



31. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

07. UND 08. JUNI 2022

© 2022 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

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Technische Universität Dresden

Institut für Massivbau

01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Drackensteiner Hang (1936) – Foto: Martin Hahn, LAD

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

ISSN 1613-1169

ISBN 978-3-86780-709-8



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

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

Tagungsband

31. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens der TU Dresden e.V.

TUDIAS GmbH

07. und 08. Juni 2022

Inhalt

Herzlich willkommen zum 31. Dresdner Brückenbausymposium 2022!	7
Grußwort des Sächsischen Staatsministers für Regionalentwicklung	11
Brücken auf geokunststoffbewehrten Widerlagern – schnell, umweltgerecht und kostengünstig	13
<i>Gero Marzahn, Jörg Kranz, Dietmar Placzek, Thomas Oehler</i>	
Brücken mit Verbunddübelleisten – Entwurf, Bemessung und Ausführungsbeispiele	27
<i>Günter Seidl, Victor Schmitt, Wojciech Lorenc</i>	
Die Filstalbrücken im Zuge der NBS Wendlingen–Ulm – Integrale Bauwerke mit besonderen statisch-konstruktiven Herausforderungen	43
<i>Anton Braun</i>	
Zugglieder aus Faserverbundwerkstoff im Brückenbau – Besonderheiten beim Einsatz von Netzhängern aus Carbon	57
<i>Lorenz Haspel</i>	
Verstärken von Bestandsstrukturen mittels Verbundankerschrauben	75
<i>Jürgen Feix, Johannes Lechner</i>	
Verstärkung von Stahl- und Spannbetonbrücken mit Carbonbeton – Aktuelles aus Praxis und Forschung	89
<i>Oliver Steinbock, Thomas Bösch</i>	
Integration of FEM Analysis and Construction Geometry Management on the Example of the Thu Thiem 2 Cable Stayed Bridge	107
<i>Antti Karjalainen</i>	
Brückendenkmalpflege – Erfahrungen aus Baden-Württemberg	121
<i>Michael Hascher, Sabine Kuban</i>	
smartBRIDGE Hamburg – die Brückeninstandhaltung der Zukunft	139
<i>Marc Wenner, Steffen Marx, Markus Meyer-Westphal, Martin Herbrand, Christof Ullerich</i>	
Risikobasiertes Anlagemanagement der Brücken der SBB – Methode und erste Anwendungserfahrungen	151
<i>Dirk Proske, Herbert Friedl, Jean-Baptiste Payeur, Blaise Girardin</i>	
Die Schorgasttalbrücke – Herzstück der Ortsumgehung Untersteinach	163
<i>Bernhard Schäpertöns, Daniel Schäfer, Werner Kuhnlein, Christoph Schultheiß</i>	
Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton	175
<i>Andreas Apitz, Frank Jesse, Mike Schlaich</i>	
Fertigung und Montage der Chenab Railway Bridge in Indien – Ein Erfahrungsbericht ...	191
<i>Frank Bauchspiess</i>	
Chronik des Brückenbaus	207
<i>Zusammengestellt von Sabine Wellner</i>	

Risikobasiertes Anlagemanagement der Brücken der SBB – Methode und erste Anwendungserfahrungen

Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Proske¹, Dipl.-Ing. Herbert Friedl²,
Dr. Jean-Baptiste Payeur¹, MSc. Blaise Girardin²

1 Einleitung

Die Schweiz verfügt über eines der dichtesten und meistbefahrenen Schienennetze der Welt. Mit einem Streckennetz von 3.260 km Länge hat die Schweiz die höchste Streckennetzdichte in Europa (Bild 1). Trotzdem erreicht die Schweizer Bahn im Bereich Pünktlichkeit einen internationalen Spitzenplatz [1]. Im Jahr 2019 transportierten rund 11.300 Züge der Schweizer Bundesbahnen (SBB) täglich 1,32 Millionen Reisende und 200.000 Tonnen Güter [2]. Ermöglicht wird dies durch sichere und verlässliche Infrastrukturanlagen und -bauwerke.

