

CILIA Erweiterte Inspektionsmethoden zur Erhaltungs- und Lebenszyklusplanung von Brückenbauwerken

Alfred Strauss

Universität für Bodenkultur Wien, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Wien

Marian Ralbovsky

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Thomas Simandl, Johann Glatzl

ÖBB-Infrastruktur AG

Schlüsselwörter

Lebensdauer, Lebenszyklus, Zuverlässigkeit

Kurzfassungen / Abstracts

Eisenbahnbrücken stellen im Österreichischen Schienennetz maßgebende Punkte im Hinblick auf Sicherheit und Kosten dar. Die Optimierung ihrer Instandsetzungsstrategie trägt erheblich zur Effizienzsteigerung des Verkehrsnetzes bei und birgt folglich enormes Einsparungspotential. CILIA erforscht mittels stochastisch-numerischer Simulation die ausschlaggebenden Faktoren der Brückenalterung und strebt somit Richtung Lebenszykluskosten-Analyse.

Railway bridges pose substantial components of the Austrian rail network in terms of safety and costs. An optimized maintenance strategy is essential for increasing the efficiency of the existing track network and also bears great cost saving potential. With the aid of stochastic-numerical simulation, CILIA will investigate the factors which considerably contribute to the ageing of bridge structures and ultimately aims to facilitate life cycle cost analysis.

Die Instandsetzungsstrategie von Eisenbahnbrücken basiert derzeit auf subjektiven visuellen Kontrollen. Für eine objektive Instandsetzungsstrategie wird ein Modell benötigt, welches die Alterungsprozesse infolge externer und interner Einflüsse mit ausreichender Genauigkeit beschreibt. Die Optimierung der Instandsetzungsstrategie trägt erheblich zur Effizienzsteigerung des Verkehrsnetzes bei und birgt zusätzlich enormes Einsparungspotential. Ziel des Projektes CILIA ist mittels stochastisch-numerischer Simulation die ausschlaggebenden Faktoren der Brückenalterung zu erforschen und mittels Lebenszykluskosten-Analyse Einsparungspotentiale aufzuzeigen.

Die bekannten Probleme bei der Konzeption von Instandsetzungsmaßnahmen im Schienensektor bestehen in Form von budgetären Einschränkungen die sich erschwerend auf die langfristige Investitionsplanung auswirken. Zusätzlich verursachen die Baumaßnahmen selbst, die an vielbefahrenen Strecken zu Behinderungen oder Zugsausfällen führen können, Kosten und Probleme. Im Interesse der Betreiber und der Kunden ist eine effiziente Planung und Baustellenabwicklung wünschenswert, wobei ein Kompromiss zwischen Kosten und

Nutzen bzw. Sicherheit gefunden werden muss. Eine optimale Sanierungsstrategie im Schienennetz beinhaltet sowohl den richtigen Zeitpunkt für bestimmte Reparaturen, als auch die richtige Maßnahme per se. Objektive Entscheidungsgrundlagen sollen in Zukunft das Erhaltungsmanagement unterstützen und Kostenersparnisse realisieren.

Um diese Ziele zu erreichen wird in CILIA ein Modell, das den Alterungsprozess auf Grund externer und interner Einflüsse hinreichend genau beschreibt, formuliert. Dieses Modell ermöglicht es, den Tragwerkszustand zu objektivieren. Faktoren die hier eine maßgebliche Rolle spielen sind beispielsweise die Bauwerksgeometrie, Baumaterialien, Zugsintervalle bzw. Achslasten und klimatische Bedingungen. Die Unsicherheiten werden als Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Modellierung in CILIA aus einer Gruppe an Eingangsparametern erstellt. Unter Verwendung bestehender Verfahren der Stochastik in Verbindung mit numerischer Simulation, soll ein verbessertes Modell entwickelt werden, das sowohl die Zustandsverschlechterung über die Zeit ermittelt, als auch die Auswirkungen verschiedener Instandsetzungsmaßnahmen berücksichtigt. Anhand eines Index zur Beschreibung des Brückenzustandes wird die Möglichkeit eines maßgeschneiderten Infrastrukturmanagements untersucht werden.

