b>
<i>Dr.-Ing. Karlheinz Haveresch</i>	
<b>Der Rückbau der Lahntalbrücke Limburg (1964)</b> .....	<b>73</b>
<i>Dr.-Ing. Stefan Franz, Dipl.-Ing. Frank Ansorge</i>	
<b>Einsatz unbemannter Flugsysteme im Brückenbau</b> .....	<b>87</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto, Dipl.-Ing. Cornell Weller</i>	
<b>Eugène Freyssinet: “I was born a builder”</b> .....	<b>101</b>
<i>Dr.-Ing. David Fernández-Ordóñez</i>	
<b>Realisierung der Kienlesbergbrücke in Ulm – gestalterische</b> <b>und bauliche Herausforderungen im komplexen Baukontext</b> .....	<b>129</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Jan Akkermann, Dipl.-Ing. Bartłomiej Halaczek</i>	
<b>Die Taminabrücke in der Schweiz, der Heimat großer Brückenbauingenieure</b> .....	<b>141</b>
<i>Dipl.-Ing. Volkhard Angelmaier</i>	
<b>100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke</b> .....	<b>157</b>
<i>Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka, Prof. Dr.-Ing. Uwe Willberg, Dipl.-Ing. Georg Müller, Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen</i>	
<b>Lebenszyklus- und Qualitätsspezifikationen für Ingenieurbauwerke</b> .....	<b>169</b>
<i>Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Alfred Strauss, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Lener, Dipl.-Ing. Johannes Schmid, Ass. Prof. Jose Matos, Univ. Prof. Joan R. Casas</i>	
<b>Versagenhäufigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit von Brücken</b> .....	<b>189</b>
<i>Dr.-Ing. habil. Dirk Proske</i>	
<b>Brückenvielfalt rund um die Ostsee – Bericht zur Brückenexkursion 2017</b> .....	<b>203</b>
<i>Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Dipl.-Ing. Sebastian May</i>	
<b>Chronik des Brückenbaus</b> .....	<b>215</b>
<i>Zusammengestellt von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner</i>	
<b>Inserentenverzeichnis</b> .....	<b>231</b>

# Lebenszyklus- und Qualitätsspezifikationen für Ingenieurbauwerke

**Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Alfred Strauss<sup>1</sup>**

**Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Lener<sup>2</sup> | Dipl.-Ing. Johannes Schmid<sup>3</sup> |**

**Ass. Prof. Jose Matos<sup>4</sup> | Univ. Prof. Joan R. Casas<sup>5</sup>**

## Kurzfassung

Um die Vorgehensweise bei der Qualitätskontrolle von Straßenbrücken und infolgedessen die Entscheidungsfindung zur Umsetzung von Instandhaltungsmaßnahmen auf einen einheitlichen Standard zu bringen, hat sich das europäische Forschungsprojekt COST (European Cooperation in Science & Technology) Action TU1406 zum Ziel gesetzt, eine in Europa allgemein gültige Richtlinie zur Erstellung von Qualitätskontrollplänen zu entwickeln. Das Projekt „LeCIE – Lebenszyklusbewertung für Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues – Strategien und Methoden“ entstand auf nationaler Basis in Zusammenhang mit der COST TU1406 (ein europäisches Netzwerk-Programm mit dem Schwerpunkt „Quality specifications for roadway bridges, standardization at a European level“) und verfolgt das Ziel, ein umfassendes Konzept für ein vorausschauendes Lebenszyklusmanagementsystem für Kunstbauten des Eisenbahnwesens zu entwickeln, welches die Inspektionsergebnisse in Bezug auf Schadensbilder und Schadensprozesse mit wahrscheinlichkeitsbasierten Verschlechterungsvorhersagen und Prognoseverfahren mit Monitoring und Bewertungsmethoden verknüpft. In diesem Projekt wird ein Framework für das Lebenszyklusmanagementsystem für singuläre Schadensbilder, für kombinierte Schadensbilder, für strukturelle Komponenten und für die Gesamtstruktur von Stahlbetonbrücken, Stahlbrücken und Verbundbrücken entwickelt.

## 1 Einleitung

Um die Vorgehensweise bei der Qualitätskontrolle von Straßenbrücken und infolgedessen die Entscheidungsfindung zur Umsetzung von Instandhaltungsmaßnahmen auf einen einheitlichen Standard zu bringen, hat sich das europäische Forschungsprojekt COST (European Cooperation in Science & Technology) Action TU1406 ([http://www.cost.eu/COST\\_Actions/tud/TU1406](http://www.cost.eu/COST_Actions/tud/TU1406)) zum Ziel gesetzt, eine in Europa allgemein gültige

Richtlinie zur Erstellung von Qualitätskontrollplänen zu entwickeln. Die COST TU1406 befasst sich mit der Erhebung der für die Zustandsbeurteilung von Straßenbrücken relevanten Leistungsindikatoren (*performance indicators*). Um Daten in Bezug auf diese Performanceindikatoren zu sammeln, wurden die Mitgliedsstaaten der COST Action ersucht, sämtliche Informationen aus bereits in Anwendung befindlichen Dokumenten, wie Richtlinien und Normen, sowie aus Forschungsdokumenten zu erheben. In diesem Beitrag wird im Speziellen auf die „Lebenszyklusbewertung für Ingenieurbauwerke – Strategien und Methoden“ und das zugehörige Projekt LeCIE eingegangen, welches in einem ursächlichen Zusammenhang mit den Themen der COST TU1406 steht.

Die Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine Projektbewertungsstrategie, die darauf abzielt, die ökologischen und/oder wirtschaftlichen Auswirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung während seiner gesamten Lebensdauer zu bewerten. Für den speziellen Fall großer Infrastrukturprojekte umfasst der Lebenszyklus eines Systems die Gewinnung von Rohstoffen, Verarbeitung, Herstellung, Nutzung und Entsorgung oder Wiederherstellung, nachdem es seine Mission erfüllt hat.

LCA geht über die traditionelle Idee hinaus, dass das zentrale Ziel das physikalische (mechanische) Verhalten des Systems wie beispielsweise einer Tragstruktur ist. Dies bedeutet, dass finanzielle Faktoren (z. B. Kosten künftiger Investitionen, Diskontsätze usw.), intergenerationelle Verantwortung, Umweltaspekte und Nachhaltigkeit zu relevanten Größen bei der Analyse und Definition der Projekte werden [1]. Es gibt drei Faktoren, die die Entwicklung und den Einsatz von Ökobilanzen in den vergangenen zehn Jahren vorangetrieben haben: Erstens bewegen sich die staatlichen Vorschriften in der ganzen Welt in Richtung Lebenszyklus, Stichwort „Verantwortlichkeit“. Zweitens haben Unternehmen aller Art erkannt, dass Ökobilanzen der Schlüssel zu Effizienzsteigerung und kontinuierlicher Verbesserung sind, und drit-

<sup>1</sup> Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur (BOKU), Wien (Österreich)

<sup>2</sup> AB Stahlbau und Mischbautechnologie, Universität Innsbruck (Österreich)

<sup>3</sup> Ziviltechnikerbüro DI Dr. Gerhard Lener, Feldkirch (Österreich)

<sup>4</sup> University of Minho, Guimarães (Portugal)

<sup>5</sup> UPC-BarcelonaTech, Barcelona (Spanien)

tens hat sich der kontinuierliche und langfristige Umweltschutz als ein wesentliches Kriterium sowohl in den Verbrauchermärkten als auch in den Beschaffungsrichtlinien der Regierung herausgestellt [2]. Somit hat sich LCA zu einem wertvollen Werkzeug für die Entscheidungsunterstützung sowohl für politische Entscheidungsträger als auch für die Industrie bei der Bewertung der Auswirkungen eines Produkts oder von Prozessen auf die Lebensdauer entwickelt.

Die Idee der Lebenszyklusanalyse ist in den Bereichen der Sozialwissenschaften, Gesundheit, Umweltverträglichkeit und -schutz, Biologie und Ingenieurwissenschaften zu finden. Die Grundideen von LCA sind in allen Bereichen ähnlich. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Diskussionen und Definitionen konzentrieren sich auf Struktur- und Infrastruktursysteme aus Beton.

Die technische Lebensdauer eines Projekts ist der Zeithorizont, in dem es wie geplant funktioniert, dies kann endlich oder unendlich sein. In vielen praktischen Anwendungen beschreibt der Begriff Lebensdauer auch die Zeitspanne, für die das System geplant oder entworfen wird; dies wird auch Einsatzzeit genannt.

Der Lebenszyklus ist ein Begriff, der üblicherweise verwendet wird, um die Zeitspanne zwischen der Konzeption und der Stilllegung des Projekts zu beschreiben. Es handelt sich jedoch um einen Begriff, der beispielsweise verwendet wird, um ein Zeitfenster anzugeben, das die Projektleistung charakterisiert. Die Lebenszyklusanalyse kann grob definiert werden als ein Werkzeug zur Bewertung der Leistung eines Projekts während seiner gesamten Lebensdauer im Hinblick auf die Nutzung (s. Bild 1). Die Bewertung in Infrastrukturprojekten erfolgt üblicherweise auf Basis der

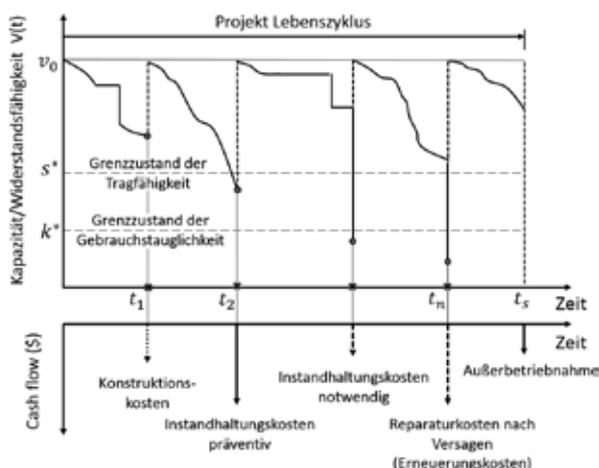


Bild 1 Zusammenhang von Verschlechterung und Benutzungsaspekten in den unterschiedlichen Stadien eines Infrastrukturprojekts

Grafik: [1]

wirtschaftlichen Werte oder Kosten. In letzter Zeit gewinnen jedoch andere Indikatoren an Aufmerksamkeit. Zum Beispiel werden Kohlendioxidemissionen zur Bewertung des ökologischen Fußabdrucks und der Nachhaltigkeit immer wichtiger und werden in staatlichen Vorschriften für die Entwicklung großer Infrastrukturprojekte aufgenommen [3], [4].

In [5] werden Lebenszykluskosten als „die gesamten diskontierten Dollar-Kosten für den Besitz, Betrieb, Wartung und Entsorgung eines Gebäudes oder eines Gebäudesystems über einen definierten Zeitraum“ definiert. Nach [6] wird die Lebenszykluskostenanalyse als „...eine wirtschaftliche Bewertung konkurrierender Designalternativen unter Berücksichtigung aller Kosten des Eigentums über die wirtschaftliche Lebensdauer, ausgedrückt in US-Dollar“ definiert.

Die Ökobilanz ist ein weiterer Aspekt für die Analyse möglicher Umweltauswirkungen, z. B. der Nutzung von Ressourcen und der Folgen der Freisetzung von Stoffen in die Atmosphäre [7], [8]. LCA kann im Wesentlichen als ökonomische Alternative zur Projektbewertung [5] und zur Unterstützung langfristiger kostenbasierter Entscheidungen angesehen werden [9]. Weitere Definitionen der Lebenszykluskostenanalyse sind:

- „die Gesamtkosten für den Eigentümer des Erwerbs und Besitzes eines Systems über seine Nutzungsdauer“ [10],
- die „Summe aller wiederkehrenden und einmaligen Kosten über die gesamte Lebensdauer oder einen bestimmten Zeitraum eines Gutes, einer Dienstleistung, einer Struktur oder eines Systems. Es beinhaltet den Kaufpreis, die Installationskosten, Betriebskosten, Wartungs- und Upgradekosten sowie den Restwert am Ende des Eigentums oder seiner Nutzungsdauer [11] und
- die „Gesamtkosten während der gesamten Laufzeit einschließlich der Kosten für Planung, Design, Akquisition und Support sowie aller anderen Kosten, die direkt dem Besitz oder der Nutzung des Vermögenswerts zuzurechnen sind“ [12].

