

# Lebenszyklusbewertung für Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues

Alfred Strauss<sup>1</sup> Gerhard Lener<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur  
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien, Österreich  
e-mail: alfred.strauss@boku.ac.at*

<sup>2</sup> *AB Stahlbau und Mischbautechnologie, Universität Innsbruck,  
Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck, Österreich  
e-mail: gerhard.lener@uibk.ac.at*

---

## Abstract

Das Projekt "LeCIE - Lebenszyklusbewertung für Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues -Strategien und Methoden" 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 wahrscheinlichkeitbasierten 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.

Keywords: Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues, Lebenszyklusbewertung, Lebenszyklusmanagementsystem, Schadensbilder und Schadensprozesse, Prognoseverfahren

---

## 1. Einleitung

Das Projekt "LeCIE - Lebenszyklusbewertung für Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues - Strategien und Methoden" verfolgt das Ziel, ein umfassendes Konzept für ein vorausschauendes Lebenszyklusmanagementsystem für Kunstbauten des Eisenbahnwesens zu entwickeln. Hierfür sollen Inspektionsergebnisse in Bezug auf Schadensbilder und Schadensprozesse mit wahrscheinlichkeitbasierten 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 beschäftigt.

## 2. Zielsetzungen

Für das Projekt wurden folgende Zielsetzungen definiert:

1. Auswertung der Ergebnisse aus den Brückenbesichtigungen
2. Entwicklung eines generellen Life-Cycle-Management Frameworks für Stahlbeton, Stahl- und Verbundbrücken
3. Bestimmung der maßgebenden Degradationsprozesse
4. Identifikation der maßgebenden Einflussgrößen
5. Entwicklung von Degradationsmodellen

## 3. Bestimmung der maßgebenden Degradationsprozesse

### 3.1. Allgemeines

Eine maßgebende Grundlage für die Entwicklung eines Life-Cycle-Management-Tools ist eine bestmögliche Kenntnis über das funktionelle Degradationsverhalten der Tragwerke. 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 Sensibilitätsanalyse der im Bestand häufig vorkommenden Degradationsprozesse durch die Auswertung der Besichtigungsergebnisse der letzten Projektjahre durchgeführt. Aus den gewonnen Erkenntnissen und nach einer erweiterten Datenerhebung wurde eine Konzeptstudie für eine neuartige Herangehensweise zur Ableitung von Degradationsfunktionen durchgeführt. Die Vorgehensweisen und die daraus resultierenden Resultate werden nachfolgend erläutert.

### 3.2. Auswertung der Brückenbesichtigungen

Für die Auswertung der besichtigten Objekte wurden unterschiedliche Schadensbilder definiert und die Ergebnisse komponentenweise analog dem Schulnotensystem bewertet. In weiterer Folge erfolgte ein Studium der Daten und die Suche nach eindeutigen, d.h. mittels statistischer Methoden belegbarer Zusammenhänge einzelner Kategorien, wie z.B. Bauwerksalter und Korrosion. Im ersten Schritt wurden die Methoden der linearen Regression verwendet, wobei sich die Ergebnisse hierfür als nicht aussagekräftig ergaben und somit für die Bestimmung von Degradationsprozessen als unzureichend erachtet wurden. Dies ist unter anderem auf eine zu geringe und damit nicht repräsentative Stichprobe 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 Stabwerksmodellen und wesentlich geringeren Einwirkungen. Damit werden sehr häufig örtlich konzentrierte Spannungsspitzen an Steifigkeitssprüngen und in Querverbänden nur unzureichend erfasst. Dies sind jedoch gerade jene Stellen, an denen Ermüdungsschäden starten, besonders wenn zusätzlich an diesen Stellen noch ungünstigen Ausführungen hinsichtlich des Korrosionsschutzes vorliegen. Mit Berechnungsmethoden und Nachweiskonzepten basierend auf räumlichen Modelle könnte ein Teil dieser rasch fortschreitenden Schädigungsprozesse eventuell verhindert werden.

### 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 Radaj und Vormwald [1], [2], sowie die Bemessungsnormen des EUROCODE-Pakets, die B45-Richtlinie [3] und die IIW-Richtlinie [4] 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 der Eurocodes 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 sind und die Ergebnisstreuungen innerhalb der Klimaklasse trotzdem sehr groß sind. Generell ist dabei das Mikroklima zu verwenden, dessen Erueirbarkeit 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 [5].