Durch die Topografie der Schweiz weist das Streckennetz der SBB eine hohe Anzahl von Ingenieurbauwerken wie Brücken und Tunnel

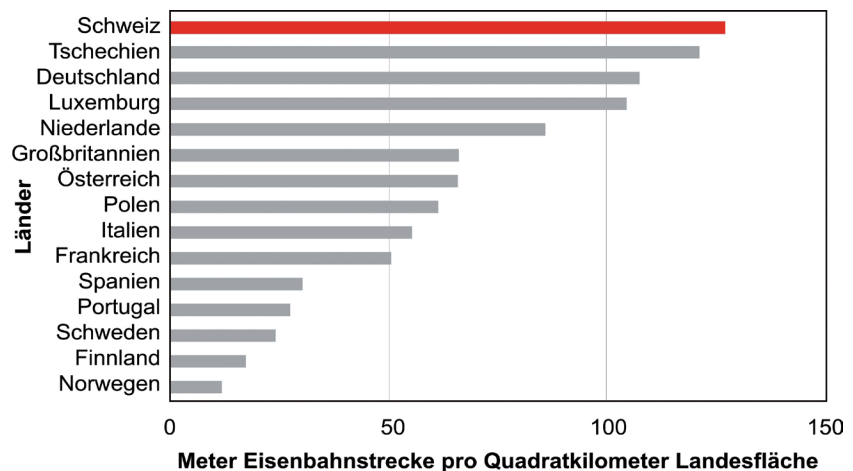


Bild 1 Streckennetzdichte in Europa (2018)

Grafik: Herbert Friedl

auf. So beträgt die Brückendichte, also die Anzahl Brücken pro 10 km Streckenlänge, in der Schweiz 18, während der Wert in Ungarn, Polen oder Finnland bei 3 liegt [3].

Der Wiederbeschaffungswert sämtlicher Infrastrukturanlagen beläuft sich im Berichtsjahr 2020 auf rund 107,4 Mrd. Schweizer Franken (15 % des Schweizer Bruttoinlandsproduktes) und der Wiederbeschaffungswert der Ingenieurbauwerke des SBB-Netzes auf 44 Mrd. Schweizer Franken [4]. Allein der Wiederbeschaffungswert der Anlagenarten Brücken und Tunnel beträgt rund 30 Mrd. Schweizer Franken (27 Mrd. EUR). In Tabelle 1 wird der Wiederbeschaffungswert für verschiedene Ingenieurbauwerke der

Tabelle 1 Anzahl und Wiederbeschaffungswert verschiedener Ingenieurbauwerke der SBB [4]

Ingenieurbauwerk	Anzahl (gerundet)	Wiederbeschaffungswert in Mrd. Schweizer Franken (gerundet)
Tunnel	430 Stück mit einer Länge von 469 km	17,2
Brücken	6.203 Stück mit einer Fläche von 1,2 Mio. m ²	12,6
Erdbauwerke	6.200 Stück mit einer Länge von 1.270 km	6,3
Stützbauwerke	17.000 Abschnitte mit einer Fläche von 1,6 Mio. m ²	4,1
Schutzwände	4.360 Stück mit einer Länge von 431 km	1,3

¹ Berner Fachhochschule, Department Architektur, Holz und Bauingenieurwesen, Burgdorf