Weitere Referenzen zu Lebenszykluskostenanalysen (LCCA) finden sich in [13] für eine Zusammenfassung der Lebenszykluskosten, der Zuverlässigkeits- und Wartbarkeitsrichtlinie für Produktionsanlagen und Maschinen [14], dem Infrastruktur-Planungshandbuch [15] und in Lebenszykluskosten für Design-Profis [16].

## 2 Lebenszykluskostenanalyse und Nachhaltigkeit

Große technische Systeme mit langen Lebenszyklen (z. B. Staudämme, große Brücken, Straßen) wirken sich in der Regel auf die langfristige sozioökonomische Entwicklung eines Landes aus. In diesen Fällen wird das Konzept der Nachhaltigkeit relevant und sollte als Teil von Lebenszykluskostenanalysen (LCCA) aufgenommen werden. Nachhaltigkeit ist ein Begriff, der in vielen verschiedenen Kontexten und in vielen Disziplinen (z. B. Wirtschaft, Biologie, Ingenieurwissenschaften, Sozialwissenschaften) diskutiert wurde. Die *Fédération internationale du béton* (fib) definiert die Nachhaltigkeit eines Systems als die Anforderung der effizienten Aufrechterhaltung eines Systems für die gegenwärtige und zukünftige Generationen, wobei die drei Säulen der Nachhaltigkeit, die ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Aspekte, berücksichtigt werden sollen [17]. Nachhaltige Entwicklung bezieht sich daher auf das anhaltende sozioökonomische Wachstum durch die rationelle Nutzung natürlicher Ressourcen und das angemessene Management der Umwelt.

Eine weithin akzeptierte Definition gibt auch [18]: „Erfüllung der Bedürfnisse der Gegenwart, ohne die Fähigkeit zukünftiger Generationen zu gefährden, ihre Bedürfnisse zu erfüllen.“ Beachten Sie, dass Nachhaltigkeit nach dieser Definition nicht ein festes Ziel, sondern ein kontinuierliches und langfristiges Engagement erfordert. Für den besonderen Fall einer großen physischen Infrastruktur steht LCCA im Einklang mit [19], wo nachhaltiges Bauen als: „... ein ganzheitlicher Prozess zur Wiederherstellung und Aufrechterhaltung der Harmonie zwischen der natürlichen und der gebauten Umwelt und Schaffung von Siedlungen, die die Menschenwürde bestätigen und die wirtschaftliche Gleichheit fördern“ definiert wird.

Vor diesem Hintergrund sollte nachhaltige Entwicklung darauf abzielen, den Menschen durch Schutz der physischen Umwelt und ihrer Ressourcen Möglichkeiten für eine akzeptable Lebensqualität zu bieten. Nachhaltigkeit ist ein ethischer Standard in Bezug auf intergenerationelle Gerechtigkeit mit Implikationen für die Entwicklung der zivilen Infrastruktur [20], [19]. Diese Implikationen beziehen sich auf Aspekte wie Umweltschutz, rationelle Ressourcennutzung und finanzielle Machbarkeit von Ingenieurprojekten. Die Bedeutung der Beziehung zwischen LCCA und Nachhaltigkeit ist ein Aspekt, der in der Praxis für große und lang anhaltende Projekte angesprochen werden sollte.

## 3 LCCA und Entscheidungsfindung

### 3.1 Allgemeines

In der Technik kann LCCA für verschiedene Zwecke verwendet werden, von denen die folgenden von besonderem Interesse sind:

- ❑ als Kriterium für den Vergleich verschiedener Projekt- bzw. Systeminvestitionsalternativen. Als Beispiel hat die schwedische Transportverwaltung kürzlich mehrere Brücken unter Verwendung der LCCA-Techniken beschafft. Der vorgeschlagene Ansatz ermöglicht Brückenbeschaffern, monetäre, LCC-effiziente Benchmarks zu etablieren und diese in Ausschreibungsunterlagen als Kernspezifikationen einzubetten. Das niedrigste LCC-Gebot und nicht das niedrigste Gebot der anfänglichen Kosten ist das Zuschlagskriterium [21],
- ❑ als ein Werkzeug zur Festlegung optimaler Managementrichtlinien und
- ❑ als Kriterium für die Definition konsistenter und kosteneffizienter Entwurfs- und Betriebsparameter.

Zusammenfassend ist LCCA eine kostenbasierte Bewertungsstrategie mit dem Ziel, die Design- und Managementanforderungen auszuwählen, die zu den niedrigsten Betriebskosten führen (d. h. Bau und Betrieb), was wiederum mit den Systemqualitäts- und Funktionsspezifikationen übereinstimmt. LCCA ist eindeutig ein Instrument, das langfristig zu besseren Investitionsentscheidungen führen soll. Dies bedeutet, dass Entscheidungen die wirtschaftlichen Investitionen, die Vorteile aus der Existenz des Projekts und die Folgen schlechter Leistung oder Misserfolgs ausgleichen sollten [22]. Als Entscheidungshilfe sollte LCCA folgende Aspekte berücksichtigen:

- ❑ Entscheidungen über die Systemleistung und die damit verbundenen Kosten (z. B. Kosten für Interventionen) basieren auf Vorhersagen mit einem gewissen Maß an Unsicherheit,
- ❑ Entscheidungen werden durch die zeitabhängige Variabilität finanzieller und ökonomischer Parameter beeinflusst,
- ❑ Entscheidungen sollten auf der Grundlage einer Kosten- und Asset-Management-Richtlinie getroffen werden und nicht einfach auf Basis eines mechanischen Leistungsmodells des Systems,
- ❑ Entscheidungen sollten unter Berücksichtigung des sozialen, wirtschaftlichen und politischen Kontexts getroffen werden.

Traditionell wird LCCA herangezogen, um Designparameter zu erhalten und Wartungsstrategien zu definieren [1]. Für große technische Projekte, insbesondere im Bereich von Infrastrukturanlagen, besteht immer noch ein Bedarf, die Entwicklungen im Bereich der Nachhaltigkeit zu integrieren.

Schlussfolgerung: Bei der Betrachtung der gebauten Umgebung können Lebenszykluskosten (LCC) als gesamte diskontierte monetäre Kosten definiert werden, die sich aus dem Besitz, dem Betrieb, der Instandhaltung und der Entsorgung eines Gebäudes, Gebäudesystems oder einer Infrastruktur über einen bestimmten Zeitraum ergeben. LCCA kann verwendet werden, um verschiedene MR-&-R-Methoden (Wartung, Reparatur und Sanierung) zu bewerten und zu vergleichen. Die Berechnungen werden über die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes oder einer Struktur durchgeführt und die relevanten Kosten werden in den entsprechenden Gegenwartswert umgerechnet. Die Alternative mit dem niedrigsten erwarteten Gesamtgegenwert ist die wirtschaftlichste Wahl. Gemäß diesen Definitionen wird die Methodik zur Durchführung der LCCA im folgenden Abschnitt beschrieben.

## 3.2 Standardmethode

### 3.2.1 Allgemeines

Es gibt verschiedene Methoden zur Bewertung der Lebenszykluskosten eines Projekts. Eine Analyse und Bewertung der verschiedenen nationalen Ansätze für LCC und die Entwicklung eines EU-weiten methodischen Rahmens für die Schätzung der Lebenszykluskosten von Gebäuden und konstruierten Anlagen ist in [23] zu finden. In diesem Rahmen wurden Leitlinien für die Erstellung von Kostenschätzungen für jede Phase eines Bauvorhabens, von der ersten Beurteilung bis zur Fertigstellung und nach dem Bau, einschließlich der Veräußerung des Vermögenswerts ermittelt. Eine Reihe von konkreten Fallstudien wurde durchgeführt, um die praktische Umsetzung des Ansatzes zu veranschaulichen. Eine Schlussfolgerung dieser Studie ist, dass die Vielfalt der Verwendungen von LCC in der Praxis bedeutet, dass es sehr schwierig ist, einen einzigen Ansatz zu spezifizieren und daher kein einzelner, präskriptiver Ansatz für LCC auf dem gegenwärtigen europäischen Markt durchführbar ist.

Die Studie zeigt weiter, dass eine gemeinsame Methodik nicht nur für verschiedene Zeiträume im Lebenszyklus, sondern zu verschiedenen Zeitpunkten der Lebensdauer anwendbar sein muss. Der Anwender muss LCC-Analysen in der Anfangsphase, in der Planungsphase, in der Phase

der Ausschreibung eines Bauvertrags, zu Beginn des Baus, zu Beginn eines Wartungsvertrags, zu Beginn einer Gewährleistungsfrist durchführen können. Die Methodik für die LCC-Analyse muss einer solchen Vielfalt Rechnung tragen, die den Lebenszyklus vom Beginn bis zur Entsorgung eines Bauobjekts umfassen kann.

In [24] wird ein methodischer Ansatz für die Sanierung und Instandhaltung von Betonbauwerken vorgeschlagen. Trotz der Unterschiede zwischen den bestehenden LCC-Analysen können die folgenden Schritte als allgemein in jeder Methode der LCC-Analyse identifiziert werden:

- ❑ Definition des Projektziels und -umfangs,
- ❑ Festlegung von Mindestleistungsanforderungen und -beschränkungen,
- ❑ Identifizierung von alternativen Optionen,
- ❑ Annahmen und Parameter,
- ❑ Definition des LCC-Modells,
- ❑ Kosten- und Zeitdatenbank,
- ❑ LCC-Auswertung,
- ❑ LCC-Ergebnisse und Interpretation: Identifizierung der wichtigsten Kostentreiber,
- ❑ LCC Sensitivität, Unsicherheit und Risikoanalyse.

Die einzelnen Elemente werden nachfolgend beschrieben.

### 3.2.2 Definition des Projektziels und -umfangs

Um erfolgreich zu sein, muss eine LCC-Studie klare Ziele haben und klar definieren, was in der Analyse enthalten sein muss und was nicht. Dies ist besonders wichtig angesichts der Flexibilität der Lebenszyklusanalyse, um viele unterschiedliche Aspekte einzubeziehen.

LCCA kann für ein einzelnes Element und eine Gruppe von Assets durchgeführt werden. In letzterer müssen Vermögenswerte eindeutig identifiziert und definiert werden. Dies wird häufig durchgeführt, indem ein Inventar erstellt wird. Dies ist eine Datenbank, in der Informationen zu den Assets gespeichert sind, um genaue und aktuelle Daten für die LCC-Evaluierung bereitzustellen.

### 3.2.3 Festlegung von Mindestleistungsanforderungen und -beschränkungen

Jede LCCA ist für spezifische strukturelle Leistungsindikatoren und einen oder mehrere Grenzzustände definiert, die ihre Leistung charakterisieren. Leistungsindikatoren sind Messungen eines bestimmten Systemmerkmals, z. B. Kapazität oder Zuverlässigkeit. Auf der anderen Seite ist es in Abhängigkeit von dem Wert, den dieser Leistungsindikator annehmen kann, möglich, eine Beurteilung der Fähigkeit des Systems zu machen, seinen Zweck zu erfüllen. Daher werden Grenzzustände verwendet, um die Übereinstimmungsgrade mit den Systemzielen zu differenzieren.

Einige allgemeine Kriterien, die zur Definition von Grenzzuständen verwendet werden, sind: Sicherheit, Wartungsfreundlichkeit, Verfügbarkeit, Dauerhaftigkeit und Umweltauswirkungen, Funktionsfähigkeit der Anlagen, erwartete Lebensdauer und Budgetbeschränkungen. Neben Leistungseinschränkungen sollten andere Einschränkungen für die Analyse in Betracht gezogen werden, z. B. die genaue Quantifizierung der Betreiber-/Eigentümkosten. In der Tat sollte ein „Skalierungseffekt“ in dem Sinne in Betracht gezogen werden, dass die Kosten eines Eingriffs in das Netzwerk niedriger sein können, wenn mehr als ein ähnlicher Eingriff in dem Netzwerk gleichzeitig oder mit einer kurzen Zeit dazwischen durchgeführt werden muss. Gemeinkosten können im Verhältnis zu den Leistungskosten gesenkt werden, wenn ein größerer Arbeitsumfang erforderlich ist.