Die Ergebnisse der Berechnungen aus CILIA werden in einer Datenbank akkumuliert um dort als erste Grundlage zur Life-Cycle-Cost Analyse zur Verfügung zu stehen. Beliebige Szenarien können durchgespielt werden, wie z.B. variieren des Zeitpunkts einer gesetzten Maßnahme, betriebliche Einschränkungen wie max. Geschwindigkeiten, oder bauliche Änderungen, um den Verlauf des Zustandsindex auf die gewünschte Weise zu modifizieren. Mit dieser Datenbasis wird ein wichtiger Forschungsaspekt abgedeckt um das langfristige Ziel von CILIA, die Prognose der Lebenszykluskosten von Eisenbahnbrücken und folglich die Schaffung einer objektiven Entscheidungsgrundlage für anfallende Investitionen, zu erreichen.

In diesem Kontext konzentriert sich die derzeitige Forschung auf die stochastisch-numerische Modellierung. Häufig wird hier allerdings nur eine sehr limitierte Anzahl an Parametern untersucht, die sich auf die Alterung von Brückentragwerken auswirken. CILIA plant dieses Verfahren an Eisenbahnbrücken zu erforschen und gleichzeitig eine Verbesserung der eingesetzten Methodik zu erzielen. Zukünftig soll es möglich sein, durch die Forschungsergebnisse eine Kostenanalyse über die Lebensdauer des Tragwerks unter variablen Bedingungen anzustellen. Zur Beschreibung von Brücken im konstruktiven Ingenieurbau können folgende Indizes herangezogen werden:

Ein „**Zustandsindex**“, meist in Anlehnung an ein Schulnotensystem (z.B. bei den ÖBB entspricht 1 einem sehr guten Zustand, bei 4 wird eine Erneuerung angestrebt und bei Objekten der Klasse 5 sind bereits Einschränkungen gegeben). Dieser Index wird im Zuge der visuellen Inspektion ermittelt. Oder ein „**Zuverlässigkeitsindex**“, der das Sicherheitslevel des Bauwerks beschreibt. Der hierfür am häufigsten verwendete Index zur Quantifizierung der Tragfähigkeit ist der β Index. Dieser nimmt – je nach betrachteter Komponente und untersuchten Faktoren – linear oder nicht-linear mit der Zeit ab. Im Allgemeinen kann man anhand dieses Zeitverlaufs die operativen und baulichen Maßnahmen in zwei Kategorien unterteilen: Jene Maßnahmen, die die Verschlechterung des Brückenzustandes bzw. der Tragfähigkeit verlangsamen oder beschleunigen z.B. eine Reduktion der max. Achslast von

Güterzügen verringert die Schädigungsrate, während das Erhöhen der erlaubten Geschwindigkeit Ermüdungserscheinungen begünstigt. Sowie Maßnahmen, die einen sprunghaften Anstieg des β Indexes bewirken bzw. folglich die Abnahmerate von β verändern z.B. Sanierung der Brückenlager.

In der heutigen Life-Cycle-Cost Analyse (LCCA) werden vereinfachte Ansätze verwendet, bei denen zwar die wesentlichen Instandsetzungsmaßnahmen verglichen werden, aber auf Grund der fehlenden Information über das langfristige Brückenverhalten, die Kosten nicht vollständig über den Lebenszyklus berechnet werden. Wünschenswert ist ein genaues Modell, das in der Lage ist, zwischen Instandsetzungskosten, Inspektionskosten, Wartungskosten, Benutzerkosten und Versagenskosten zu differenzieren. Zur optimierten Investitionsplanung müssen all diese Kosten über die gesamte Lebensdauer der Brücke berücksichtigt werden.

Der derzeit übliche Ansatz in der Zustandsprognose von Eisenbahnbrücken bedient sich einem deterministischen Verfahren auf Basis verschiedenster Faktoren und vernachlässigt somit die Unsicherheiten der verwendeten Variablen. Probabilistische Verfahren wie die in CILIA verwendete Methode, die neben der eigentlichen Prognose auch eine Aussage über die Qualität der Prognose liefern, gewinnen nur langsam an Bedeutung in der Praxis.

Neuheit im Vergleich zum State-of-the-art und Innovationsgehalt

Die Lebensdauer von Brücken ist eine Funktion verschiedenster Parameter, die bereits in zahlreichen Studien untersucht wurden. Großteils werden aber nur ein bis maximal zwei der Parameter gleichzeitig behandelt, z.B. F. Biondini et al. (2008) untersuchten Bauwerksgeometrien, S.I. Jo et al. (2008) Korrosionseffekte, während R. Buba et al. (2000) eine Kombination aus Belastungszyklen und Temperaturvariationen beschreibt und E. Bastidas-Arteaga et al. (2008) den Kopplungseffekt zwischen Korrosion und Ermüdung, bezogen auf die Tragsicherheit von Stahlbetonbrücken. Der innovative Ansatz von CILIA besteht in diesem Zusammenhang aus einer ganzheitlichen Erforschung der wichtigsten Parameter sowie der Berücksichtigung verschiedener Instandsetzungsmaßnahmen.

