

## Forschungsprojekt Rail4Future: Zuverlässige Stahlbrücken – Ergebnisse und Erkenntnisse

Dipl.-Ing. Dr. Franz Forstlechner (ÖBB-Infrastruktur AG)

Dipl.-Ing. Dr. Stefan Lachinger (AIT – Austrian Institute of Technology)

### ***Einleitung und Projektüberblick***

Das von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG geförderte COMET-Forschungsprojekt Rail4Future widmete sich schwerpunktmäßig der Digitalisierung des Systems Eisenbahn und der datenbasierten Zustandsbewertung unterschiedlicher Infrastrukturkomponenten. Im Rahmen des Teilprojekts 3.1 von Rail4Future erfolgte die Bewertung von Eisenbahnbrücken aus Stahl mit dem Fokus auf Restlebensdauer. Insgesamt 1.447 Brücken aus Stahl sind Teil der österreichischen Bahninfrastruktur, wobei der Eisenbahnverkehr über die Lebensdauer betrachtet zur ermüdungsbedingten Alterung führt. Doch wie kann die Restlebensdauer von historischen Stahlbrücken möglichst realistisch bewertet werden, um die Mittelverwendung nachhaltig zu planen und zu steuern? Das gegenständliche Fallbeispiel der Salzachbrücke Eschenau wurde im Rahmen des Forschungsprojektes Rail4Future erarbeitet und zeigt Möglichkeiten, wie durch Verknüpfung von Messdaten mit numerischen Berechnungsmodellen ein digitaler Zwilling zur wirklichkeitsnahen Beschreibung der Brückenrestlebensdauer erzeugt wird, um den gesicherten und störungsfreien Bahnbetrieb bis zum geplanten Ende der Nutzungsdauer zu gewährleisten (Abbildung 1).

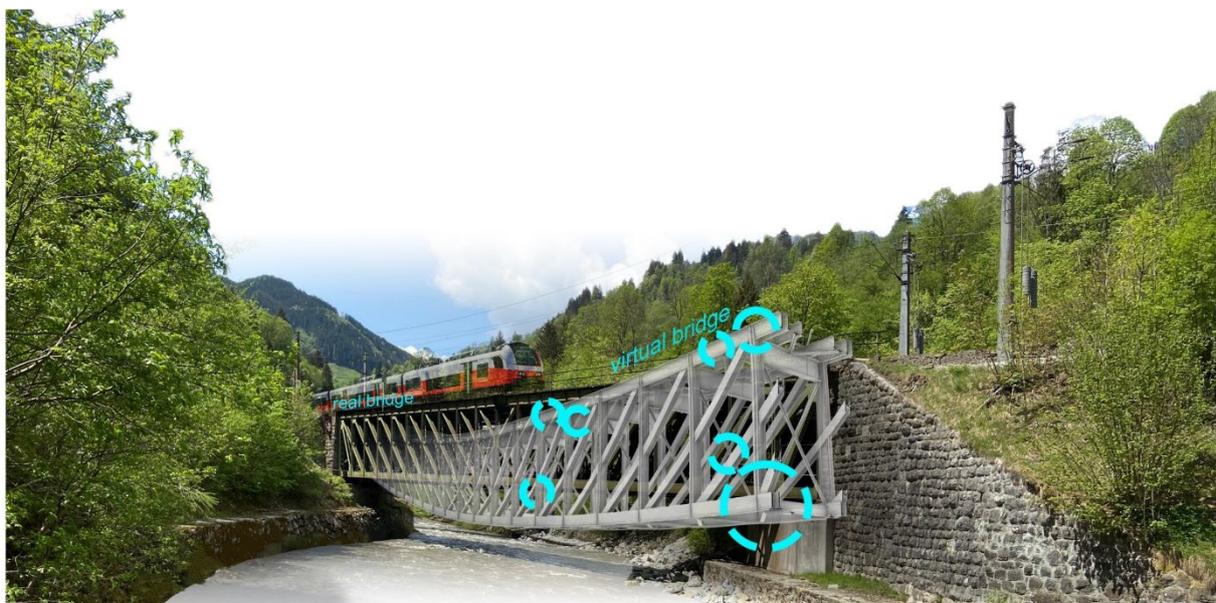


Abbildung 1: Visualisierung des digitalen Zwillings der Salzachbrücke Eschenau (Foto: AIT)