### 3.2.4 Identifizierung alternativer Optionen

Die Menge der zu berechnenden realisierbaren Projektszenarien und deren Lebenszykluskosten sollte klar definiert werden. Wenn beispielsweise die LCCA für zukünftige Budgetierungszwecke an einem vorhandenen Vermögenswert ausgeführt werden soll, müssen möglicherweise keine alternativen Optionen identifiziert werden. Wenn jedoch die Analyse durchgeführt wird, um aus einer Reihe möglicher Optionen die beste zu ermitteln, ist es wichtig, dass die entsprechenden Optionen vom Kunden identifiziert und genehmigt werden, bevor detaillierte kosten- und zeitbasierte Daten erhoben werden. Bitte beachten Sie: Für einige Strukturen, z. B. Brücken, wird oft nicht kapitalisiert, sondern

nur kostenminimiert. Dies ist eine Frage der Debatte; die Minimierung von Kosten kann nur zu einer Lösung führen, die nicht durchführbar ist, weil die abgeleiteten Vorteile zu gering sind; dann wäre es nicht angebracht, mit dem Projekt fortzufahren.

Eine allgemeine Strategie wird beispielsweise in Bild 2 dargestellt. Die LCC-Analyse enthält das Kapital des bestehenden Systems und die Kosten, die mit dem Konstruktionsprozess, dem Betrieb (d. h. Inspektion und Wartung) und der Außerbetriebnahme verbunden sind. Die in Bild 2 dargestellten Beziehungen werden in Gl. (1) in geschlossener Form beschrieben.

$$Z(\mathbf{p}, t_s) = B(\mathbf{p}, t_s) - C_0(\mathbf{p}) - C_L(\mathbf{p}, t_s) - C_D(t_s) \quad (1)$$

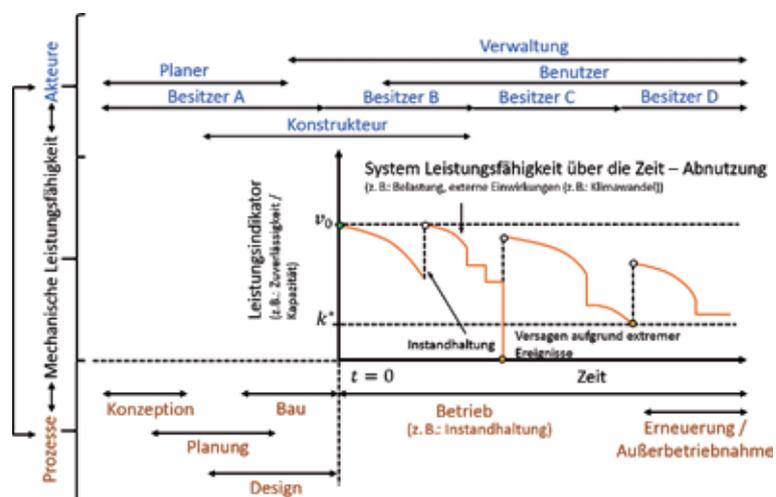


Bild 2 Lebenszykluskosten einer vorgeschlagenen Managementoption  
Grafik: aus [1]

Dabei beschreiben  $t_s$  die Systemlebenszeit (die endlich oder unendlich sein kann) und  $\mathbf{p}$  ist ein Vektor von Parametern mit Entscheidungsvariablen, Entwurfskriterien (wie beispielsweise  $v_0$  in Bild 2 mit Informationen zu Geometrie, Materialeigenschaften, externen Anforderungen) und Inspektions- und Wartungsplänen.  $B(\mathbf{p}, t_s)$  ist der Nutzen, der von der Investition und dem Betrieb erwartet wird,  $C_0(\mathbf{p})$  sind die Kosten der Planung sowie des Entwurfs und des Baus des Projekts.  $C_L(\mathbf{p}, t_s)$  sind alle zusätzlichen Kosten, die für das System erforderlich sind und beinhalten unter anderem:

- Inspektion und Wartung,
- Versicherungsschutz,
- Qualitätssicherungsmessungen,
- finanzielle Kosten (z. B. Finanzierungskosten wie Darlehenszinsen),

- ❑ Verlust von Geschäftsmöglichkeiten,
- ❑ direkte und indirekte Verluste im Falle eines Versagens,
- ❑ Verlust des Lebens.

Schließlich beschreibt  $C_D(t_s)$  die Kosten der Stilllegung (falls existent) am Ende des Lebenszyklus. Gl. (1) kann auf viele Arten dargestellt werden, zum Beispiel durch Diskretisierung der Kosten oder die Erweiterung des Problems auf mehrere Gefahren (z. B. Umwelt, Erdbeben, Wirbelstürme, Klimawandel) [25], [26]. Lösungen für die Optimierung von Gl. (1) in geschlossener Form (d. h. Maximierung der Nutzen-Kosten-Beziehung) können in einigen spezifischen Fällen erhalten werden, siehe u. a. [20], [22], [25], [26], wo Lösungen auf allgemeinen Annahmen über Kosten und die Leistung des Systems basieren. Die Hauptprobleme bei der Modellierung liegen darin begründet, dass die Lebenszyklusleistung des Systems und die entsprechenden Entscheidungen von der unvorhersehbaren Kombination des Auftretens und der Größe externer Ereignisse, den Systemabbau-mechanismen und den Entscheidungen über den Systembetrieb abhängen.

### 3.2.5 Annahmen und Parameter

Sobald der Referenzrahmen definiert ist, wird eine Strategie benötigt, um alternative Optionen zu vergleichen. Normalerweise basiert die Finanzanalyse auf dem erwarteten Kapitalwert (*net present value*, NPV). Diese Analyse beinhaltet die Auswahl bestimmter Parameter wie die Kostenstruktur, den Zeithorizont des Investors sowie die Inflations- und Diskontierungszinssätze [1]. Dabei ist der Diskontsatz von besonderer Bedeutung. Er wird verwendet, um Cashflows, die zu unterschiedlichen Zeiten auftreten, in eine gemeinsame Zeit umzuwandeln, um den Zeitwert des Geldes widerzuspiegeln, siehe [27]. Darin wird verlangt, dass die Art des Diskontsatzes, der in der LCC-Berechnung angewendet wird, klar definiert sein sollte, entweder als realer oder als nominaler Zinssatz.

Im Allgemeinen spiegelt der reale Diskontsatz die tatsächliche Ertragskraft des Geldes wider, die Inflation/Deflation ausschließt und auf der Annahme basiert, dass Inflation/Deflation gleichermaßen auf alle Kosten angewendet werden. Der nominale Diskontsatz berücksichtigt die allgemeine Inflation und Deflation sowie die reale Ertragskraft des Geldes. In [27] wird vorgeschlagen, den realen Diskontsatz zu verwenden, um die Auswirkungen der zukünftigen Inflation in der LCC-Analyse auszuschließen.

Der Analysezeitraum ist der Zeitraum, über den die Lebenszykluskosten zu bewerten sind. Seine Länge hängt von der Art des Projekts ab, wobei folgende Faktoren bei dessen Bestimmung berücksichtigt werden müssen:

- ❑ Der Analysezeitraum sollte mindestens der Lebensdauer eines Großteils der Komponenten entsprechen, mindestens aber der gesamten Lebensdauer der meisten austauschbaren Komponenten.
- ❑ Beim Vergleich von Alternativen, bei denen die Mehrzahl der Komponenten unterschiedliche Lebenszyklen aufweist, sollte der Analysezeitraum lang genug sein, um Verzerrungen zu vermeiden, mindestens ein Zyklus der langlebigsten Komponenten.
- ❑ Ein Analysezeitraum wird die Unsicherheiten und Risiken bei der Projektprüfung erhöhen, wenn es darum geht, technologische Szenarien, wirtschaftliche Trends und soziale Wohlfahrtsprobleme über sehr lange Zeiträume zu prognostizieren.
- ❑ Die Definition eines Analysezeitraums, der für den Vergleich von Alternativen mit sehr unterschiedlicher Lebensdauer untersucht wird, sollte homogene und Konsenskriterien zur Schätzung der Restwerte berücksichtigen.

Wie zuvor skizziert, ist die Lebensdauer einer der wichtigsten Eingabeparameter bei der LCC-Analyse. Im Anschluss an [23] kann die Lebensdauer eines Assets auf verschiedene Arten definiert werden. Allgemein sollte sie durch die Interessen und Ziele des Benutzers bei der Durchführung der LCC-Analyse bestimmt werden [27]. Zum Beispiel schlägt [28] die gemeinsamen Lebensdauerwerte zwischen 70 und 75 Jahren für Eisenbahnbrücken und Tunnel, 50 bis 75 Jahre für Gleisbauarbeiten und 24 bis 35 Jahre für Gleisaufbauten vor. Die Lebensdauer von massiven Brücken, Tunneln und Meeresarbeiten wird neben den Eisenbahnstrukturen in der Regel im Bereich von 100–120 Jahren (Brücken und Tunnel) und 50–100 Jahren (Marine) festgelegt. Gebäude sind jedoch häufig auf kürzere Lebensdauern ausgelegt und folgen den Empfehlungen des Eurocodes, wo die Leistungsanforderungen für eine vorgesehene Nutzungsdauer von 50 Jahren unter den erwarteten Wartungsbedingungen definiert sind [29].

### 3.2.6 Erstellungs- und Zeitdatenbank

Diese umfasst die zeitliche Planung aller relevanten Kosten sowie die zeitliche Planung der Kosten,

die während des Analysezeitraums erwartet werden. In diesem Schritt identifiziert der Benutzer alle relevanten Kosten und Zeitpläne für jede Option, die in Abschnitt 3.3 angegeben ist, als Vorbereitung für die Durchführung der Analyse. Das Ziel dieses Schritts ist es, die Kosten bestmöglich abzuschätzen und die zeitbezogenen Daten für jede unklare Kostenart zu identifizieren.

### 3.3 Kategorisierung von LCC-Modellen

Bestehende LCC-Modelle unterscheiden sich in ihrer Komplexität und variieren je nach Art der Konstruktion, Interventionsstrategien und nationalen und regionalen Bedingungen. In allen Fällen wird angenommen, dass das Ausmaß der Intervention deterministisch und bekannt ist; zum Beispiel auf Basis der Reparaturstrategie so gut wie neu. Außerdem wird in allen Fällen angenommen, dass die Interventionszeiten vernachlässigbar kurz sind und sofort wirken. Sogenannte Level-1-Modelle beinhalten keine Diskontierung und die Interventionskosten und Ausführungszeiten sind bekannt; Dies sind die einfachsten deterministischen Ansätze. Alle weiteren Stufen beinhalten Diskontierung. In Level 2 treten Eingriffe zu bekannten Zeiten auf. Level-3-Modelle erlauben keine Diskontierung und Akontierung der Kosten, jedoch können Interventionszeit und Anzahl notwendiger Interventionen kostenoptimiert im deterministischen Sinne ermittelt werden. Schließlich erlauben die Level-4-Modelle eine Diskontierung und Akontierung der Kosten, für die auch die Interventionszeit und die Anzahl der Interventionen auf deterministischer Ebene optimiert werden können.

## 4 Standardisierte LCC-Modelle für Brücken in Österreich

### 4.1 Allgemeines

In Österreich existieren für Brücken bereits standardisierte LCC-Modelle, welche in [30] zu finden sind. Diese Modelle entsprechen der Kategorie eines Level-1- bzw. Level-2-Modells in Abschnitt 3.3 und basieren auf systematisierten Interventionsszenarien und festgelegten Degenerationsannahmen einzelner Bauteile und Systeme für diverse Randbedingungen. Des Weiteren werden ausschließlich die Kostengruppen Errichtungskosten, Betriebskosten und Abbruchkosten betrachtet und die ermittelten Kosten mit entsprechenden Korrekturfaktoren, beispielsweise zur Berücksichtigung von Verwaltungsaufwendungen und dgl., beaufschlagt. In den nachfolgenden Erläuterungen dieses Kapitels werden eine kurze Übersicht

über die Ansätze dieser Richtlinie vorgestellt und abschließend kurz die Problematik der Ergebnisinterpretation erläutert.