Bestehende Degradationsmodelle, wie die gerade erwähnten Beispiele, sollen durch die Modellierung anderer ausschlaggebender Faktoren erweitert werden. Ferner sollen die Auswirkungen von Ausbesserungs- oder Reparaturarbeiten sowie der Effekt bestimmter operativer Maßnahmen an Eisenbahnbrücken in Österreich quantifiziert werden z.B. durch die Einführung von Geschwindigkeits- oder Achslastbeschränkungen werden die dynamischen Kräfte am Tragwerk bei der Überfahrt reduziert – folglich ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zum Schadenseintritt kommt, wesentlich geringer und die Zustandsverschlechterungsrate wird reduziert. Kennt man die Änderung des β Faktors auf Grund einer durchgeführten Maßnahme, kann sich die langfristige Planung im Zuge des Infrastrukturmanagements wesentlich erleichtern. Ob und wann es sinnvoll wäre, eine Maßnahme zu implementieren, soll sich anhand des Modells aus CILIA genauer und objektiv abschätzen lassen.

Ein bestimmtes β kann als Schwellenwert festgelegt werden: eine Unterschreitung dessen würde zu kompromittierter Tragfähigkeit bzw. einem Sicherheitsrisiko führen, während ein hoher β Faktor größtmögliche Zuverlässigkeit bedeutet, aber meist beachtliche Investitionsvolumen erfordert, um das Bauwerk in diesem Zustand zu halten. Das Eisenbahn-

Brückenmanagement kann um diesen Wert geplant werden und die erhobenen Daten sollen beispielsweise Antworten auf folgende Frage liefern: Ist es vorteilhaft, spezifische Wartungsmaßnahmen vorbeugend durchzuführen, oder erst wenn ein Schadensfall eintritt?

In welchen Intervallen ist eine bestimmte Instandsetzungsmaßnahme erforderlich und wie sehen die erzeugten Kosten im Vergleich zu andern Wartungsstrategien aus?

Um wieviel verlangsamt/beschleunigt sich die Degradation (Änderung des β Faktors) auf Grund einer operativen Maßnahme?

Um wieviel verbessert sich der β Faktor auf Grund einer baulichen Maßnahme?

Mit Hilfe der Verbindung von Stochastik und numerischer Simulation (Abbildung 1) wird in CILIA eine Vielzahl an möglichen Zustandsentwicklungen untersucht und in einer Datenbank logisch verknüpft. Dadurch ist es fortan möglich, den komplexen Einfluss von z.B. Wetter, Zugsintervallen, Brückentypen, als auch von veränderlichen Struktureigenschaften wie Schienenlage, geometrische Diskontinuitäten und Steifigkeitsänderungen, durch probabilistische und numerische Verfahren in Abhängigkeit der Zeit zu simulieren und zu vergleichen. Die statistischen Streuungen der verschiedenen Variablen werden dabei berücksichtigt und mittels einer Monte Carlo basierten Simulationstechnik kombiniert. Die neuen Kenntnisse aus den Berechnungen dienen der Beurteilung des Einflusses unterschiedlicher verkehrs- und bautechnischer Maßnahmen auf den Alterungsprozess der Brückenbauwerke. Das verwendete probabilistische Verfahren ist im Gegensatz zu den aktuell gebräuchlichen deterministischen Verfahren besser in der Lage, die Auswirkungen der Verteilung bzw. der Unsicherheiten der variablen Randbedingungen in die Prognose mit einzubeziehen.