² SBB AG, Anlagenmanagement Ingenieurbau, Bern

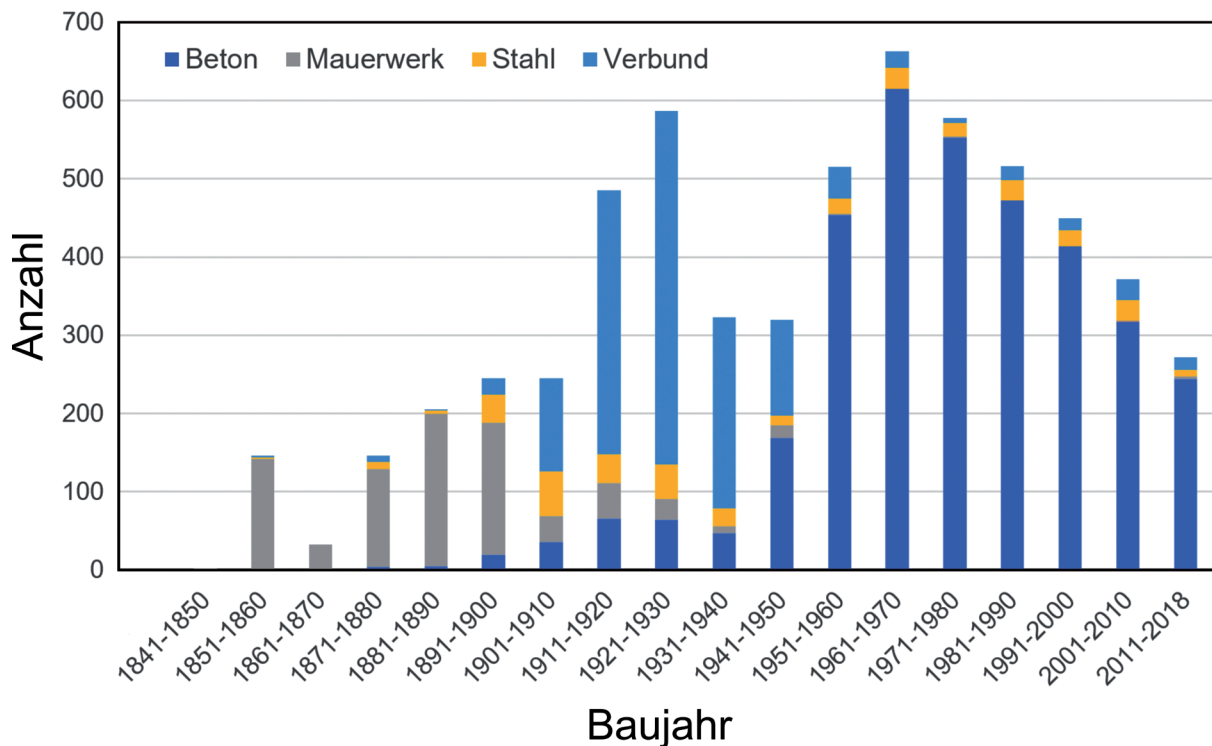


Bild 2 Altersverteilung der SBB-Brücken

Grafik: Herbert Friedl

SBB genannt, wobei der Anteil der Brücken bei 12,6 Milliarden Schweizer Franken liegt, [5].

Der Mittelwert des Alters der Brücken der Schweizer Bundesbahn (SBB) beträgt 68 Jahre, der Medianwert liegt bei 61 Jahren, und ca. 1.300 Brücken sind älter als 100 Jahre (Bild 2). Gleichwohl wurden in den vergangenen Jahren große Erweiterungen des Bahnnetzes umgesetzt, wie die neue Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT) oder die Durchmesserlinie in Zürich, [1].

Die SBB hat sich zum Ziel gesetzt, dass die Mobilität attraktiv und für Kunden, Kantone und Bund bezahlbar bleiben soll. Unsicherheiten beim Management des Bahnnetzes sollen berücksichtigt werden [6]. Aus diesem Grund ist die Kenntnis des Netzzustands und damit auch der Ingenieurbauwerke, wie der Brücken, notwendig. Die SBB erstellt deshalb einen Netzzustandsbericht [4].

Der Netzzustandsbericht verwendet bis heute sogenannte Zustandsklassen für die Ingenieurbauwerke. Die Ermittlung des Bauwerkzustands für Brücken erfolgt bei der SBB im Rahmen von Inspektionen und umfasst in der Regel visuelle und weitere, einfache Untersuchungen. Die Zustandsklasse drückt den Zustand der Gesamsubstanz des Bauwerks aus. Basierend auf beobachteten Zustandsklassen

und angestrebten Zustandsklassen kann man die Erhaltung der Brücken planen. Prinzipiell wird bei dieser zustandsbasierten Bewertung nur das Bauwerk betrachtet, nicht das SBB-Netz. Die zustandsbasierte Planung von Erhaltungsmaßnahmen kann deshalb keine Aussage zur Bedeutung des Brückenbauwerkes im Streckennetz geben.

Dagegen kann die risikobasierte Bewertung die Bedeutung des Bauwerkes für das Streckennetz und damit für die Erfüllung der oben genannten globalen Aufgaben der SBB berücksichtigen. Bei der risikobasierten Bewertung werden im Gegensatz zur zustandsbasierten Bewertung zahlreiche Leistungs- und Funktionsparameter der Bahn einbezogen. Die unterschiedlichen Infrastrukturanlagen könnten damit sowohl untereinander als auch innerhalb der Anlageklassen verglichen und bewertet werden. Diese Bewertung erlaubt daher eine bessere Priorisierung von rechnerischen Untersuchungen und Maßnahmen an den Brücken aus der Gesamtsicht.