### 4.2 Ansätze zur Berechnung des Realwertes

#### 4.2.1 Allgemeines Grundmodell

Wie bereits oben erwähnt, werden ausschließlich die Kostengruppen Errichtungskosten, Betriebskosten und Abbruchkosten berücksichtigt. Die Errichtungskosten  $LCC_E$  ergeben sich aus den Massen  $E_1$  und Einheitspreisen  $E_2$  aller Bauteile  $i = 1 \dots n$ .

$$LCC_E = \sum_{i=1}^n E_{1i} \cdot E_{2i} \quad (2)$$

Die Betriebskosten  $LCC_B$  ergeben sich in Abhängigkeit der betrachteten Nutzungsdauer aus den Massen  $B_1$ , deren Einheitspreisen  $B_2$  sowie dem Umfang einer Instandsetzungsmaßnahme  $B_3$  und dem Einheitspreis der betrieblichen Erhaltung- und Prüfkosten  $B_4$  unter Berücksichtigung der Brückenfläche  $F \cdot l$ . Dabei sind alle Bauteile  $i$  und deren Anzahl an Instandsetzungsmaßnahmen  $j$  zu berücksichtigen.

$$LCC_B(t) = \sum_{j=1}^e \sum_{i=1}^n B_{1ij} \cdot B_{2i} \cdot B_{3j} + t \cdot B_4 \cdot F \cdot l \quad (3)$$

Die Abbruchkosten  $LCC_A$  resultieren aus der Brückenfläche und dem Einheitspreis  $A_1$ .

$$LCC_A = F \cdot l \cdot A_1 \quad (4)$$

Abschließend werden die Summe aller Kostengruppen ermittelt und ein Verwaltungskostenfaktor  $k_v$  beaufschlagt.

$$LCC(t) = k_v \cdot (LCC_E + LCC_B(t) + LCC_A) \quad (5)$$

Entsprechende Eingangsgrößen für die Berechnung sind aus entsprechenden Unterlagen zu entnehmen, wobei [30] Kostenkennwerte vorgibt.

#### 4.2.2 Vertieftes Modell

Um insbesondere bahnspezifische Aspekte zu berücksichtigen, ist ein vertieftes Modell für die Ermittlung der Betriebskosten enthalten. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um eine Detaillierung der Prüfkosten sowie der jährlichen betrieblichen Erhaltung (5 % der Bausumme alle 6 Jahre für vor-

beugende Instandhaltungsmaßnahmen) und ist entsprechenden Richtlinien der Österreichischen Bundesbahn AG geschuldet. Auf detailliertere Erläuterungen wird an dieser Stelle verzichtet, da die wesentliche Herangehensweise auf denselben Ausgangsprinzipien wie das allgemeine Grundmodell in Abschnitt 4.2.1, nämlich systematisierte Systemszenarien und festgelegte Degenerationsannahmen, beruht.

### 4.3 Valorisierung und Diskontierung, Barwertberechnung

Neben den oben angeführten Aspekten ist eine jährliche Valorisierung auf der Basis realer Werte in Betracht zu ziehen. Zum derzeitigen Zeitpunkt wird ein Diskontsatz von  $r_F = 2,5\%$  pro Jahr angenommen (auf der Basis eines langfristigen Mittelwerts des Brückenbaukostenindex), siehe [30]. Zukünftige Kosten werden unter Berücksichtigung der Differenz aus Beobachtungsjahr und Referenzjahr  $m$  wie folgt ermittelt:

$$LCC^{FV} = \sum_{i=1}^z LCC(t)_i \times \left(1 + \frac{r_F}{100}\right)^{iF} \quad (6)$$

Um einen Vergleich zu ermöglichen, müssen die aktuellen Werte ermittelt werden, um die Lebenszykluskosten auf denselben Zeitpunkt zu beziehen. Für die Barwertberechnung müssen die valorisierten Lebenszykluskosten mit einem jähr-

lichen Prozentsatz von  $r_p = 4,0\%$  [30] diskontiert werden. Dabei ist die Differenz zwischen dem jeweiligen Betrachtungsjahr und dem Referenzjahr des Kostenmodells  $m$  zu berücksichtigen.

$$LCC^{PV} = \sum_{i=1}^z \frac{LCC(t)_i^{FV}}{\left(1 + \frac{r_p}{100}\right)^m} \quad (7)$$

Neben der Barwertberechnung sind weitere Betrachtungshorizonte möglich, auf deren Ausführung an dieser Stelle verzichtet wird.

## 4.4 Praktische Beispiele

### 4.4.1 Allgemeines Grundmodell

Das LCC-Modell wird in [30] am Beispiel einer neuen Straßenbrücke vorgestellt, mit einer berechneten Lebensdauer von 100 Jahren und Eingriffen alle 20 Jahre. Bild 3 zeigt dazu die Längs- und Querschnitte einer Stahlbetonbrücke. In Bild 4 erfolgt die Darstellung der ermittelten Ergebnisse von Bar-, Real- und Endwertmethode.

### 4.4.2 Vertieftes Modell

Das vertiefte LCC-Modell wird in [30] am Beispiel einer neuen Eisenbahnbrücke vorgestellt, mit einer berechneten Lebensdauer von 120 Jahren

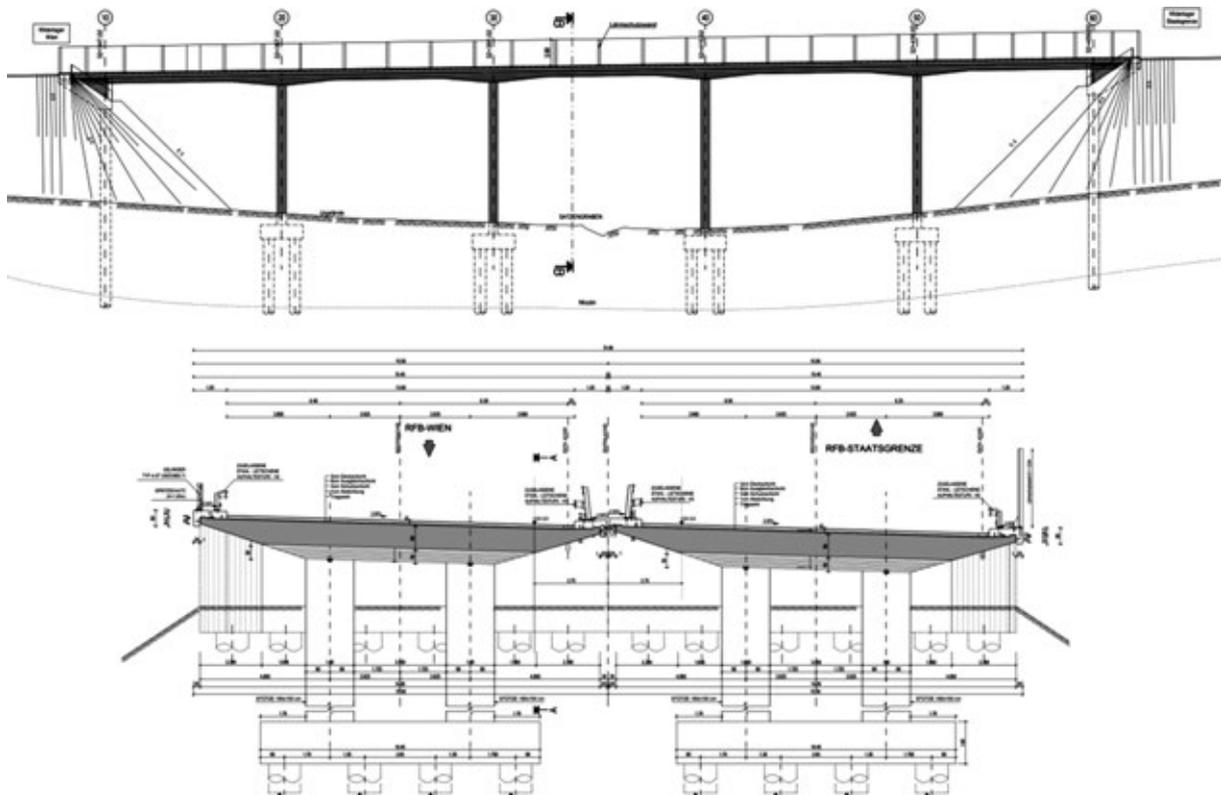


Bild 3 Längsschnitt (oben) und Querschnitt (unten)

Grafik: aus [30]

und Eingriffen alle 30 Jahre. Bild 5 zeigt dazu die Längs- und Querschnitte der Eisenbahnbrücke. In Bild 6 erfolgt die Darstellung der ermittelten Ergebnisse von Bar-, Real- und Endwertmethode mit Vergleich von Grundmodell und vertieftem Modell.

## 4.5 Interpretation der Berechnungsergebnisse

Die Ergebnisse der LCCA sollten sämtliche anfallenden Kosten während des Lebenszyklus eines Objektes beinhalten. Im vorliegenden Fall beruhen diese jedoch ausschließlich auf deterministischen

Modellen, wodurch die Interpretation des Ergebnisses insbesondere durch die nicht vorhandene Information über die Streugröße deutlich erschwert wird. Jedoch liefert die LCC-Analyse eine Aufschlüsselung der Kosten, wodurch eine einfache Identifikation der maßgeblichen Kostentreiber erfolgen kann. Dies gilt insbesondere bei einer weiteren Detaillierung der oben genannten Kostengruppen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die oben genannten Ansätze besonders durch ihre Inflexibilität resultierend aus den systematisierten Interventionsszenarien und festgelegten Degenerationsannahmen deutliche Abweichungen von der Realität erwarten lassen. Trotzdem sind diese grundsätzlich ein geeignetes Mittel zur Durchführung von Variantenvergleichen in der Entwurfsphase bis hin zur Vergabe, mit dem zumindest ein qualitativer Vergleich unterschiedlicher Varianten ermöglicht wird. Die Beschränkung auf eine qualitative Aussage resultiert unter anderem aus den finanzmathematischen Aspekten Valorisierung und Diskontierung, welche a priori in ihrer Größenordnung nur aus der Vergangenheit abschätzbar sind. Somit sind sämtliche Ergebnisse kritisch zu hinterfragen und aufbauende Entscheidungen im entsprechenden Kontext unter Berücksichtigung multipler Interessen zu fällen.