## 4. Entwicklung von Degradationsmodellen

### 4.1. Allgemeines

Nachdem die maßgebenden Degradationsprozesse und deren Einussgrößen bekannt waren, erfolgte die Erstellung eines generellen Life-Cycle-Management Frameworks. Dies geschah im Sinne einer gemeinschaftlichen Konzeptfindung und Struktur in Kooperation der UIBK mit der BOKU, wobei das derzeitige Ergebnis nicht als endgültige Lösung zu betrachten ist. Dabei wurden insbesondere die Zusammenhänge einzelner Komponenten hergestellt. Deren quantitativer Inhalt ist allerdings noch zu ergänzen. Auch für das Degradationsmodell der Ermüdung konnte ein Konzept entwickelt werden. Dieses Modell ermöglicht die Verknüpfung von beliebiger Achslastmessdaten und der Verkehrsentwicklung auf der Einwirkungsseite mit den Bauteilwiderständen der unterschiedlichen Konstruktionstypen und tragwerksspezifischen Parametern [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 zu erwähnen, welche unterschiedliche Degradationsfunktionen ergeben. Es ist so mit naheliegend, die Degradationsmodelle, Degradationsfunktionen und die Prozessgeschwindigkeiten allgemein in einer Datenbasis abzulegen und anhand der Informationen aus dem Brückenstammdatenblatt und allfälliger zusätzlich vorhandener Eingangsgrößen für das jeweilige Objekt im Life-Cycle-Management-Tool nur mehr auszuwerten und/oder anzupassen (Postprozessor). 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 Tragwerksysteme und/oder Detailausbildungen vorliegen auf die nur mehr zugegriffen werden muss.

### 4.3. Degradationsmodelle für den Stahlbau

Basierend auf durchgeführten Literaturrecherchen, Tragwerksbesichtigungen und Achslastmessdaten erfolgte die Bestimmung der maßgebenden Degradationsprozesse für Stahl- und Verbundbrücken. Dabei wurden unterschiedliche Herangehensweisen in Betracht gezogen, da einzelne Prozesse als nicht deterministisch abbildbar erschienen. Die Modellbildung erfolgte durch eine statistische Analyse von ausgearbeiteten Fragebögen zum Erhaltungszustand unterschiedlicher Brückenbauwerke und den Achslastmessdaten von 9 Messstellen. Die Auswertung dieser Daten ermöglicht die Überführung in ein Prozessmodell. Parallel dazu erfolgte die Entwicklung der deterministischen Prozessmodelle. Die durchgeführten Voruntersuchungen haben gezeigt, dass für Stahl- und Verbundtragwerke die Materialermüdung und Korrosion die maßgebenden Prozesse der Lebensdauer darstellen. 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 wurde daher Konzepte zur rechnerischen Verknüpfung und

Vereinfachung unterschiedlicher Eingangsparameter entwickelt, welche die Ableitung einer allgemeineren Degradationsfunktion für die Materialermüdung mit Berücksichtigung der Korrosion ermöglichen. Entwickelt wurden ein semiprobabilistisch-deterministisches Modell und ein auf rein probabilistischen Ansätzen basierendes Modell.

Die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit erfolgt numerisch durch Kombination von Zugüberfahrtsberechnungen in Verbindung mit der Auswertung umfangreicher Achslastmessdaten als Einwirkung und daraus abgeleiteten Schadensäquivalenzfaktoren, Prognosemodellen und allfälliger Modifikationsbeiwerte. Mit Hilfe einer geeigneten Signalanalyse kann das resultierende Spannungszeitssignal in dessen Anteile zerlegt und durch Vorgabe einer Wöhlerlinie die Schädigung berechnet werden. Dabei wird das Rainflow-Zählverfahren verwendet und die Schädigung einzelner Überfahrten mittels linearer Schadensakkumulation berechnet. Als Referenzlastmodell verwenden die entwickelten Verfahren das Lastmodell 71 [7]. Abbildung 1 zeigt die berücksichtigten Achslastmessdaten der 9 Messstellen für das Jahr 2014.