Aus diesen Überlegungen heraus hat die SBB 2019 ein Projekt zum risikobasierten Anlagemanagement ihrer Brücken gestartet. Das Projekt besteht aus verschiedenen Arbeitsschritten:

- Erfassung und Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik des risiko-

basiertem Erhaltungsmanagements für die mögliche Anwendung bei der SBB (2019),

- ❑ Umsetzung eines *Proof of Concept* für die SBB-Brücken (2019),
- ❑ Programmtechnische Umsetzung und Verknüpfung mit den Datenbanken der SBB (2020),
- ❑ Praktische Anwendung und Erfahrungsrückfluss zur Verbesserung des Verfahrens (2021).

2 Verwendete Methodik

Es soll ein mathematisches Verfahren angewendet werden, welches eine Priorisierung von Bauwerken und Maßnahmen für ein Gesamtsystem erlaubt. Aus Sicht des risikobasierten Erhaltungsmanagements sind drei Verfahren möglich:

- ❑ Risikobewertungen (zeitunabhängig, verwendet aber Netzinformationen),
- ❑ Lebenszykluskostenanalysen (zeitabhängig, beinhaltet Risikobewertungen) und
- ❑ Lebensqualitätsbewertungen (Berücksichtigung gesamtwirtschaftlicher Indikatoren).

Das Anwendungsziel aller Verfahren ist die Bewertung von Handlungsoptionen auf Grundlage rationaler Kriterien. Bild 3 zeigt visuell die Einordnung der Handlungsoptionen in diesen drei Modellen. Wie man im Bild 3 sehen kann, sind die x- und y-Achsen unterschiedlich beschriftet. Jedes dieser Modelle berücksichtigt unterschiedliche Parameter und kann daher

zu unterschiedlichen Bewertungen der Handlungsoptionen führen. Prinzipiell werden die Modelle von der Risikobewertung über die Lebenszyklusanalyse zur Lebensqualitätsbewertung immer umfassender, verfügen also über immer mehr Parameter. Man spricht deshalb auch bei Lebensqualitätsparametern von der höchsten Form der Risikobewertung.

Im SBB Anlagenmanagement „Ingenieurbau“ werden aktuell vereinfachte Lebenszykluskostenmodelle angewandt, ohne jedoch detaillierte Risikobewertungen zu berücksichtigen. Die hier vorgestellte Risikobewertung R kann später in die vorhandenen Lebenszykluskostenmodellen LCC eingebettet werden, die wie folgt berechnet werden:

$$LCC = G(d) - C(d) - I(d) - R(d),$$

wobei G der Betriebsgewinn, C die Baukosten, I die Instandhaltungskosten und d der Vektor der Bemessungsvariablen ist.

Die Risikobewertung stellt einen Kompromiss zwischen Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse, Anzahl der notwendigen Parameter und Datenmanagement dar. Die Implementierung von Modellen zur Lebensqualitätsbewertung erfordert weitere Parameter, welche aktuell nicht vorliegen. Es wird deshalb im Rahmen dieser Studie nicht weiterverfolgt.

Prinzipiell bestehen Risikoparameter R immer aus den beiden Faktoren Eintrittswahrscheinlichkeit E und Schadensumfang S :

$$R = E \times S$$

Die Bestimmung dieser beiden Faktoren wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