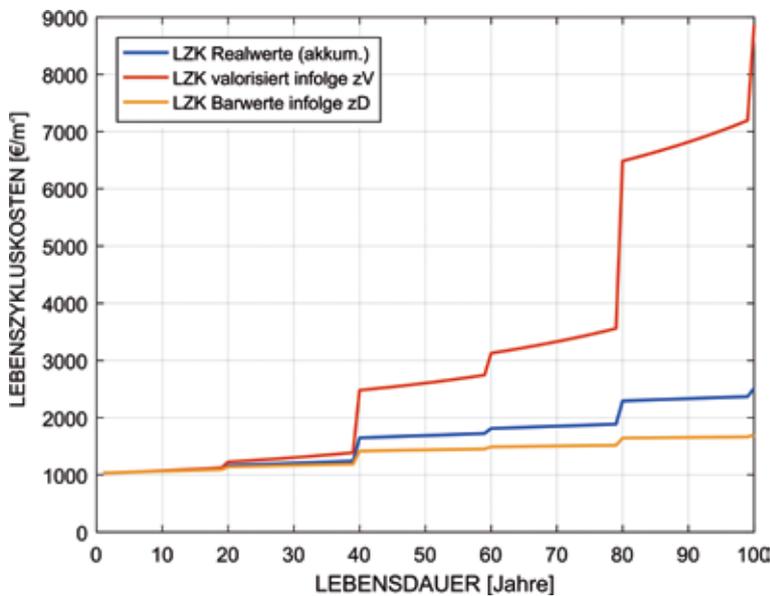
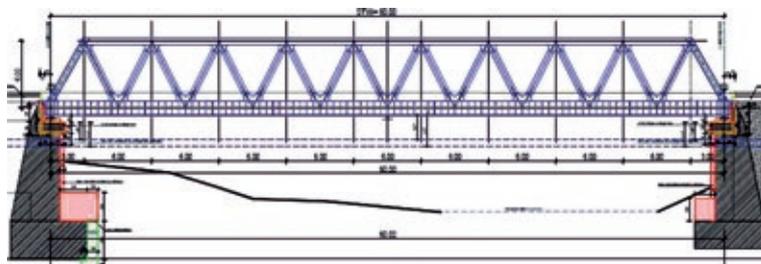


Bild 4 Ergebnisse unterschiedlicher Bewertungsmethoden Grafik: aus [30]



SCHNITT 2-2 BRÜCKENMITTE  
M 1:50

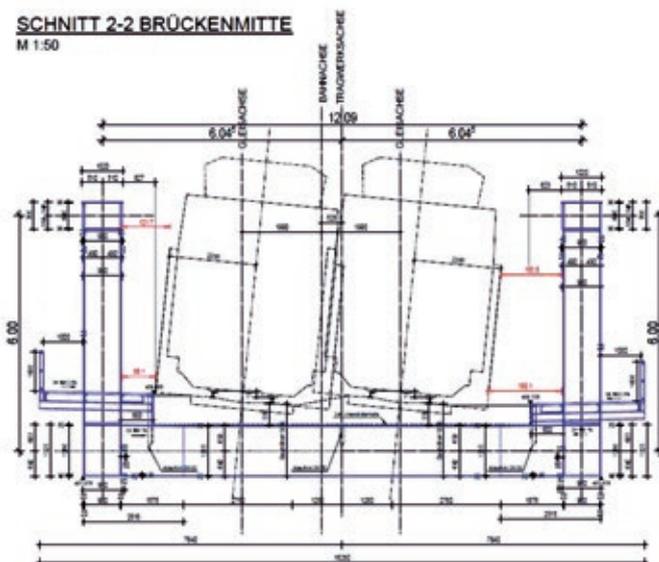


Bild 5 Längsschnitt (oben) und Querschnitt (unten) Grafik: aus [30]

## 5 Zustandsbasierte Prognosemodelle

### 5.1 Allgemeines

Die Vorhersage zukünftiger Alterungserscheinungen und Systemzustände ist eine der größten Herausforderungen bei LCC-Analysen. Realitätsnahe Prognosen erfordern

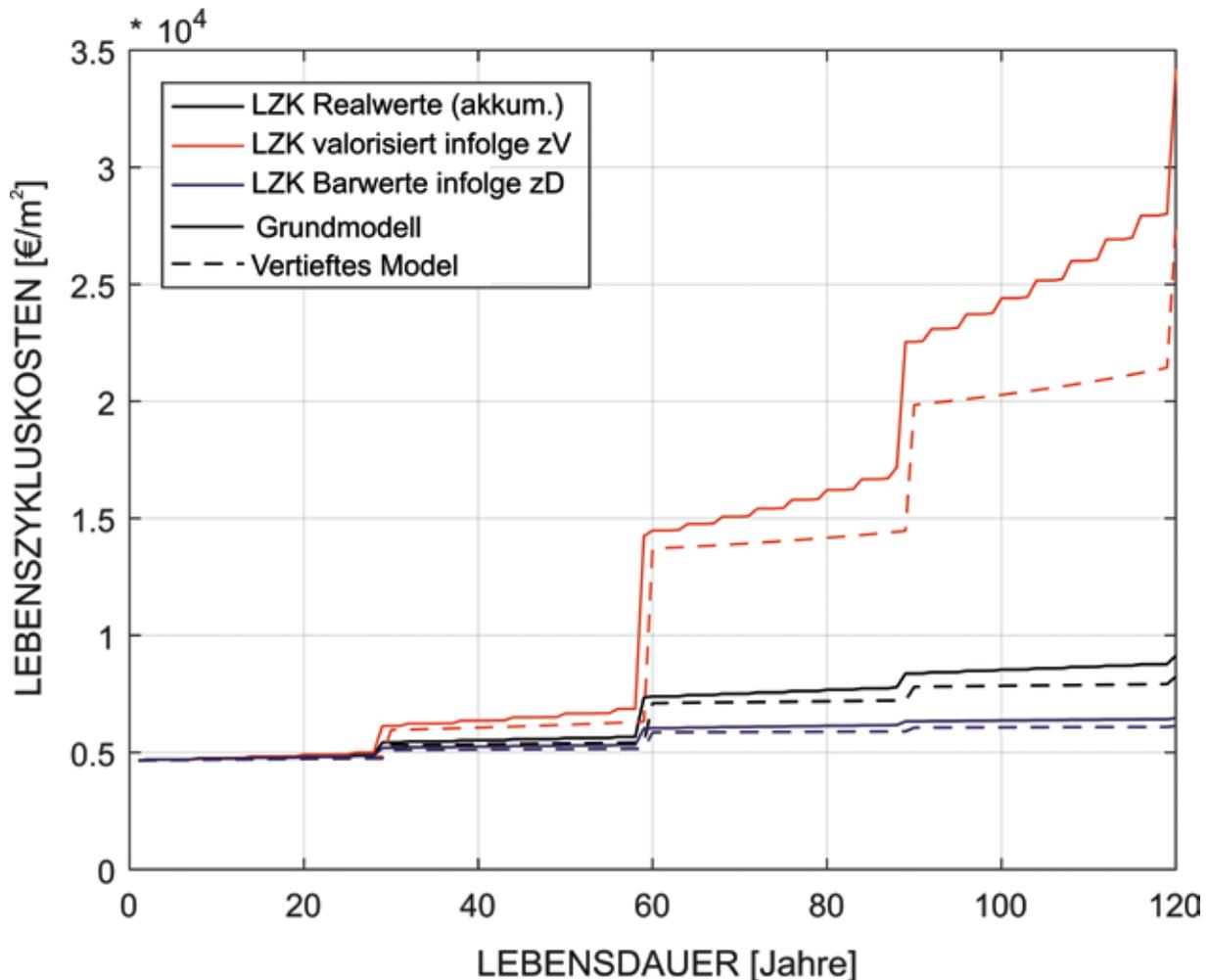


Bild 6 Ergebnisse unterschiedlicher Bewertungsmethoden und Modellansätze

Grafik: aus [30]

die Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Analyse, die aus entsprechenden Datensätzen und Erfahrungswerten resultieren, und die Anwendung von Strukturmodellen in Koppelung mit statistischen Methoden. Zustandsbasierte Prognosemodelle sind als Weiterentwicklung standardisierter Modelle, wie in Abschnitt 4 erläutert, mit dem Ziel zu verstehen, die Schwächen standardisierter Modelle zu beheben.

In Strukturmodellen sollten zeitabhängige Veränderungen von Geometrie und Materialeigenschaften, resultierend aus den Schädigungsprozessen (z. B. Bewehrungskorrosion), berücksichtigt werden. Die Modelle orientieren sich dabei an Ingenieurmodellen und der Bemessungspraxis mit folgenden Einschränkungen:

- ❑ die Vorhersage einer Schädigungskomponente ist mit großen Prognoseunsicherheiten verknüpft,
- ❑ detaillierte Kenntnisse des Systems sind zwingend erforderlich, jedoch oft nicht vorhanden,

- ❑ Analysen sind umfangreich und teuer und erfordern unterschiedliche Modelle entsprechend des betrachteten Systems, womit eine Anwendung auf umfangreiche Bestände de facto kaum möglich ist.

Statistische Modelle basieren auf einfachen analytischen oder numerischen Algorithmen angepasst an die festgestellten Schädigungsprozesse vieler ähnlicher Systeme. Die wesentlichen Vorteile dieser Modelle sind deren einfache Anwendung, die Möglichkeit der Einbeziehung von Inspektionsergebnissen sowie die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Systeme. Stochastische Modelle für diskrete und auch kontinuierliche Systemzustände sind existent und können für eine Systembeschreibung herangezogen werden.

## 5.2 Literaturüberblick

Die Leistungsfähigkeit von Infrastrukturprojekten über ihren Lebenszyklus wurde in den vergangenen Jahrzehnten umfangreich diskutiert. Die ersten Ar-

beiten in diesem Bereich sind in [32] zu finden. Die Ideen wurden in [33] und später in [22] wieder aufgegriffen und ein generelles Framework für den optimalen Entwurf und die Verifizierung der Zuverlässigkeit entwickelt. Weitere Entwicklungen in diesem Bereich sind in [9] und [34]–[38] zu finden. Teilanwendungskonzepte für außergewöhnliche Lasteinwirkungen sind zu finden in [26], [39]–[41]. Einen Überblick über derzeitige LCCA-Methoden im Bauingenieurwesen geben [42]–[44], für andere Bereiche sind [5], [11], [45], [46] zu nennen. Ein Überblick über den aktuellen Stand ist in [47] zu finden.

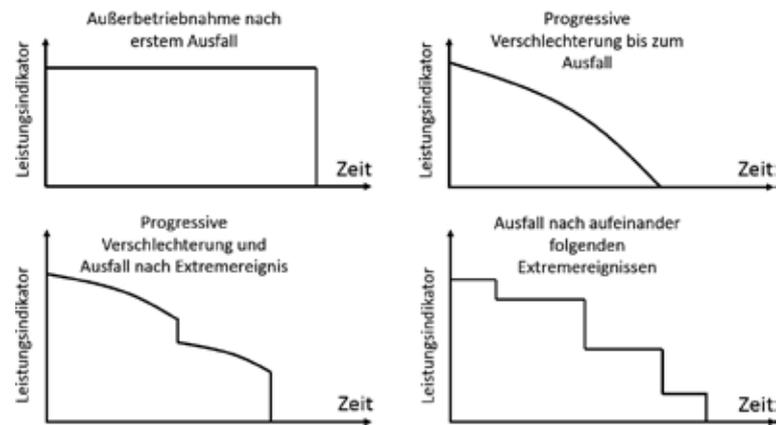


Bild 7 Grundlegende Lebenszyklus-Leistungsfälle; (a) ein System, das nach dem ersten Ausfall ersetzt wurde; (b) Systeme, welche systematisch rekonstruiert werden Grafik: nach [47]

Den Abschluss analytischer Entwicklungen bilden speziell entwickelte Softwarelösungen, wobei mehrere kommerzielle Lösungen zur Handhabung der kombinierten Problemstellung aus Alterung und Einwirkungen existieren. An dieser Stelle sei insbesondere das Softwarepaket COMREL [48] genannt.

### 5.3 LCC-Analysen unter Berücksichtigung des Systemzustands

Die Durchführung einer LCC-Analyse von Infrastrukturprojekten erfordert bestimmte Annahmen über die Art und Weise, in der das System (z. B. ein Tragsystem bestehend aus mehreren Komponenten) betrieben wird. Wir betrachten Systeme, die nach dem ersten Ausfall ersetzt werden, und Systeme, die systematisch für einen endlichen oder unendlichen Zeithorizont rekonstruiert werden, siehe Bild 7. Entsprechende Formulierungen, die als Grundlage für die Erstellung von Modellen dienen können, sind unter anderem in [49] zu finden.

## 6 Projekt „LeCIE – Lebenszyklusbewertung“

### 6.1 Allgemeines

Das Projekt „LeCIE – Lebenszyklusbewertung für Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues – Strategien und Methoden“ verfolgt das Ziel, ein umfassendes Konzept für ein vorausschauendes Lebenszyklus-Managementsystem für Kunstbauten des Eisenbahnwesens zu entwickeln. Hierfür sollen Inspektionsergebnisse in Bezug auf Schadensbilder und Schadensprozesse mit wahr-scheinlichkeitsbasierten Verschlechterungsvorhersagen und Prognoseverfahren mit Monitoring und Bewertungsmethoden verknüpft werden. Es erfolgt dabei die Entwicklung eines Frameworks

für das Lebenszyklusmanagement singulärer und kombinierter Schadensbilder, struktureller Komponenten und der Gesamtstruktur von Stahlbeton-, Stahl- und Verbundbrücken. Die Ausarbeitung erfolgt gemeinsam durch die Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) und die Universität Innsbruck (UIBK), deren Aufgabenbereich die Abhandlung der angeführten Ziele für Stahl- und Verbundbrücken darstellt, während sich die BOKU mit Massivbrücken befasst.