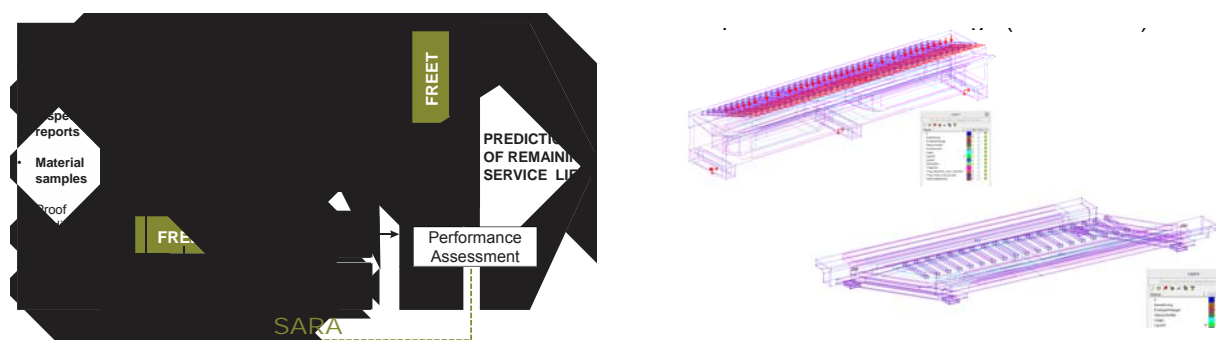


Abbildung 1. FE Modellierung – Überfahrt eines Fahrzeugs mit bestimmter Achs- & Lastkonfiguration

Obwohl visuelle Inspektionen der Brückentragwerke und Erfahrungswerte von Experten weiterhin ein essentieller Bestandteil der Wartung und Instandhaltung sein werden, soll CILIA einen innovativen Ansatz in Richtung automatisierter und mathematischer Methoden im Infrastrukturmanagement liefern. Das state-of-the-art Wissen wird insofern erweitert, als das neben den diversen Eingangsparametern auch die möglichen operativen Maßnahmen, auf quantitative Weise in das Modell einfließen. Mit Hilfe dieses Wissens können beliebige Szenarien durchgerechnet werden, um für eine bestimmte Eisenbahnbrücke die bestmögliche Sanierungsstrategie zu finden. Im Gegensatz

zur Evaluierung einzelner Alterungsfaktoren, kann bei der Untersuchung der kumulativen Effekte eine genauere Aussage über den wahren Tragwerkszustand getroffen werden.

Der Einsatz von state-of-the-art FE Software wie ANSYS und ATENA, sowie probabilistische Analysen in FReE, erfreuen sich zwar im akademischen Bereich weiter Verbreitung, werden aber als fortschrittliche Technologie im Bereich der Schieneninfrastruktur nur selten eingesetzt. Der neuartige Ansatz ist im Vergleich zur simplen ad-hoc Zustandsbeurteilung zwar zeitaufwändiger, kann aber im Gegensatz zur rein empirischen Methode eine längerfristige Prognose liefern.

Wissenschaftliche Herausforderungen

Die Komplexität des zu behandelnden Problems erfordert ein anspruchsvolles Modell, das die fortschreitende Degradation der Brückenkomponenten im Zeitverlauf darstellt. Die Modellierung des Tragwerkszustandes ist auf Grund der Vielzahl an zu simulierenden Parameter ein sehr rechenintensiver Arbeitsschritt. Das Ergebnis ist ein Wert bzw. ein Index der zeigt, wie sich die Zuverlässigkeit individueller Komponenten z.B. Fahrbahnplatte, Träger, Pfeiler, usw. verhält, oder wann Defekte am Gesamtbrückensystem entstanden sind.

Geht man davon aus, dass Last (L) und Tragfähigkeit (R) eines Bauwerks normalverteilt sind, so bilden deren Gauß-Funktionen meist einen Überschneidungsbereich (siehe Abbildung 2). In diesem wird auf Grund einer zu hohen Last die Tragfähigkeit überschritten und es kann zur Schadensbildung kommen. Der β Index beschreibt in diesem Zusammenhang den Unterschied zwischen Last und Tragfähigkeit in Form der Standardabweichung der beiden Funktionen L und R (detaillierte Definition in Kulicki, 2008).