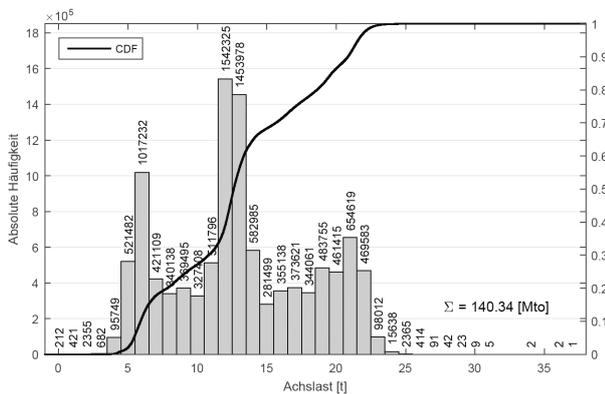


Abb. 1: Berücksichtigte Achslastverteilung aus [6]

Die Ergebnisse der beiden Modelle werden nachstehend am Beispiel einer Eisenbahnbrücke, Einfeldträger mit 15m Spannweite, Bogenradius 1700m und Baujahr 1955 demonstriert.

Das semiprobabilistische-deterministische Modell liefert als Ergebnis die zeitliche Entwicklung der Schadenssumme  $D$ . Deterministisch behandelt wird in diesem Modell die Korrosion, wobei auf umfangreiches Knowhow bei der ÖBB und Angaben in [9] zurückgegriffen wird. Der Zustand des Korrosionsschutzes  $K(t)$  wird dabei in mehrere Abschnitte unterteilt.  $K(T)=1$  bedeutet, dass zum Zeitpunkt  $T$  der Zustand des Korrosionsschutzes mit 95% Wahrscheinlichkeit in allen Schichten gerade noch intakt ist. Bei  $1 > K(T) > 0$  tritt eine rapide Verschlechterung des Zustandes ein, wobei die Schutzwirkung für das Grundmaterial noch erhalten bleibt. Erst bei Erreichen des Grenzzustandes  $K(T) = 0$  ist keine Schutzwirkung mehr vorhanden und das Grundmaterial der freien Bewitterung ausgesetzt. Nach 5 Jahren freier Bewitterung erhöht sich die Schädigungsrate der Ermüdung pro Spannungszyklus erheblich, da einerseits alle Spannungsschwingbreiten wirksam sind (Miner elementar) und zusätzlich eine geringere Schadenssumme toleriert wird. Durch entsprechende zeitgerechte Erneuerung des Korrosionsschutzes kann diese Erhöhung der Schädigungsrate verhindert werden.

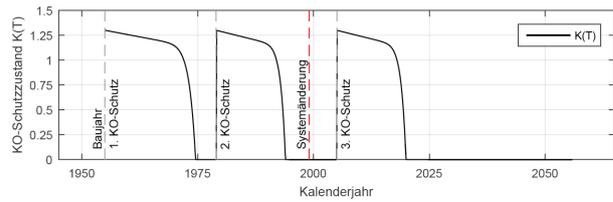


Abb. 2: Zustandsverlauf Korrosionsschutz – Hauptträger aus [6]

Die zeitliche Entwicklung der Schadenssumme  $D$  für einen Brückenhauptträger ist in Abbildung 3 dargestellt.

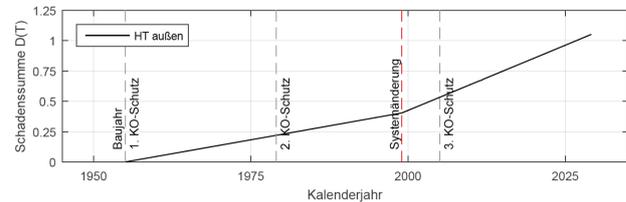


Abb. 3: Schadenssumme  $D$  des bogenäußeren Hauptträgers aus [6]

Das probabilistische Modell berücksichtigt die statistische Verteilung der Eingangsgrößen und liefert als Ergebnis die zeitabhängige Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  und damit den Zusammenhang zum Zuverlässigkeitsindex  $\beta$ .