### 6.2 Zielsetzungen

Für das Projekt wurden folgende Zielsetzungen definiert:

1. Auswertung von Ergebnissen aus Brückenbe-sichtigungen,
2. Entwicklung eines generellen Life-Cycle-Ma-nagement-Frameworks für Stahlbeton-, Stahl- und Verbundbrücken,
3. Bestimmung der maßgebenden Degradations-prozesse,
4. Identifikation der maßgebenden Einflussgrößen,
5. Entwicklung von Degradationsmodellen.

### 6.3 Bestimmung der maßgebenden Degradationsprozesse

#### 6.3.1 Allgemeines

Eine maßgebende Grundlage für die Entwicklung eines Life-Cycle-Management-Tools ist eine best-mögliche Kenntnis über das funktionelle Degrada-tionsverhalten der Tragwerke, vgl. Abschnitt 5.

Erst anschließend kann die Klärung der betriebswirtschaftlichen Überlegungen integriert werden. Hierfür erfolgte neben der Berücksichtigung der technischen Regelwerke zusätzlich ein umfangreiches Literaturstudium über den Stand der Wissenschaft. Gleichzeitig wurde eine Sensitivitätsanalyse der im Bestand häufig vorkommenden Degradationsprozesse durch die Auswertung der Besichtigungsergebnisse der letzten Projektjahre durchgeführt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen und nach einer erweiterten Datenerhebung wurde eine Konzeptstudie für eine neuartige Herangehensweise zur Ableitung von Degradationsfunktionen durchgeführt. Die Vorgehensweise und die daraus resultierenden Resultate werden nachfolgend erläutert.

### **6.3.2 Auswertung der Brückenbesichtigungen**

Für die Auswertung der Besichtigungsergebnisse wurden unterschiedliche Schadensbilder definiert und die Ergebnisse komponentenweise analog dem Schulnotensystem bewertet. In weiterer Folge erfolgte ein Studium der Daten und die Suche nach Korrelationen einzelner Kategorien, wie z. B. Bauwerksalter und Korrosionsfortschritt. Im ersten Schritt wurden die Methoden der linearen Regression verwendet, wobei sich die Ergebnisse hierfür als nicht aussagekräftig herausstellten und somit für die Bestimmung von Degradationsprozessen als unzureichend erachtet wurden. Dies ist unter anderem auf eine zu geringe und damit nicht repräsentative Stichprobe sowie partiell fehlende Kenntnisse über bereits durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen zurückzuführen. Sehr gut verwendbar waren die Ergebnisse jedoch für die Ermittlung der maßgebenden Einflussparameter für die Gesamtdegradation. Dabei sind insbesondere die Korrosion und die Ermüdung von Stahlbauteilen zu erwähnen, wobei die Ermüdung als Gesamtprozess mit Nebenbedingung angesehen werden muss.

Zusätzlich zu den statistischen Methoden wurden die Tragwerke und deren Alterungserscheinungen hinsichtlich der konstruktiven Durchbildung und statisch-mechanischen Überlegungen analysiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass Tragwerke mit höherwertigen konstruktiven Ausführungen einen signifikant langsameren Degradationsprozess aufweisen. Ebenfalls wurde festgestellt, dass Ermüdungsprobleme in vielen Fällen ein Problem der Tragwerksbemessung darstellen. Bis vor wenigen Jahren erfolgte die Bemessung überwiegend auf Basis von Stabwerkmodellen und wesentlich geringeren Einwirkungen. Damit werden sehr häufig örtlich konzentrierte Span-

nungsspitzen an Steifigkeitssprüngen nur unzureichend erfasst. Dies sind jedoch gerade jene Stellen, an denen Ermüdungsschäden starten, besonders wenn zusätzlich an diesen Stellen noch ungünstige Ausführungen hinsichtlich des Korrosionsschutzes vorliegen. Mit Berechnungsmethoden und Nachweiskonzepten basierend auf räumlichen Modellen könnte ein Teil dieser rasch fortschreitenden Schädigungsprozesse eventuell verhindert werden.

### **6.3.3 Literatur und Normenwerke**

Basierend auf den Erkenntnissen der Brückenbesichtigungen und allgemeiner Literatur zur Degradationsbestimmung von Stahlbauteilen erfolgte eine Vertiefung hinsichtlich der maßgebenden Prozesse Korrosion und Ermüdung. Als grundlegende Literatur zur Ermüdung sind [50], [51] sowie die Bemessungsnormen des Eurocode-Pakets sowie [52], [53] anzuführen. Angaben zur Bestimmung von Korrosionsraten, Umgebungsklasse und Korrosionsschutzsystemen hingegen sind hauptsächlich in ISO-Normen zu finden. Die Abbildung der Ermüdung ist demnach ein Vielparameterproblem ohne analytische Lösung. Die Bemessung erfolgt konzeptgebunden mit Widerständen aus statistisch ausgewerteten Versuchsergebnissen.

Des Weiteren sind mehrere Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Einwirkungen möglich, deren Einfluss zu untersuchen ist. Ebenfalls zu untersuchen ist der Einfluss von unterschiedlichem Verkehrsaufkommen und Verkehrsstärke. Diese werden in den derzeitigen verwendeten normativen Bemessungsverfahren nur beschränkt berücksichtigt, sind allerdings als maßgebender Einflussparameter zu betrachten.

Für die Abbildung der Korrosion sind eindeutige deterministische Modelle vorhanden, welche die Korrosionsraten für unterschiedliche Klimata beschreiben. Als problematisch erweist sich dabei allerdings die Zuordnung in die einzelnen Klimata, da die dafür notwendigen Eingangsgrößen teilweise nur durch aufwendige Messungen bestimmbar und die Ergebnisstreuungen innerhalb der Klimaklasse trotzdem sehr groß sind. Generell ist dabei das Mikroklima zu verwenden, welches aus dem regionalen Klima des Brückenstandortes in der Regel nicht abzuleiten ist. Ebenfalls fragwürdig ist die Abbildbarkeit der Degradation des Korrosionsschutzes, da hierzu nur sehr vage Angaben zu finden sind und somit große Unsicherheiten darstellen [54].

## 6.4 Entwicklung von Degradationsmodellen

### 6.4.1 Allgemeines

Nachdem die maßgebenden Degradationsprozesse und deren Einflussgrößen bekannt waren, erfolgte die Erstellung eines generellen Life-Cycle-Management-Frameworks, wobei das derzeitige Ergebnis nicht als endgültige Lösung zu betrachten ist. Dabei wurden insbesondere die Zusammenhänge einzelner Komponenten hergestellt, deren quantitativer Inhalt allerdings noch zu ergänzen ist. Auch für das Degradationsmodell der Ermüdung konnte ein Konzept entwickelt werden. Dieses Modell ermöglicht die Verknüpfung beliebiger Achslastmessdaten und der Verkehrsentwicklung auf der Einwirkungsseite mit den Bauteilwiderständen der unterschiedlichen Konstruktionstypen und tragwerksspezifischen Parametern [55].

### 6.4.2 Generelles Life-Cycle-Management-Framework

Das generelle Life-Cycle-Management-Framework verknüpft die einzelnen Degradationsmodelle zu einem Gesamtmodell und ist in der Lage, Vorsorge- und Instandhaltungsmaßnahmen sowie Kostenkennwerte zu berücksichtigen. Diese sind jedoch nicht allgemein zu definieren und somit von vielen Parametern abhängig. Dabei sind insbesondere der Konstruktionstyp und der Baustoff bei Massivbrücken zu erwähnen, welche unterschiedliche Degradationseigenschaften aufweisen. Es ist somit naheliegend, die Degradationsmodelle, die Degradationsfunktionen und die Prozessgeschwindigkeiten allgemein in einer Datenbasis abzulegen und anhand der Informationen aus dem Brückenstammdatensatz und allfälliger zusätzlich vorhandener Eingangsgrößen für das jeweilige Objekt im Life-Cycle-Management-Tool nur mehr auszuwerten und/oder anzupassen. Als Datenbasis dienen interne Degradationskurven der ÖBB für die Komponente Korrosion und die umfangreichen Achslastmessdaten für die Komponente Ermüdung. Diese werden in weiterer Folge so definiert, dass für unterschiedliche Verkehrszusammensetzungen und Verkehrsstärken bereits Schädigungsraten für unterschiedliche Tragwerkssysteme und/oder Detailausbildungen vorliegen, auf die nur mehr zugegriffen werden muss.

### 6.4.3 Degradationsmodelle für den Stahlbau

Basierend auf durchgeführten Literaturrecherchen, Tragwerksbesichtigungen und Achslastmessda-

ten erfolgte die Bestimmung der maßgebenden Degradationsprozesse für Stahl- und Verbundbrücken mit Fokus auf die Werkstoffermüdung. Die Modellbildung erfolgte durch eine Verknüpfung der interagierenden Prozesse Korrosion und Ermüdung unter Berücksichtigung von Verkehrslasten aus Langzeitmessungen und resultiert aus Erkenntnissen der Voruntersuchung. Bei diesen Voruntersuchungen wurde allerdings erkannt, dass mittels der in der Praxis gebräuchlichen Methoden zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit aufgrund der Vielzahl von Tragwerksformen und Beanspruchungen diese für ein allgemeines Life-Cycle-Management-Tool nicht geeignet sind. Es wurden daher Konzepte zur rechnerischen Verknüpfung und Vereinfachung unterschiedlicher Eingangsparameter entwickelt, welche die Ableitung einer allgemeineren Degradationsfunktion für die Materialermüdung in Interaktion mit Korrosion berücksichtigen. Dabei wird eine Überlagerung der Effekte aus Querschnittsverringerung und Reduktion der Ermüdungsfestigkeit durch die Bildung von Korrosionsnarben berücksichtigt. Neben einem semiprobabilistisch-deterministischen Modell, welches aufbauend auf den Grundlagen des Eurocodes entwickelt wurde, erfolgten entsprechende Erweiterungen resultierend in einem auf probabilistischen Ansätzen basierenden Modell.

Als eine wesentliche Eingangsgröße von Beginn an bekannt waren die Ermüdungslasten eines Tragwerks. Aus diesem Grund wurden Langzeitmessungen von Achslasten an unterschiedlichen Messstellen im Schienennetz der Österreichischen Bundesbahn AG einer detaillierten Analyse unterzogen. Dabei wurden sowohl für Einwirkungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch bei den Ermüdungslasten teils gravierende Abweichungen zu den normativen Ansätzen festgestellt. Essentiell ist dabei die Erkenntnis, dass die normativen Ansätze für gewisse Bereiche relativ gut mit den Auswertungsergebnissen übereinstimmen, während große Bereiche sehr konservative Ergebnisse liefern. Sämtliche Gegenüberstellungen basieren dabei auf dem Lastmodell 71 [56], auf dessen Tragwerksreaktionen sämtliche Ermüdungsansätze referenzieren/kalibriert sind. Ein Überblick sämtlicher Achslasten des verwendeten Betrachtungszeitraumes ist in Bild 8 dargestellt.

Die Ergebnisse des semiprobabilistisch-deterministischen Modells im Vergleich zum probabilistischen Ansatz für Ermüdung unter Korrosion werden nachfolgend durch ein Schemabeispiel dargestellt. Für detaillierte Erläuterungen wird an dieser Stelle auf [55] verwiesen.