## ***Ermüdungs- und Restlebensdauerbewertung von Eisenbahnbrücken aus Stahl***

Im Bauingenieurwesen wird Ermüdung bis zum Auftritt von Anfangsrissen mittels linearer Schadensakkumulation nach der Regel von *Palmgren-Miner* unter Anwendung der Wöhlerlinien nachgewiesen. Die kumulierte Schädigung  $D$  eines bewerteten Details muss dabei unterhalb des Grenzwertes  $D_{\text{Grenz}}=1$  liegen. Der Nachweis der derzeitiger Normenwerke beinhaltet insbesondere bei alten Eisenbahnbrücken größere Unschärfen und in der Regel konservative Rechenansätze, wodurch die tatsächliche Restlebensdauer von Eisenbahnbrücken unter Umständen unterschätzt wird. Die Unschärfen unterteilen sich in

- Unwägbarkeiten auf der Widerstandsseite wie z.B. Materialkennwerte, Kerbdetails oder Wöhlerlinien,
- Unwägbarkeiten auf der Einwirkungsseite wie z.B. Lastkollektive, Zwangsbeanspruchungen oder außerplanmäßige Belastungsereignisse sowie
- Unwägbarkeiten in der Modellbildung wie z.B. Nietklemmkräfte, Steifigkeiten von Anschlussdetails oder zeitabhängige Struktureigenschaften.

Da die einzelnen Unwägbarkeiten aufsummiert werden, führt bereits die Reduktion einzelner Aspekte zu einer Reduktion der Unschärfe in der Ermüdungsbewertung. Unwägbarkeiten auf der Widerstandsseite sind in der Ingenieurpraxis beispielsweise durch Erhebung von Materialkennwerten mittels Probeentnahmen zu reduzieren, Unwägbarkeiten auf der Einwirkungsseite durch Wahl streckenspezifischer Ermüdungslastmodelle und Modellunsicherheiten mittels kalibrierter Tragwerksmodelle unter Einbeziehung von Messdaten.

### ***Ermüdungsbewertung am Beispiel der Salzachbrücke Eschenau***

Am Beispiel der historischen Salzachbrücke Eschenau wurden im Projekt Rail4Future verschiedene Methoden zur Reduktion der oben beschriebenen Unwägbarkeiten bei der Ermüdungsbewertung ausgetestet und deren Einfluss auf die Brückenrestlebensdauer ermittelt. Die Eisenbahnbrücke auf der Strecke Salzburg–Wörgl, welche bis zum Jahr 2025 durch einen Neubau ersetzt wird (siehe auch Tagungsbeitrag „ÖBB-Salzachbrücken – Erneuerung und Überwachung“), war zum Zeitpunkt der Untersuchungen bereits über 100 Jahre alt und weist eine Spannweite von ca. 60 m auf. Die beiden Stahltragwerke der zweigleisigen Brücke sind strukturell getrennt ausgeführt. Die Fachwerkträger sind um jeweils ein Feld versetzt zueinander gelagert, wodurch eine schiefe Lagerung des Gesamttragwerkes entsteht (Abbildung 2).



Abbildung 2: Fachwerkkonstruktion der Salzachbrücke Eschenau (Foto: ÖBB)

Das historische Stahltragwerk weist alterstypische Mängel auf, welche vor allem korrosionsbedingte Schäden an der Stahloberfläche und Ermüdungserscheinungen im Auflagerbereich aufgrund der schiefen Lagerung sind. Außerdem sind aufgrund von Hangbewegungen auf der orographisch rechten Seite der Salzach Horizontalverschiebungen des Widerlagers eingetreten, welche zu einem Formschluss zwischen Stahltragwerk und Widerlagerwand führten und das statische System des Tragwerkes im Vergleich zur Ursprungsstatik veränderten (Abbildung 3).