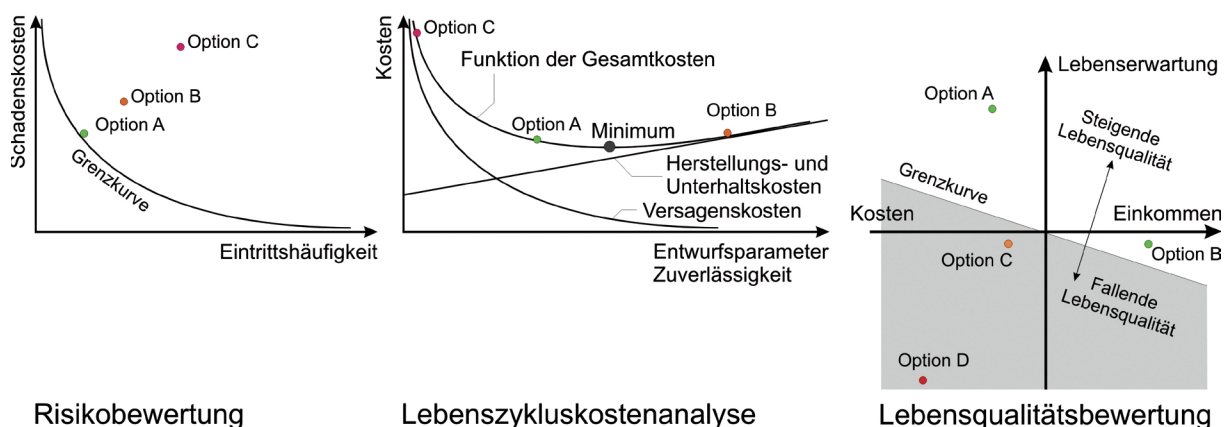


Bild 3 Potenzielle Verfahren für das risikobasierte Anlagemanagement der Brücken Grafik: Dirk Proske

3 Einsturzwahrscheinlichkeit

Um realistische Risikowerte R zu berechnen, ist die Verwendung realistischer Einsturzwahrscheinlichkeiten von Brücken zwingend, sonst erhält man Risikowerte, die nur bedingt praxisrelevant sind und die langfristig zu einer Fehlallokation von Ressourcen der SBB führen.

Der hier verwendete Begriff der Einsturzwahrscheinlichkeit E symbolisiert die Mischung aus berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten bzw. Ersatzparametern und Anpassungen basierend auf statistisch ausgewerteten Einsturzhäufigkeiten:

$$E_B = P_f(a) \cdot \prod_i k_i$$

mit E_B als Einsturzwahrscheinlichkeit für jede Brücke, $P_f(a)$ als altersabhängige Versagenswahrscheinlichkeit und k_i als Korrekturfaktoren. Die Faktoren k_i für die Berechnung der individualisierten korrigierten Einsturzwahrscheinlichkeit sind im Folgenden aufgelistet:

- ☐ Faktor für menschliche Fehler,
- ☐ Faktor für die Korrelation der Grenzzustände,
- ☐ Faktor für die statische Bestimmtheit,
- ☐ Faktor für frühe Vorankündigung,
- ☐ Faktor für die Art der Überführung,
- ☐ Faktor für die Qualität der statischen Berechnung,
- ☐ Faktor für Brückentyp,
- ☐ Faktor für den Baustoff,
- ☐ Faktor für die Bautechnologie,
- ☐ Faktor für Robustheit,
- ☐ Faktor für Gebrauchstauglichkeit.

Es wurden verschiedene Modelle für die altersabhängige Versagenswahrscheinlichkeit integriert, wie z. B. die Badewannenkurve, das Modell nach SIA 269 [7], das Modell nach Tarciska [8], ein Modell in Abhängigkeit von den Zustandsklassen oder ohne Alterung. Auch die Degradationskurven der SBB wurden berücksichtigt.

Das Verfahren wurde in [9] vorgestellt und wurde für jede SBB-Brücke umgesetzt. In [9] finden sich auch Beispielwerte für die einzelnen Faktoren. Die notwendigen Daten für die Bestimmung der Faktoren wurden aus Brückendatenbanken ausgelesen. Insbesondere die Korrelation zwischen Zustandsklasse und Einsturzwahrscheinlichkeit ist nicht trivial. Allerdings wurde für schlechte bzw. alarmierende Brücken Zustände eine Abhängigkeit der Einsturzhäufigkeit aus vergangenen Daten festgestellt.

4 Schadensparameter

Die Berechnung der Schadenskosten S eines Brückenausfalls bzw. einer Brückensperrung kann sehr umfangreich und detailliert werden. Teilweise werden in der Literatur bis zu 50 Parameter berücksichtigt, die von der Anzahl Opfern bis zu Umweltschäden reichen [11].