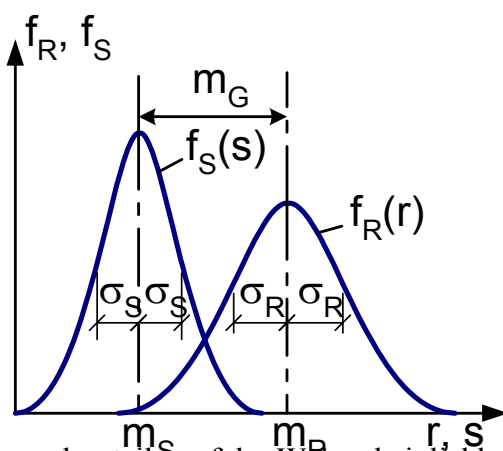


Abbildung 2. Normalverteilung f der Wahrscheinlichkeitsdichte von Last (L) und Tragwerkswiderstand (R) – Überlappung stellt Bereich dar, in dem Schäden oder Versagen auftreten können

Die für die Simulation benötigten Eingangsparameter umfassen folgende Faktoren:

Bauwerksgeometrie: Spannweite, Höhe, Brückentyp, Schwachstellen z.B. Lager

Baumaterialien: Steifigkeit, Druckfestigkeit

Klimatische Bedingungen: Temperaturschwankungen, Niederschlag

Streckennutzung: Zugsintervalle, Geschwindigkeit

Beanspruchung – Achslast, Windeinfluss, Seismik, hydraulische Kräfte

Operative Maßnahmen: Geschwindigkeits-/Achslastbegrenzungen

Instandsetzungsmaßnahmen: Inspektionsintervalle, Art der Reparatur-/Ausbesserungsarbeiten

Diese Parameter werden punkto Wahrscheinlichkeitsdichte und statistischer Momente untersucht sowie auf eventuelle Korrelationen und die Art der Verteilung (Gauß, log normal usw.). Mittels einer Art von Monte Carlo Simulation, dem sogenannten „Latin Hypercube Sampling“ (LHS), wird ein vollständiges Set an Eingangsparametern gesampelt und fließt in die FE Modellierung der Eisenbahnbrücken ein. Um die zeitaufwendige Simulation effizienter zu gestalten, ist es wichtig den Sampling-Prozess weitgehend zu automatisieren. Eine der größten Herausforderungen wird die große Anzahl an benötigten FE-Simulationen auf ein Minimum zu reduzieren. Um dies zu erreichen kommt einerseits das angesprochene LHS zum Einsatz, andererseits eine Sensitivitätsstudie der Parameter. Hierbei wird ermittelt, welche der vorgeschlagenen Variablen einen entscheidenden Einfluss auf den Degradationsprozess eines Brückentyps hat. Die Ergebnisse dienen der Priorisierung der Eingangsparameter.

Eine weitere wissenschaftliche Herausforderung von CILIA wird die hinreichend genaue Darstellung des Zustandsindex (Beispiel in Abbildung 3), um verschiedene Szenarien der Instandhaltungsstrategie miteinander vergleichen zu können.

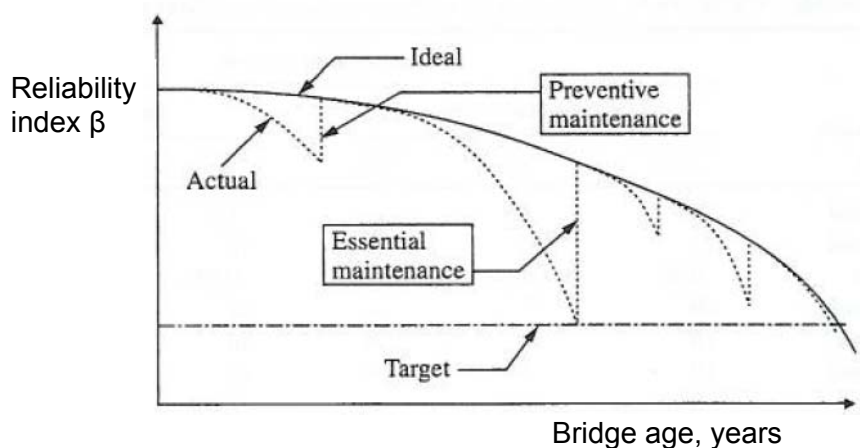


Abbildung 3. Änderung des Zustandsindex einer Brücke über die Lebensdauer und der Effekt von Instandhaltungsmaßnahmen (aus Frangopol et al. 2001)

Literatur

CILIA bildet mit seiner Thematik einen Anknüpfungspunkt an immer relevanter werdende Themen wie Structural Health Monitoring, zerstörungsfreie Prüfung und vor allem frühzeitige Schadenserkennung – diese Bereiche gewinnen sowohl national als auch international immer mehr an Stellenwert. Die Thematik der Lebenszykluskosten von Ingenieurbauten wurde in den letzten paar Jahren ebenfalls zunehmend in Publikationen analysiert:

Adey B., Bailey S., Hajdin R., Brühwiler E., “Updating estimates of bridge reliability”, First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002
Biondini F., Frangopol D., Garavaglia E., “Damage modeling and life-cycle reliability analysis of ageing bridges”, Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics; Koh, Frangopol, 2008

Biondini F., Frangopol D., Malerba P., “Structural Geometry Effects on the Life-Cycle Performance of Concrete Bridge Structures in Aggressive Environments”, Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics; Koh, Frangopol, 2008

Buba R., Penka E., “Ermüdung bei Brücken aus Spannbeton”, 2000

Eichinger E. M., “Reliability assessment of existing concrete bridges using probabilistic methods”, Doctorate Thesis at the Vienna Technical University, 2003

Enevoldsen I., “Practical implementation of probability based assessment methods for bridges”, Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics, 2008

Estes A., Frangopol D., “Repair Optimization of Highway Bridges Using System Reliability Approach”, Journal of Structural Engineering, July 1999, 766–775

Frangopol, D., Chapter 16 “Reliability-based optimum structural design” in Probabilistic Structural Mechanics Handbook (Edited by C. Sundarajan), Chapman & Hall, 1995

Frangopol, D., Kong, J., Gharaibeh, E., “Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges”, Journal of Computing in Civil Engineering, January 2001, 27–34

Frangopol, D., Gharaibeh, E., Kong, J., Miyake, M., “Reliability-based evaluation of rehabilitation rates of bridge groups”, Proceedings of the International Conference on Safety, Risk and Reliability – Trends in Engineering, IABSE, Malta, 2001

Frangopol, D., Strauss, A., Bergmeister, K., “Lifetime cost optimization of structures by a combined condition-reliability approach”, Engineering Structures 31, 2009, 1572 – 1580

Jo S. I., Onoufriou T., Crocombe A. D., “Effect of corrosion on the reliability of a bridge based on Response Surface Method”, Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics; Koh, Frangopol, 2008

Jodl H. G., “Lebenszykluskosten von Brücken - Teil 1 - Berechnungsmodell LZKB” & “Lebenszykluskosten von Brücken - Teil 2 - Software LZKB” Bauingenieur May 2008

Kappos, A., Moschonas, I., "Seismic Vulnerability Assessment of Bridges: Analytical and Empirical Methods", 21st European Regional Earthquake Engineering Seminar: Seismic Assessment and Retrofit of Bridges, Istanbul 2010

Kulicki, J.M., “Developing a probability based limit states bridge specification – US experience”, Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost; Cruz, Frangopol, Neves, 2006

Maher A., Ghasemi H., Hooks J., Foden A., “Long Term Bridge Performance Program: Objectives and Goals”, First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Structures, Dubai, February 2011

Myint Lwin, M., “The important roles of bridge maintenance and management on transport safety and efficiency”, Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost; Cruz, Frangopol, Neves, 2006

Naumann J., “Brücken und Schwerverkehr - Strategie zur Ertüchtigung des Brückenbestands in Bundesfernstraßen”, Bauingenieur May 2008

Neves L., Frangopol D., Cruz P., “Cost of life extension of deteriorating structures under reliability-based maintenance”, Computers and Structures 82, 2004, 1077–1089

Novak D., Pukl R., Strauss A., “Reliability/risk assessment of concrete structures: Methodology, software and case study”, First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Structures, Dubai, February 2011

Peil U., Mehdiانpour M., Frenz M., Weilert K., “Life time assessment of bridges”, Institute for Steel Structures, Technical University Braunschweig, Germany

Ralbovský M., Deix S., Flesch R., “Probabilistische Betrachtungen der Brückendynamik und Schadenserkennung” D-A-C-H Mitteilungsblatt, Bauingenieur, March 2007

Strauss A., Wendner R., Guggenberger T., Bergmeister K., Teply B., Novak D., Santa U., Costa C., “Maintenance Strategies Based on the Assessment of Chloride Induced Deterioration”, First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Structures, Dubai, February 2011

Wendner R., Strauss A., Hoffmann S., Bergmeister K., “Monitoring Based Evaluation of Design Criteria for Concrete Frame Bridges”, First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Structures, Dubai, February 2011

Verkehrsclub Österreich (VCÖ), “Gigaliner sind keine Lösung für Verkehrsprobleme”, Blum M., Verkehr aktuell 14/2008