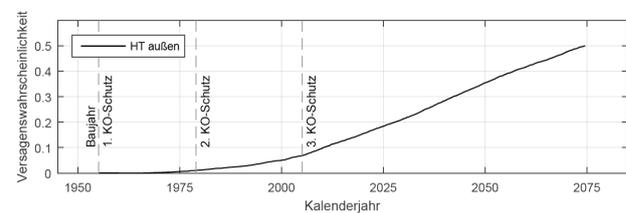


Abb. 4: Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  des Hauptträgers auf Ermüdung aus [6]

#### 4.4. Degradationsmodelle für Stahlbeton

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 erhebbare Parameter durchgeführt. Eine weitere Studie und Analyse der ausgewählten Modelle an den vom Auftraggeber bereitgestellten Brückenobjekten zeigte die Notwendigkeit, die mathematischen Modelle für die Chlorid und Karbontransportprozesse lt. Bulletin 34 und Modell Code für Service-Life-Design [9] zu kalibrieren. Gemäß RVS 13.05.11 [10] werden Eisenbahnbrücken für eine technische Lebensdauer  $t_L$  von 120 Jahren ausgelegt. Die Expertenerhebungen zeigten auch, dass die Normbestimmungen bei Einhaltung einer guten Beton- und Ausführungsqualität die technische Lebensdauer  $t_L$  erfüllen, die Degradationsmodelle jedoch diese Lebensdauer nicht prognostizieren und eine Kalibrierung der in der Literatur [9] enthaltenen Modellparameter erforderlich ist. Der Kalibrierprozess umfasste die Charakterisierung der umweltspezifischen Parameter (Einwirkungen  $S$ ) in Anlehnung an die in der Norm definierten Expositions-Klassen und der materialspezifischen Parameter (Widerstände  $R$ ) z.B. Diffusions-Koeffizienten und Eindringwiderstände. Das Kalibrierziel war die Erfüllung der von den Experten bestätigten technischen Lebensdauer  $t_L$  für vorgegebene Umweltklassen und Betoneigenschaften von

bestehenden historischen Stahlbetonbauwerken. Die für diese Kalibrierung notwendige Studie der historischen Normenwerke und Brückendokumentation zeigt auch, dass die Analysen und Anpassungsprozesse auf Betone der Gruppe CEM I beschränkt werden konnten, wobei die Kalibrierungen in einem weiteren Schritt bis auf CEM III ausgedehnt wurden. Die aus diese, Kalibrierungsprozess hervorgegangenen Modellparameter der 15 häufigsten Betonsorten sind ein Bestandteil der LeCIE Web Datenbank. Diese ermöglicht dem Anwender eine realitätsnahe leicht zugängliche Prognose der technischen Lebensdauer  $t_L$  aufgrund von Chlorid- oder Karbontransportprozessen. Für die Beschreibung des Chloridtransportprozesses wurde das in [9] beschriebene als das anwendungsfreundlichste und robusteste Modell gewählt und in das LeCIE Tool aufgenommen. Dieses Modell ist wie folgt aufgebaut:

$$C(x, t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) * \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 * \sqrt{D_{app}(t) * t}} \right] \quad (1)$$

mit:

- $C_0$ : anfänglicher Chloridgehalt [Gew.-%/c]
- $C_{S,\Delta x}$ : Chloridgehalt von der vorherrschenden Umweltbelastung in [Gew.-%/c]
- $\Delta x$ : Tiefe der Konvektionszone (oberflächennahe Betonschicht), in welcher der Prozess sich nicht konform zum Chlorideindringwiderstand des Fick'schen zweiten Diffusionsgesetz verhält [m]
- $x$ : Tiefe mit dem entsprechenden Chloridgehalt  $C(x,t)$  [m]
- $t$ : Zeit [s]
- $D_{app}$ : offensichtlicher Chloriddiffusionskoeffizient [ $m^2/s$ ]
- erf: Gauss'sche Fehlerfunktion

Diese Gleichung beruht auf dem 2ten Fick'schen Gesetz zur Beschreibung der Diffusion in seiner 1-dimensionalen Form. Obwohl andere Transportmechanismen für auf eine Betonoberfläche wirkende Chloride geeigneter erscheinen um die Kapillarität, Absorption und Permeation abzubilden, gilt das 2te Fick'sche Gesetz als das effektivste und weit verbreiteste Gesetz [11]. Das Gesetz dient zur Berechnung und Prognose des Chloridgehaltes an der Bewehrungsoberfläche zu einer Korrosion (Querschnittskorrosion) und in Folge zur Querschnittsverringering oder Verlust des Bewehrungsstahles führt.