Für das semiprobabilistisch-deterministische Modell ist die Ergebnisgröße eine Schadenssum-

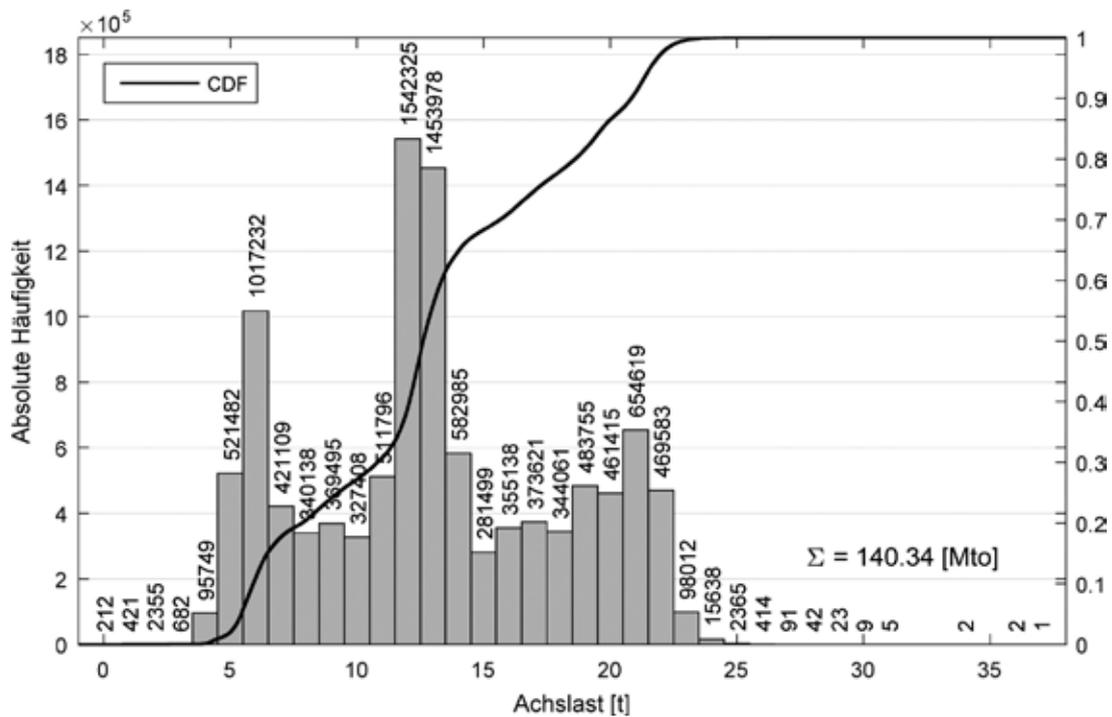


Bild 8 Verteilung der erfassten Achslasten im Betrachtungszeitraum

Grafik: aus [57]

me D, welche einen a priori definierten Grenzwert nicht überschreiten darf. Als Randbedingungen wurden mehrere Korrosionsschutzerneuerungen definiert, wobei bei einer zu langen Freibewitterung (d. h. kein Korrosionsschutz mehr vorhanden und somit Korrosion des Tragwerks, Abgangsdefinition des Korrosionsschutzes basierend auf

Know-how des Auftraggebers) eine entsprechende Systemänderung in Form einer Erhöhung der Schädigungsrate bei gleichbleibenden Einwirkungen zu erwarten ist, siehe [58]. Eine grafische Veranschaulichung zeigt Bild 9. Die Ergebnisgröße des probabilistischen Modells ist die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  im Hinblick auf Ermüdung,

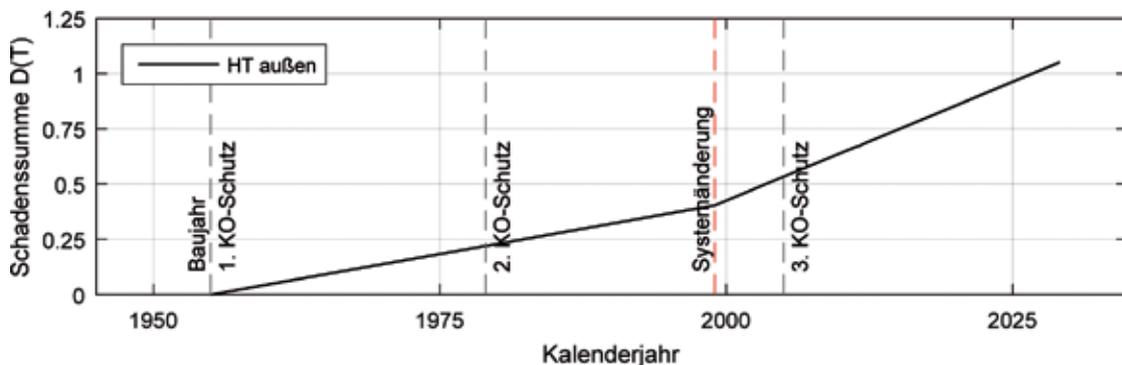


Bild 9 Zunahme der Schadenssumme D

Grafik: aus [57]

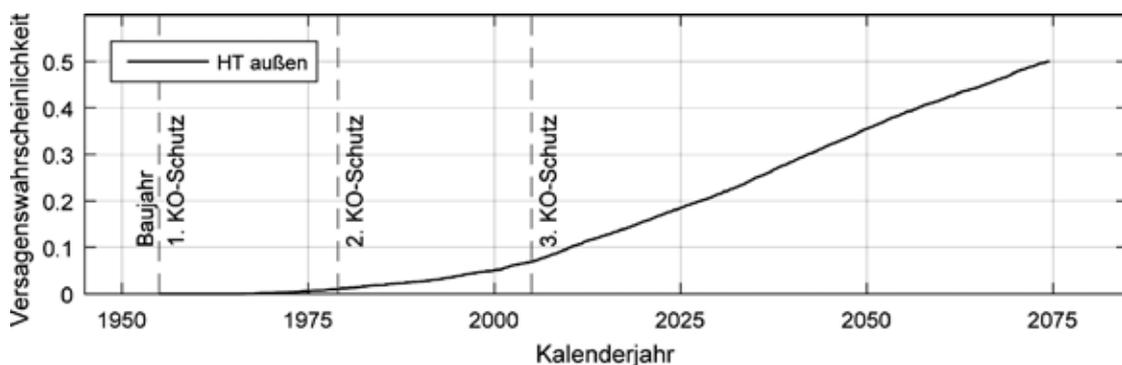


Bild 10 Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$

Grafik: aus [57]

woraus der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  folgt. Die Systemänderung ist dabei keine diskrete Größe, sondern eine Zufallsvariable in Abhängigkeit des Korrosionsschutzzustandes und in weiterer Folge des Freibewitterungszeitraums, welche ebenfalls Zufallsvariablen darstellen. Eine grafische Veranschaulichung ist in Bild 10 dargestellt.

Beide Modelle weisen einen ähnlichen Ergebnisverlauf auf, wobei die Angabe der Versagenswahrscheinlichkeit deutlich weitreichendere Rückschlüsse zulässt. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Versagenswahrscheinlichkeit in dieser Betrachtung auf den technischen Anriss, also den Beginn eines optisch mit freiem Auge erkennbaren Ermüdungsanrisses (ca. 1 bis 2 mm) ist und kein unmittelbares Versagen mit sich bringt. Bruchmechanische Aspekte werden nicht untersucht.

#### 6.4.4 Degradationsmodelle für Stahlbetonbau

Für die realitätsnahe Anwendung der Degradationsmodelle in LeCIE wurde in einem ersten Schritt eine umfangreiche Studie an existierenden Degradationsmodellen hinsichtlich ihrer Aussagequalität und ihrer Anwendbarkeit in Bezug auf an der Struktur erhebliche Parameter durchgeführt. Eine weitere Studie und Analyse der ausgewählten Modelle an den vom Auftraggeber bereitgestellten Brückenobjekten zeigte die Notwendigkeit, die mathematischen Modelle für Chlorid- und Karbontransportprozesse, s. [49] und [60] zu kalibrieren. Gemäß [30] werden Eisenbahnbrücken für eine technische Lebensdauer von 120 Jahren ausgelegt.

Die Expertenerhebungen zeigten auch, dass die Normbestimmungen bei Einhaltung einer guten Beton- und Ausführungsqualität die technische Lebensdauer erfüllen, die Degradationsmodelle jedoch diese Lebensdauer nicht prognostizieren und eine Kalibrierung der in der Literatur enthaltenen Modellparameter erforderlich ist. Der Kalibrierprozess umfasste die Charakterisierung der umweltspezifischen Parameter in Anlehnung an die normativen Expositionsklassen und der materialspezifischen Parameter, z. B. Diffusionskoeffizienten und Eindringwiderstände. Auf nähere Erläuterungen diesbezüglich wird auf [60] verwiesen.

Karbonatisierungsverläufe des massgebenden Elementes jeder Gruppe (Interventionsstrategie I; zugehörig zu den Kostenverläufen der vorherigen Abbildung)

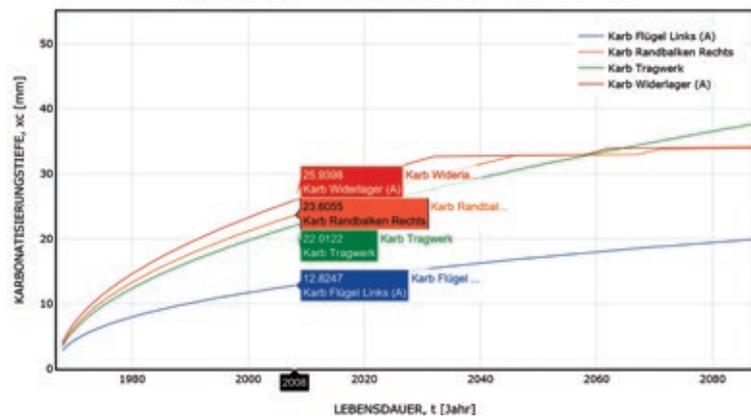


Bild 11 Chlorid-Performance-Bewertung mit Interventionen (Strategie I „Prozessverzögerung“ und Strategie II „Betonersatz“) für die Widerlager Gruppe „A“ der Brücke 1062 der Strecke 33.003, bestehend aus den Flügeln und der Widerlagerwand  
Grafik: Autoren

## 6.5 LeCIE Datenbank und WEB basiertes Prognosetool

Das WEB-basierte Prognosetool „LeCIE“ erlaubt es, neue und bestehende Brücken in einem freien Eingabeformat anzulegen, zu bearbeiten (zu korrigieren oder zu erweitern) oder zu löschen. Die Brückenobjekte werden den „ÖBB-Strecken“ zugeordnet und können nach Streckennummern und Kilometrierung angesprochen werden. Die Analysen der oben genannten Prozesse können für das gesamte Brückenobjekt, für Elementgruppen oder für jedes in der Eingabe definierte Element durchgeführt werden.

Das LeCIE-WEB-Tool erlaubt weiter die Kombination zwischen den Prozessen und somit die Auswahl des maßgebenden Prozesses und die Auffindung der kostenoptimierten Interventionsstrategie.

Bild 11 zeigt einen Ausschnitt der kostenoptimierten Chlorid-Performance-Bewertung mit Interventionen (Strategie I „Prozessverzögerung“ und Strategie II „Betonersatz“) für die Widerlager Gruppe „A“ der Brücke 1062 der Strecke 33.003. Es ist in diesem Beispiel ersichtlich, dass eine Intervention nur für die Widerlagerwand, jedoch nicht für die Flügel erfolgen muss.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Vergangenheit wurden der strukturelle Aufbau zur Minimierung der anfänglichen (Bau-)Kosten und Lösungen mit den niedrigsten Anschaffungskosten bevorzugt. Dieses Auswahlkriterium ist jedoch fraglich, da für die Infrastrukturbetreiber

die Kosten während des Betriebs der Struktur zum Teil erheblich sind, z. B. Kosten für den Betrieb, die Wartung und die Reparatur. Beispielsweise unterliegen Betonbrücken während des Betriebs einer natürlichen Degradation, welche Wartung und/oder Reparatur erfordert, wie das Ersetzen von Randbalken oder das Reparieren von Rissen im Beton. Solche Eingriffe führen zu direkten Kosten, d. h. den Kosten der tatsächlichen Arbeit, und in einigen Fällen auch zu indirekten Kosten, z. B. Verzögerung des Verkehrs. Vor diesem Hintergrund haben Eigentümer und Verwalter von Infrastruktureinrichtungen die Notwendigkeit eines anderen Ansatzes für die Entscheidungsfindung erkannt – ein Ansatz, bei dem Kosten im Zusammenhang mit der gesamten Lebensdauer der Struktur berücksichtigt werden. Asset-Management, Life-Cycle-Assessment und Life-Cycle-Costing sind allesamt ähnliche Ansätze, die zur Erreichung dieses Ziels mehrere Instrumente und systematische Verfahren anwenden. Genauer gesagt versuchen diese Ansätze, die Kosten einer Struktur während verschiedener Phasen des „Lebens“ der Struktur zu reduzieren, wie z. B. Entwurf, Konstruktion, Betrieb und Außerbetriebnahme. Zusätzlich können sie dazu verwendet werden, die Lebensdauer zu verlängern, wodurch die Ausgaben für den Ersatz der Struktur und den Rückbau minimiert werden. Heutzutage enthalten die am meisten entwickelten Lebenszyklussysteme drei grundlegende Module: Datenbank, Leistungs-/Vorhersagemodelle und Optimierungsstrategien. Die Nutzung dieser Systeme für das Management der Infrastruktur ist in den vergangenen Jahren gewachsen. Es ist jedoch eine ständige Forschung für die Entwicklung von Modulen erforderlich um sicherzustellen, dass sie relevant und praktisch sind.