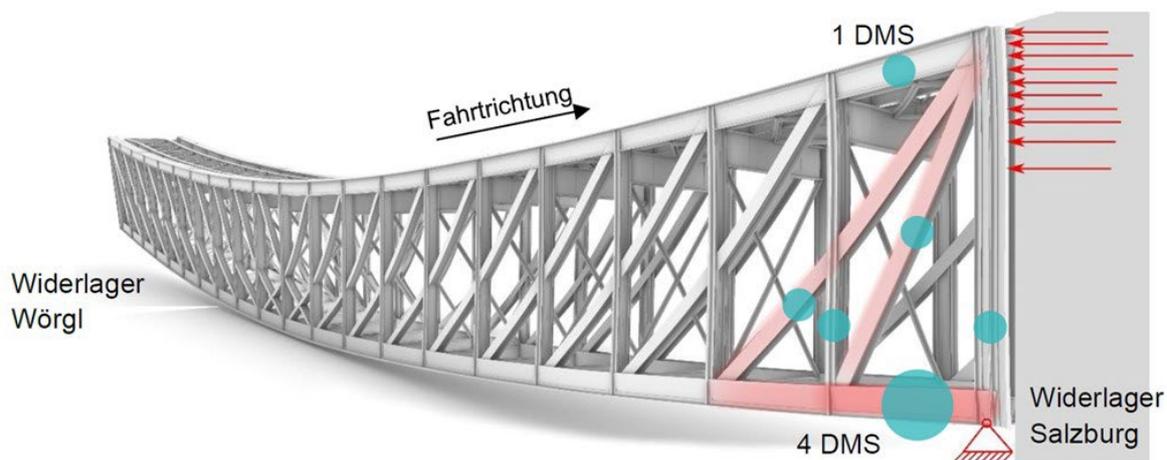


Abbildung 3: Geänderte Lagerungsbedingungen aufgrund von Hangbewegungen (Foto: AIT)

Ein umfangreiches Brückenmonitoring wurde im Rahmen des Forschungsprojekts installiert, wobei über 70 Dehnmessstreifen, sowie Neigungs-, Laser-Distanz- und Temperatursensoren am Tragwerk angebracht wurden. Darüber hinaus wurden die einwirkenden Achslasten zufolge Zugsüberfahrt mittels Weigh-In-Motion (WIM) System erfasst. Das Tragwerksmodell der Brücke wurde mittels Stabelementen und FE-Detailmodellen im Bereich der hoch ermüdungsbeanspruchten Schienenlängs- und -querträger abgebildet. 20 Kalibrationsparameter in Form von Längs- und Drehfedern wurden

auf Basis der Messdaten festgelegt und die geänderten Randbedingungen aufgrund der drückenden Widerlagerwand realitätsgetreu abgebildet (Abbildung 4).