Für die SBB wurden bisher 15 Schadensparameter einbezogen:

$$S_B = \sum_i s_i f_i$$

wobei S_B die Schadenskosten für jede Brücke und s_i die einzelnen Schadenskostenanteile sind. Einige der Anteile für die Berechnung der individualisierten Schadenskosten s_i bzw. Korrekturfaktoren f_i sind im Folgenden aufgelistet:

- ☐ Wiederbeschaffungswert der Brücke,
- ☐ Preis eines Güterzuges,
- ☐ Preis eines Passagierzuges,
- ☐ Mittlere Anzahl der Todesopfer und der Verletzten beim Brückeneinsturz,
- ☐ Wert zur Vermeidung eines Todesopfers (VOSL),
- ☐ Verhältnis Passagier- zu Güterzügen,
- ☐ Anzahl Züge pro Tag,
- ☐ Einschränkungen auf der Ersatzstrecke,
- ☐ Umleitungstrecke,
- ☐ Dauer der Streckenausfallzeit.

Teile der Arbeiten wurden ebenfalls bereits veröffentlicht [10]. Die notwendigen Daten für die Bestimmung der Faktoren wurden von der SBB zur Verfügung gestellt bzw. der Literatur entnommen. Ein Ziel beim derzeitigen Entwicklungsstand des Modells ist ein ausgewogenes Verhältnis der Bedeutung des Parameters und dem Aufwand zur Beschaffung der Parameterdaten.

5 Programmtechnische Umsetzung

Zunächst wurden durch die SBB die Brückendaten exportiert und extern in ein Tabellenkalkulationsprogramm eingelesen. Im Tabellenkalkulationsprogramm wurde das Berechnungsverfahren gemäß den oben genannten Formeln als *Proof of Concept* umgesetzt. Allerdings muss die Berechnung auf eine Vielzahl von SBB brückenunabhängigen Datenbanken zugreifen, z. B. für das Zugaufkommen.

Aus diesem Grund wurde die gesamte Berechnung in Python (Jupyter Notebook, siehe Bild 4) umgesetzt und dokumentiert. Diese

Example of SBB data plotting

```

Import classes

In [1]: %matplotlib inline
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import numpy as np

Load data

In [2]: data = pd.read_csv('20181210_DfA.csv', sep=';', decimal=',')
data2 = pd.read_csv('globale_auswertung.csv', sep=';', decimal=',')

Merge data

In [3]: result = pd.concat([data, data2], axis=1, sort= False)

select versagenswahrscheinlichkeit columns

In [4]: col_contains_versagen = [col for col in result.columns if 'Versagenswahrscheinlichkeit' in col]
print(col_contains_versagen)

['Versagenswahrscheinlichkeit SIA 269:2007 (o. Korr.)', 'Versagenswahrscheinlichkeit SIA 269:2007 (mit Korr.)', 'Versagenswahrscheinlichkeit Badewannenkurve (o. Korr.)', 'Versagenswahrscheinlichkeit Badewannenkurve (mit Korr.)', 'Versagenswahrscheinlichkeit Taricska (o. Korr.)', 'Versagenswahrscheinlichkeit Taricska (mit Korr.)', 'Versagenswahrscheinlichkeit Zustandsklasse (o. Korr.)', 'Versagenswahrscheinlichkeit Zustandsklasse (mit Korr.)', 'Versagenswahrscheinlichkeit Konstant (o. Korr.)', 'Versagenswahrscheinlichkeit Konstant (mit Korr.)']

Compute Risiko

In [5]: for col_name in col_contains_versagen:
name = col_name.replace('Versagenswahrscheinlichkeit', 'Risiko')
result[name] = result[col_name] * result['Schadensfolgekosten']

In [6]: assert result['Versagenswahrscheinlichkeit SIA 269:2007 (o. Korr.)'] * result['Schadensfolgekosten'] == result['Risiko SIA

```

Bild 4 Python-Programmierung

Grafik: Jean-Baptiste Payeur und Dirk Proske

Python-Software konnte ohne große Probleme zur SBB migriert werden. Dadurch verlassen keine vertraulichen Daten die SBB. Insgesamt werden pro Brücke ca. 30 Parameter aus den SBB-Datenbanken ausgelesen. Die Python Software ist außerdem im Augenblick statisch mit einem GIS-Model verknüpft und soll in Zukunft dynamisch verknüpft werden. Auf Grund lizenzrechtlicher Einschränkungen dürfen im Rahmen dieses Beitrages allerdings keine Bilder der GIS-Verknüpfung gezeigt werden.