Zukünftige Infrastrukturprojekte sollten wirtschaftliche und technische Konzepte in einem globalen Rahmen integrieren. In diesem Beitrag konnten Konzepte für die Bewertung von Stahlbetonkonstruktionen in Bezug auf Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung von Kostenmodellen (Ersatz-/Rehabilitations- und Anwendungskosten) und Instandhaltungsstrategien gezeigt werden.

## Literatur

- [1] Sanchez-Silva, M.; Klutke, G.-A.: Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems. Springer International Publishing, 2016.
- [2] Inventory of material and energy use and air and water emissions from the production of packaging materials. Tellus Institute, Boston, 1992.
- [3] Padgett, J.; Tapia, C.: Sustainability of Natural Hazard Risk Mitigation: Life Cycle Analysis of Environmental Indicators for Bridge Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems (ASCE)* 19 (2013) 4, S. 395–408.
- [4] Tapia, C.; Padgett, J.: Multi-objective optimization of bridge retrofit and post-event repair selection to enhance sustainability. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 12 (2016) 1, S. 93–107.
- [5] Sieglinde, K. F.; Stephen, R. P.: NIST Handbook 135: Life Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program. U.S. Government Printing Office, Washington, 1995.
- [6] Dell’Isola, A. J.; Kirk, S. J.: Life Cycle Cost Data. New York: McGraw-Hill Inc., 1982.
- [7] ISO 14040:2006: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- [8] ISO 14044:2006: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.
- [9] ASTM E917-15:2015: Standard Practice for Measuring Life-cycle Costs of Buildings and Building Systems. ASTM International, West Conshohocken.
- [10] Defense Acquisition University 2018. [www.ACQuipedia.com](http://www.ACQuipedia.com).
- [11] Web Finance Inc. 2018. <http://www.businessdictionary.com/>.
- [12] Total Asset Management: Life Cycle Costing Guideline. New South Wales Treasury, New South Wales, 2014.
- [13] RMiS Committee (Ed.): Reliability, Maintainability and Supportability Guidebook. 3rd ed., SAE International, 1995.
- [14] Reliability and Maintainability Guideline for Manufacturing Machinery and Equipment. 3rd ed., SAE International, 1999.
- [15] Goodman, A. S.; Hastak, M.: Infrastructure Planning Handbook: Planning Engineering and Economics. New York: ASCE Press, 2006.
- [16] Kirk, S. J.; Dell’Isola, A. J.: Life-Cycle Costing for Design Professionals. New York: McGraw-Hill Inc., 1995.
- [17] fib (Ed.): fib Bulletin 71: Integrated life cycle assessment of concrete structures. 2013.
- [18] UN Brundland Commission (Ed.): Our common future. UN World Commission on Environment and Development, 1987.
- [19] CIB und UNIEP-IETC 2030 Agenda: Sustainable Development – online: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
- [20] Rackwitz, R.: Optimization and risk acceptability based on the Life Quality Index. *Struc-*

- tural Safety 24 (2002) 2–4, S. 297–331.
- [21] Safi, M.; Sundquist, H.; Karoumi, R.: Cost-efficient procurement of bridge infrastructures by incorporating life-cycle cost analysis with bridge management systems. *Journal of Bridge Engineering (ASCE)* 20 (2014) 6, S. 401–408.
- [22] Rackwitz, R.: Optimization — the basis of code-making and reliability verification. *Structural Safety* 22 (2000) 1, S. 27–60.
- [23] Langdon, D.: Life Cycle Costing (LCC) as a Contribution to Sustainable Construction: A Common Methodology. Davis Langdon Management Consulting, 2007, p. 31.
- [24] <http://lifecon.vtt.fi>: LIFECON. Life-cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability. (n.d.), retrieved 7.3.2017.
- [25] Val, D.; Stewart, M.: Decision analysis for deteriorating structures. *Reliability Engineering & System Safety* 87 (2005) 3, S. 377–385.
- [26] Wen, Y. K.; Kang, Y. J.: Minimum Building Life-Cycle Cost Design Criteria. I: Methodology. *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 127 (2001) 3, S. 330–337.
- [27] ISO 15686-5:2008: Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle costing.
- [28] INNTRACK: Guideline for LCC and RAMS Analysis (deliverables 6.1.1 - 6.5.4). from [www.innotrack.eu](http://www.innotrack.eu), 2009.
- [29] EN 206:2000: The European Standard EN 206-1:2000, with the incorporation of amendments.
- [30] RVS 13.05.11:2017: Lebenszykluskostenermittlung für Brücken. Österreichische Forschungsgesellschaft.
- [31] Gervasio, H.; Simoes da Silva, L.: Life-cycle social analysis of motorway bridges. *Structure and Infrastructure Engineering* 9 (2013) 10, S. 1019–1039.
- [32] Rosembueth, E.; Mendoza, E.: Reliability Optimization in Isostatic Structures. *Journal of the Engineering Mechanics Division* 97 (1971) 6, S. 1625–1642.
- [33] Hasofer, A. M.: Design for infrequent overloads. *Earthquake Engineering Structural Dynamics* 2 (1974) 4, S.387–388.
- [34] Campbell, J. D.; Jardine, A. K. S.; McGlynn, J.: Asset Management Excellence: Optimizing Equipment Life-cycle Decisions. 2nd ed., Florida: CRC Press, 2010.
- [35] Nathwani, J.; Lind, N.; Pandey, M.: Affordable safety by choice: the life quality method. Waterloo: University of Waterloo, 1997.
- [36] Nathwani, J.; Pandey, M.; Lind, N.: Engineering Decisions for Life Quality: How Safe is Safe Enough? London: Springer, 2009.
- [37] Rackwitz, R.: The effect of discounting, different mortality reduction schemes and predictive cohort life tables on risk acceptability criteria. *Reliability Engineering & System Safety* 91 (2006) 4, S. 469–484.
- [38] Rackwitz, R.; Lentz, A.; Faber, M. H.: Socio-economically sustainable civil engineering infrastructures by optimization. *Structural Safety* 27 (2005), S. 187–229.
- [39] Iervolino, I.; Giorgio, M.; Chioccarelli, E.: Gamma degradation models for earthquake-resistant structures. *Structural Safety* 45 (2013), S. 48–58.
- [40] Sanchez-Silva, M.; Rackwitz, R.: Implications of the high quality index in the design of optimum structures to withstand earthquakes. *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 130 (2004) 6, S. 969–977.
- [41] Wen, Y. K.; Kang, Y. J.: Minimum building lifecycle cost design criteria. II: applications. *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 127 (2001) 3, S. 338–346.
- [42] Frangopol, D. M.; Kallen, M. J.; van-Noortwijk, J. M.: Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions. *Progress in Structural Engineering and Materials* 6 (2004) 4, S. 197–212.
- [43] Frangopol, D. M.; Saydam, D.; Kim, S.: Maintenance, management, life-cycle design and performance of structures and infrastructures: a brief review. *Structure and Infrastructure Engineering* 8 (2012) 1, S. 1–25.
- [44] Petcherdchoo, A.; Kong, J. S.; Frangopol, D. M.; Neves, L. C.: NLCADS (New Life-Cycle Analysis of Deteriorating Structures) User's manual; a program to analyse the effects of multiple actions on reliability and condition profiles of groups of deteriorating structures. Engineering and Structural Mechanics Research Series No. CU/SR-04/3, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, 2004.
- [45] World Steel Life-cycle Inventory—methodology report. International Iron and Steel Institute, Committee on Environmental Affairs, Brussels, 2002.
- [46] Life-cycle assessment: principles and practice. US Environmental Protection Agency, EPA/600/R-06/060, Cincinnati, 2006.
- [47] Sanchez-Silva, M.; Klutke, G.-A.: Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems. Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [48] RCP COMREL. Retrieved from <http://www.strurel.de/>, 2012.
- [49] fib (Ed.): fib Bulletin No. 34. Model Code for Service Life Design.
- [50] Radaj, D.; Vormwald, M.: Fachbuchreihe

- Schweißtechnik: Bd. 82: Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen, Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1985.
- [51] Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure. 3. Neubearb. u. erw. Aufl., Berlin: Springer, 2007.
- [52] ÖBB Infrastruktur, B45: Technische Richtlinie für Eisenbahnbrücken und sonstige konstruktive Ingenieurbauwerke. Wien: ÖBB Infrastruktur, 2011.
- [53] Hobbacher, A.: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components: doc. XIII-2460-13/XV-1440-13, Paris: International Institute of Welding, 2014.
- [54] Petraschek, T.: Bedarfsgerechte Instandsetzung der Korrosionsschutzbeschichtung. Stahlbau 84 (2015) 6, S. 402–409.
- [55] Schmid, J.; Lener, G.: LeCIE Lebenszykluskostenbewertung für Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues – Strategien und Methoden. Jahresbericht 2016, Universität Innsbruck, 2017.
- [56] ÖNORM EN 1991-2:2012: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke: Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.
- [57] Schmid, J.: Neue Ansätze zur Bestimmung der Restlebensdauer von Eisenbahnbrücken aus Stahl. Diss. (in Arbeit), Universität Innsbruck, 2017.
- [58] Det Norske Veritas Classification Notes No. 30.7: Fatigue Assessment of Ship Structures. 2003.
- [59] Helland, S.: Design for service life: implementation of fib Model Code 2010 rules in the operational code ISO 16204. Structural Concrete (2013), S. 1751–7648 – DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201200021>.
- [60] Strauss, A.; Lener, G.: Lebenszyklusbewertung für Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues. Brückenbautag Kahlenberg, 17./18.5.2017 in Wien (Österreich) – paper online: [http://brueckentagung.at/bruecke2017/Kurzfassungen/14\\_Strauss\\_Lener.pdf](http://brueckentagung.at/bruecke2017/Kurzfassungen/14_Strauss_Lener.pdf).
- [61] Vidovic, A.: Prediction Models for the Life Cycle Assessment of Concrete Structures. Diss. (in Arbeit), BOKU Universität für Bodenkultur Wien.
- [62] Zambon, I.: Material Properties of Existing Structures for the Life Cycle Assessment of Engineering Structures. Diss. (in Arbeit), BOKU Universität für Bodenkultur Wien.
- Anmerkung: alle Internetquellen wurden am 18.1.2018 geprüft.

---

9	Herzlich willkommen zum 28. Dresdner Brückenbausymposium
13	Vorwort zum 28. Dresdner Brückenbausymposium
17	Bauwerksentwürfe nach RE-ING – Was ist neu?
25	Development of cable-stayed bridges in China
41	Vom Rechnen und Wissen – Monitoring an den Talbrücken der Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle
59	Nachrechnung und Ertüchtigung der Siegtalbrücke – größte Spannbetonbrücke der Sauerlandlinie (A45)
73	Der Rückbau der Lahntalbrücke Limburg (1964)
87	Einsatz unbemannter Flugsysteme im Brückenbau
101	Eugène Freyssinet: “I was born a builder”
129	Realisierung der Kienlesbergbrücke in Ulm – gestalterische und bauliche Herausforderungen im komplexen Baukontext
141	Die Taminabrücke in der Schweiz, der Heimat großer Brückenbauingenieure
157	100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke
169	Lebenszyklus- und Qualitätsspezifikationen für Ingenieurbauwerke
189	Versagenshäufigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit von Brücken
203	Brückenvielfalt rund um die Ostsee – Bericht zur Brückenexkursion 2017
215	Chronik des Brückenbaus
231	Inserentenverzeichnis