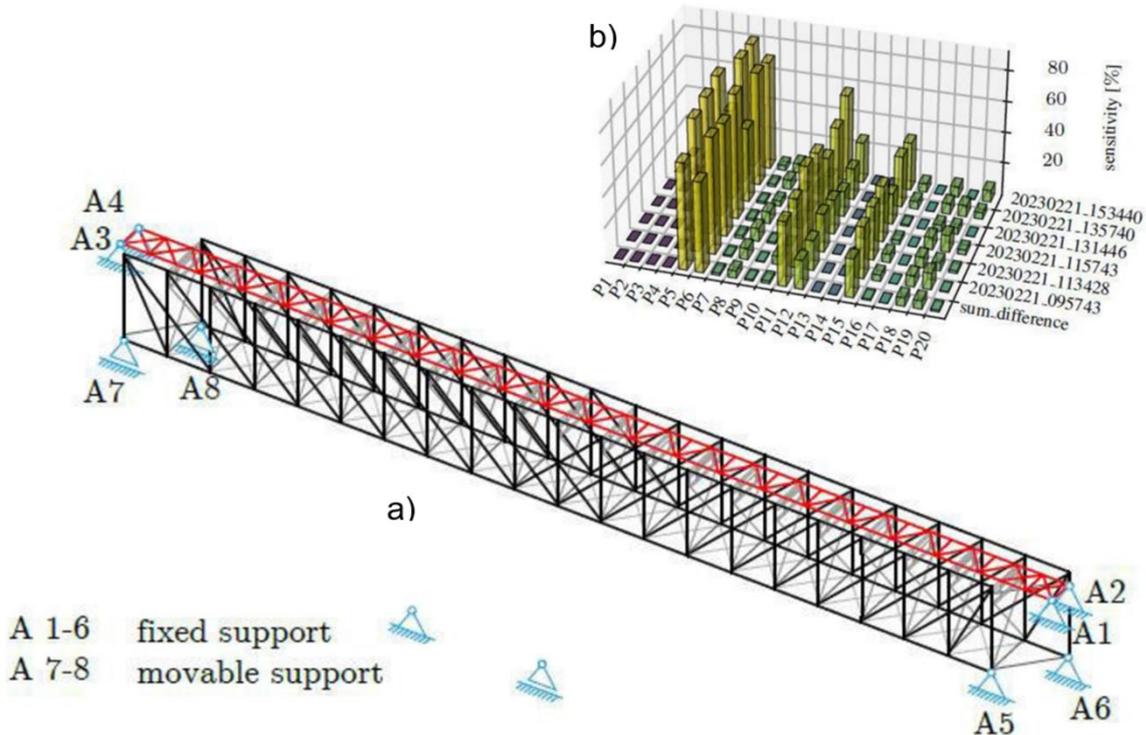


Abbildung 4: (a) Tragwerksmodell mit 20 Kalibrationsparametern  
(b) Sensibilität der Kalibrationsparameter (Foto: AIT)

In Abbildung 5 sind die Einflusslinien von 12 ausgewählten Detailpunkten für das initiale Tragwerksmodell (unterbrochene Linie) und das kalibrierte Tragwerksmodell (durchgehende Linie) dargestellt. Das initiale Tragwerksmodell entspricht dem Tragverhalten der neu errichteten Brücke ohne Berücksichtigung der zeitlichen Veränderungen nach 100 Jahren Nutzung. Das kalibrierte Tragwerksmodell entspricht dem heutigen Istzustand auf Basis der gemessenen Dehnungen. Daraus ist ersichtlich, dass im kalibrierten Modell bei Zugüberfahrten zum Teil deutlich größere lokale Spannungen als im Initialmodell auftreten, wodurch die lokale Ermüdungsbeanspruchung vergrößert und die Restlebensdauer verringert wird.

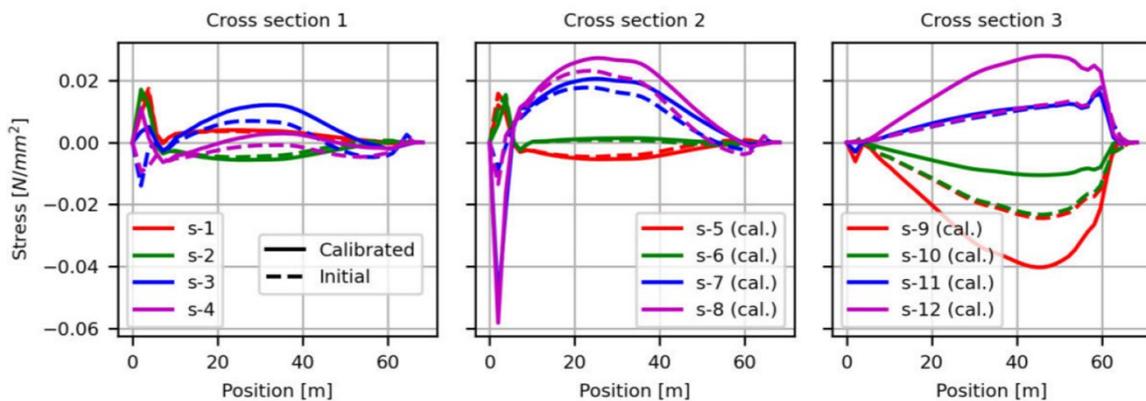


Abbildung 5: Einflusslinien von 12 Detailpunkten für das initiale und das kalibrierte Tragwerksmodell (Foto: AIT)

Bei der Ermüdungsbewertung der Detailpunkte wurden unterschiedliche Belastungsansätze für die Beschreibung des Betriebsverkehrs verglichen:

- Verkehrszusammenstellung des Regelverkehrs nach Abschnitt D gemäß Eurocode EN 1991-2 („EN-Mix“),
- Reduzierter EN-Mix auf Basis der streckenspezifischen jährlichen Gesamtbruttotonnage („EN-Mix (red)“),
- Lastkollektive auf Basis gemessener Achslasten mittels Weigh-In-Motion System („WIM-Züge“) und
- ein aus den WIM-Zügen abgeleitetes streckenspezifisches Ermüdungslastmodell bestehend aus zwölf Betriebszügen („SPE-Züge“).