6 Sensitivitätsrechnungen

Für die ca. 30 Parameter müssen prüfbare und robuste Werte bereitgehalten werden. Daher sollen die Parameter auch einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnung besitzen. Um die Sensitivität des Modelles und der Berechnungen zu prüfen, wurden verschiedene Sensitivitätsrechnungen durchgeführt. Dabei wurden z. B. verschiedene Alterungsmodelle der Brücken, verschiedene Opferzahlen oder unterschiedliche Zugaufkommen angesetzt.

Die Sensitivitätsberechnung erfolgt in zwei Schritten. Einmal wurden vier Parameterkombinationen für ca. 4.000 Brücken und einmal

wurden ca. 30 Parameterkombinationen für 30 Brücken durchgerechnet.

Bild 5 zeigt die Lage von ca. 4.000 SBB-Brücken in einem Risikodiagramm im Rahmen der ersten Sensitivitätsberechnung. Auf der x-Achse findet sich das Schadensausmaß in Schwei-

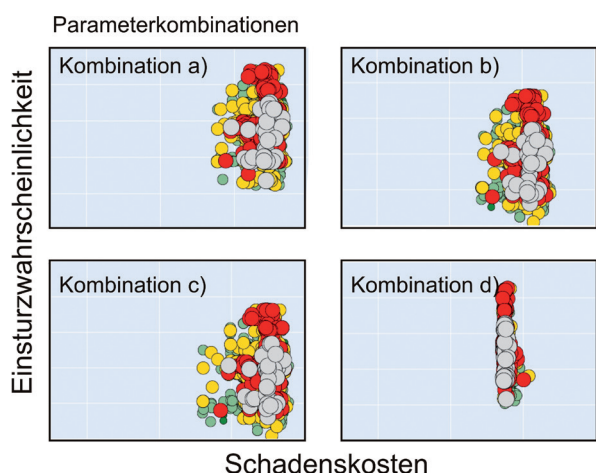


Bild 5 Sensitivitätsberechnung I (die Farben entsprechen den Zustandsklassen) Grafik: Jean-Baptiste Payeur und Dirk Proske