Für die Beschreibung des Karbontransportprozesses wurde das in [12] beschriebene Modell als das anwendungsfreundlichste und robusteste Modell gewählt und in das LeCIE Tool aufgenommen. Karbon bewirkt eine Reduktion des pH-Wertes des Betons und somit eine, De-Passivierung des Bewehrungsstahls und damit Korrosion. Dieses Modell ist wie folgt aufgebaut:

$$x_{c,d}(t) = \gamma_f * k_{NAC} * \sqrt{k_e * k_c * k_a} * \sqrt{t} * W(t) \quad (2)$$

mit:

- $k_{NAC}$ : Karbonatisierungsrate [ $mm/Jahr^{0.5}$ ] bei  $W(t)=1$ ,  $ke=1$ ,  $kc=1,ka=1$ , relative Luftfeuchtigkeit  $65\pm 5\%$ , Temperatur  $20\pm 2^\circ C$ ,  $CO_2$ -Konzentration  $0.04\pm 0.005$  Vol% bei atmosphärischem Druck
- $k_e$ : Faktor bzw. Funktion zur Beschreibung des Umwelteinflusses der relative Luftfeuchtigkeit (RH<sub>a</sub>)

auf Basis des eff. Inversen Karbonatisierungswiderstandes [-]

- $k_c=1$ : Faktor bzw. Funktion zur Beschreibung der Nachbehandlung/Ausführung (Nachbehandlungszeit  $t_c$ ) auf den Karbonatisierungswiderstand [-]
- $k_a=1$ : Faktor bzw. Funktion zur Beschreibung des Effektes aus  $CO_2$  Konzentration in der Umgebungsluft [-]
- $W(t)$ : Faktor bzw. Funktion zur Beschreibung der Befeuchtungsraten [-] welche das Eindringen von  $CO_2$  hindert. Mit steigender Karbonatisierungstiefe und Zeit bedeutender.

### 5. LeCIE Datenbank & WEB basierte Prognosetool

Das WEB basierte Prognosetool "LeCIE" erlaubt es neue und bestehende Brücken in einem freien Eingabeformat anzulegen, zu bearbeiten (korrigieren oder 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 (Degradationsanalysen bzw. Lebensdaueranalysen) können für das gesamte Brückenobjekt, für Elementgruppen oder für jedes in der Eingabe definierte Element durchgeführt werden.

Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitte der kostenoptimierten Chlorid-Performance-Bewertung mit Interventionen (Strategie I „Prozessverzögerung“ & Strategie II „Betonersatz“) für die Widerlager A Gruppe der Brücke 1062 der Strecke 33.003. Aus der Abbildung ist auch ersichtlich, dass eine Intervention nur für die Widerlagerwand jedoch nicht die Flügel erfolgen muss. Das LeCIE WEB Tool erlaubt auch die Kombination zwischen den Prozessen und somit die Auswahl des maßgebenden Prozesses und die Auffindung der kostenoptimierten Interventionsstrategie.

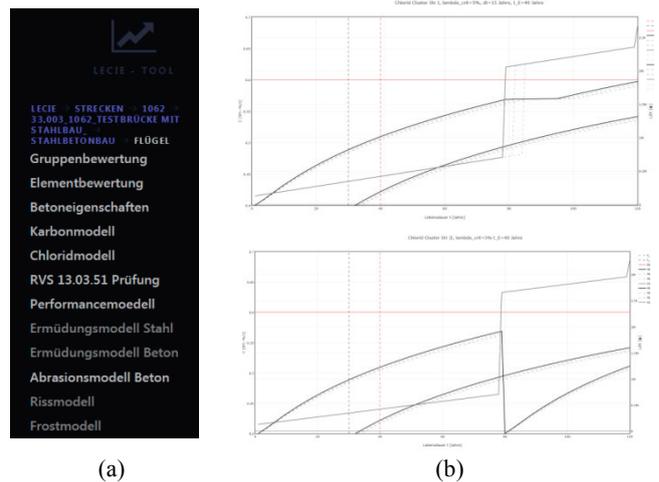


Abb. 5: Chlorid-Performance-Bewertung mit Interventionen (Strategie I „Prozessverzögerung“ & Strategie II „Betonersatz“) für die Widerlager A Gruppe der Brücke 1062 der Strecke 33.003 bestehend aus den Flügeln und der Widerlagerwand

### 6. Zusammenfassung und Ausblick

Neben der Auswertung der Brückenbesichtigungen des vergangenen Berichtsjahres konnte die Entwicklung des generellen Life-Cycle-Management Frameworks erfolgreich abgeschlossen werden. Ebenso wurden die maßgebenden Einflussgrößen für die Abläufe der für Stahltragwerke relevanten Degradationspro-

zesse ermittelt und in weiterer Folge mit der Entwicklung der Degradationsmodelle begonnen.