Exemplarisch ist in Tabelle 1 die auf einen Zeitraum von 100 Jahren hochgerechnete Schädigungssumme  $D_{100}$  eines ausgewählten Detailpunktes in der Nähe der drückenden Widerlagerwand dargestellt. Aus den Schädigungssummen ist ersichtlich, dass das mittels Messdaten kalibrierte Tragwerksmodell deutlich höhere lokale Ermüdungsbeanspruchungen hervorruft als das initiale Tragwerksmodell.

Außerdem ist ersichtlich, dass das auf dem gegenständlichen Streckenabschnitt gemessene Betriebsprogramm deutlich geringere Ermüdungsschädigungen hervorruft als der normativ für Brückenneubauten verankerte EN-Mix es vorsieht. Streckenspezifische Belastungskollektive ergeben somit zum Teil deutlich geringere Ermüdungsschädigungen, wodurch eine positive Nachweisführung der Restlebensdauer auch bei älteren Brücken möglich wird.

*Tabelle 1: Vergleich der auf einen Zeitraum von 100 Jahren hochgerechneten Schädigungssummen für einen ausgewählten Detailpunkt. Verglichen werden unterschiedliche Lastmodelle am initialen und am kalibrierten Berechnungsmodell.*

$D_{100}$	Lastmodelle				
	Num. Modell	EN-Mix	EN-Mix (red)	SPE-Züge	WIM-Züge
<b>Initial</b>		0,93	0,20	0,06	0,03
<b>Kalibriert</b>		<b>11,21</b>	<b>2,36</b>	0,90	0,48
<b>Kalibriert/Initial</b>		12,04	12,04	14,66	14,88

## Zusammenfassung und Ausblick

Das gegenständliche Forschungsvorhaben zeigte anhand der Salzachbrücke Eschenau die Potentiale der messdatenbasierten Restlebensdauerbewertung von Eisenbahnbrücken aus Stahl, welche aus der Koppelung und Kalibration digitaler Rechenmodelle mit realen Tragstrukturen resultieren. Dabei zeigt sich, dass lokale Strukturschädigungen und Störungen des planmäßigen Tragverhaltens großen Einfluss auf die Ermüdung lokaler Kerbdetails haben. Dies bekräftigt die hohe Bedeutung der handnahen Inspektion zur Erfassung des Anlagenzustandes von Eisenbahnbrücken.

Unter Berücksichtigung streckenspezifischer Lastmodelle kann die theoretische Restlebensdauer bestehender Eisenbahnbrücken aus Stahl gegenüber dem Zugmix des Eurocodes, welcher für Brückenneubauten verwendet wird, deutlich verlängert werden. Die Ermittlung der Belastungskollektive kann mittels Achslastmessungen im Anschluss an Brücken oder mittels detaillierter Kenntnis der Bahnbetriebsdaten erfolgen. Die Belastungsgeschichte von Eisenbahnbrücken auf Basis von Achslasten ist somit ein wirkungsvolles Werkzeug der Restlebensdauerbestimmung.

Anlagenbestand und Inspektionserfahrung zeigen, dass der Brückentyp „genietete Eisenbahnbrücken aus Stahl“ in der Regel ein günstiges Ermüdungstragverhalten aufweist und somit eine lange Nutzungsdauer zulässt. Die setzt voraus, dass die Instandhaltung und insbesondere die Erneuerung des Korrosionsschutzes über die gesamte Nutzungsdauer rechtzeitig erfolgen. Durch Kombination von Erfahrungswerten mit messdatenbasierten Bewertungsmethoden kann die theoretische Lebensdauer von Brücken gesichert und kontrolliert erreicht werden, was einen wertvollen Beitrag zur sorgfältigen Ressourcennutzung und Nachhaltigkeit darstellt.

### ***Danksagung***

Die beiden Autoren bedanken sich bei allem an dem Forschungsprojekt mitwirkenden Personen und Firmen für die konstruktive Zusammenarbeit und den erfolgreichen Abschluss. Ganz besonderer Dank gilt den wissenschaftlichen Partnern Prof. Harald Unterweger und Dr. Christoph Derler vom Institut für Stahlbau der TU Graz sowie Dr. Eva Maria Echinger-Vill von der Vill ZT-GmbH für die technisch-organisatorische Projektsteuerung.