Dabei konnten für die Komponente der Ermüdung deutliche Fortschritte erzielt und wesentliche Zusammenhänge erfasst werden, deren Umsetzung numerisch auch mit akzeptablem Zeitaufwand möglich ist. Praktisch abgeschlossen ist die Erfassung realer Einwirkungen durch die Auswertung von Achslastmessdaten. Für diesen Punkt ist nur mehr die Definition der langfristigen Verkehrsentwicklung offen. Für die Komponente Korrosion konnte die Konzeptstudie zur Entwicklung einer neuartigen Methode zur Ableitung der Degradationsfunktion erfolgreich abgeschlossen werden. Die weiteren Schritte liegen neben Parameterstudien für die die Komponente Ermüdung, durch die eine deutliche Reduktion der zu lösenden Problemstellung erwartet wird, in der endgültigen Verifizierung der Vorgehensweise. Des Weiteren sind die Komponenten Verkehrsprognose und Bauteilwiderstand vertieft zu untersuchen und die zulässige Schadenssumme und allfällige Modifikationsfaktoren zu quantifizieren. Zusätzlich soll die Überführung in ein probabilistisches Modell erfolgen, dessen Ergebnisgröße der Zuverlässigkeitsindex darstellt. Für die Komponente der Korrosion sind, sobald eine ausreichende Menge an Daten vorhanden sind, die gezeigten Modellansätze zu verfeinern erneut zu analysieren und zu verifizieren. Im Anschluss sind daraus resultierenden Degradationsfunktionen abzuleiten und gemeinsam mit der Ermüdung in einem Gesamtmodell zusammenzufassen.

Für die Stahlbetontragwerke konnten wie für die Stahltragwerke die maßgebenden Degradationsmodelle und deren Eingangsgrößen charakterisiert werden. Mit der Entwicklung des WEB basierten LeCIE Prognose-Bewertungstools steht dem Anwender ein Werkzeug für ein realitätsnahes, effektives Life-Cycle-Management für eine kostenoptimierte Erhaltungsstrategie zur Verfügung.

## Literatur

- [1] Radaj D. Vormwald M.: Fachbuchreihe Schweißtechnik: Bd 82: Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen, Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1985.
- [2] Radaj D., Vormwald M.: Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure. 3. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [3] ÖBB Infrastruktur, B45: Technische Richtlinie für Eisenbahnbrücken und sonstige konstruktive Ingenieurbauwerke, Wien: ÖBB Infrastruktur, 2011.
- [4] Hobbacher A.: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components: doc. XIII-2460-13/XV-1440-13, Paris: International Institute of Welding, 2014.
- [5] Petraschek T.: „Bedarfsgerechte Instandsetzung der Korrosionsschutzbeschichtung,“ Stahlbau, Bd. 84, Nr. 6, pp. 402-409, 2015.
- [6] Schmid J.: Neue Ansätze zur Bestimmung des Restlebensdauer von Eisenbahnbrücken aus Stahl, Dissertation in Arbeit, Innsbruck, 2017.
- [7] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke: Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, Wien, 01.03.2012.
- [8] Det Norske Veritas Classification Notes No. 30.7: Fatigue Assessment of Ship Structures, 2003
- [9] fib Bulletin 34 – Service-Life-Design. fib - International Federation for Structural Concrete; 2006.
- [10] FSV. (2017). RVS 13.05.11 Lebenszykluskostenermittlung für Brücken - Schiene - Verkehr, Vienna, Austria.
- [11] fib Bulletin 76 – Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards. fib - International Federation for Structural Concrete; 2015.
- [12] fib Model Code for Concrete Structures 2010. fib - International Federation for Structural Concrete; 2010.