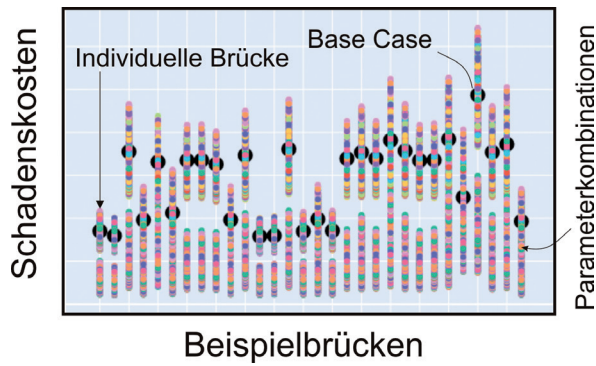


Bild 6 Sensitivitätsstudie II Grafik: Jean-Baptiste Payeur und Dirk Proske

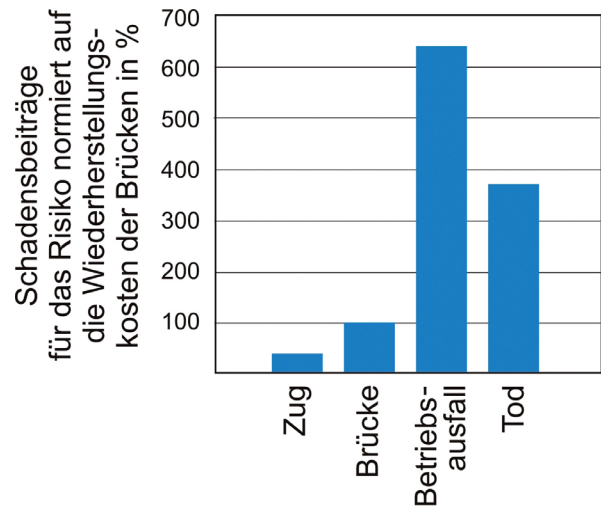
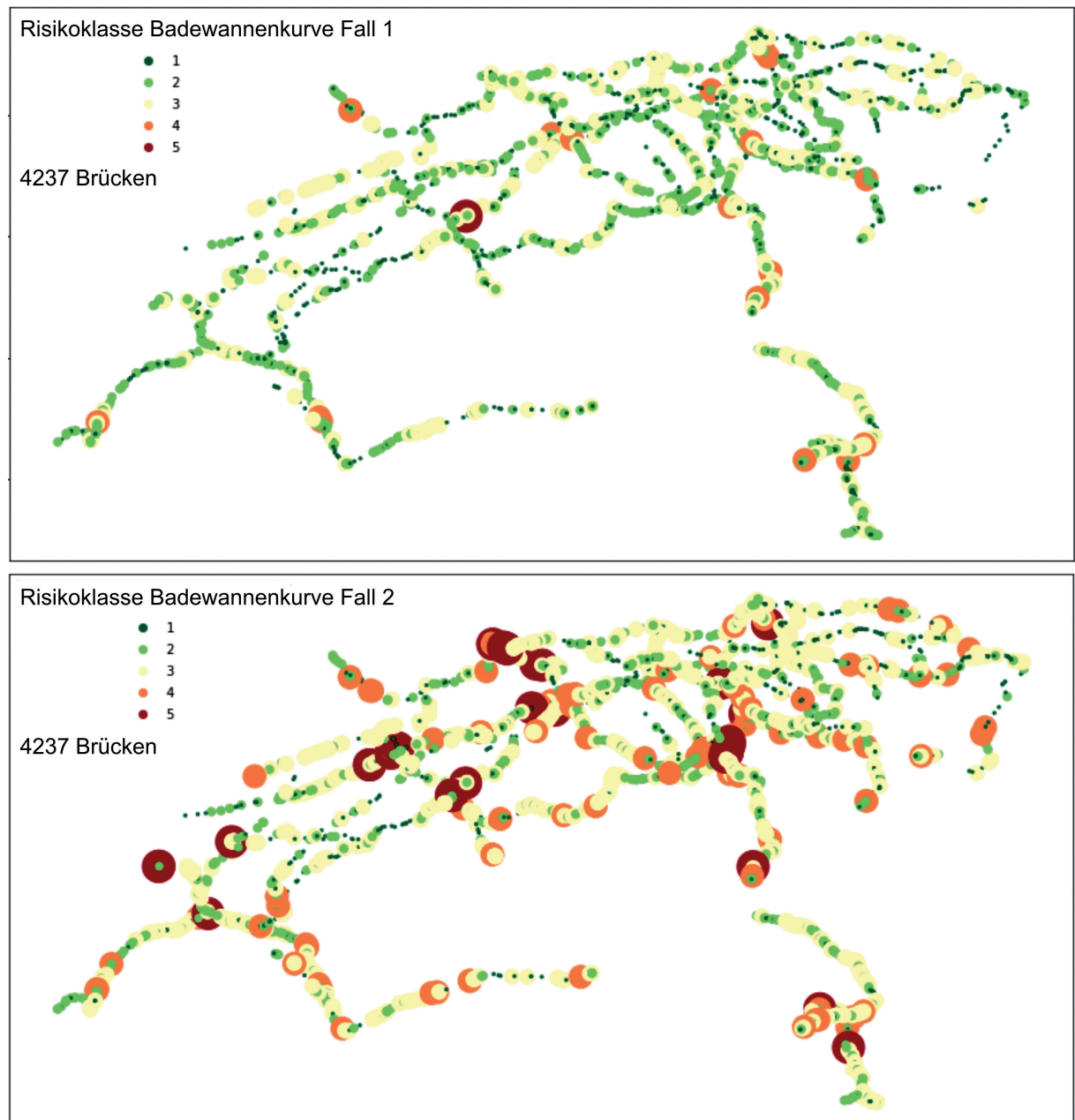


Bild 7 Normierte Schadensbeiträge Grafik: Dirk Proske

Bild 8 Geographische Lage der SBB-Brücken und Darstellung der jeweiligen Risikoklasse für zwei Berechnungsmodelle Grafik: Jean-Baptiste Payeur und Dirk Proske



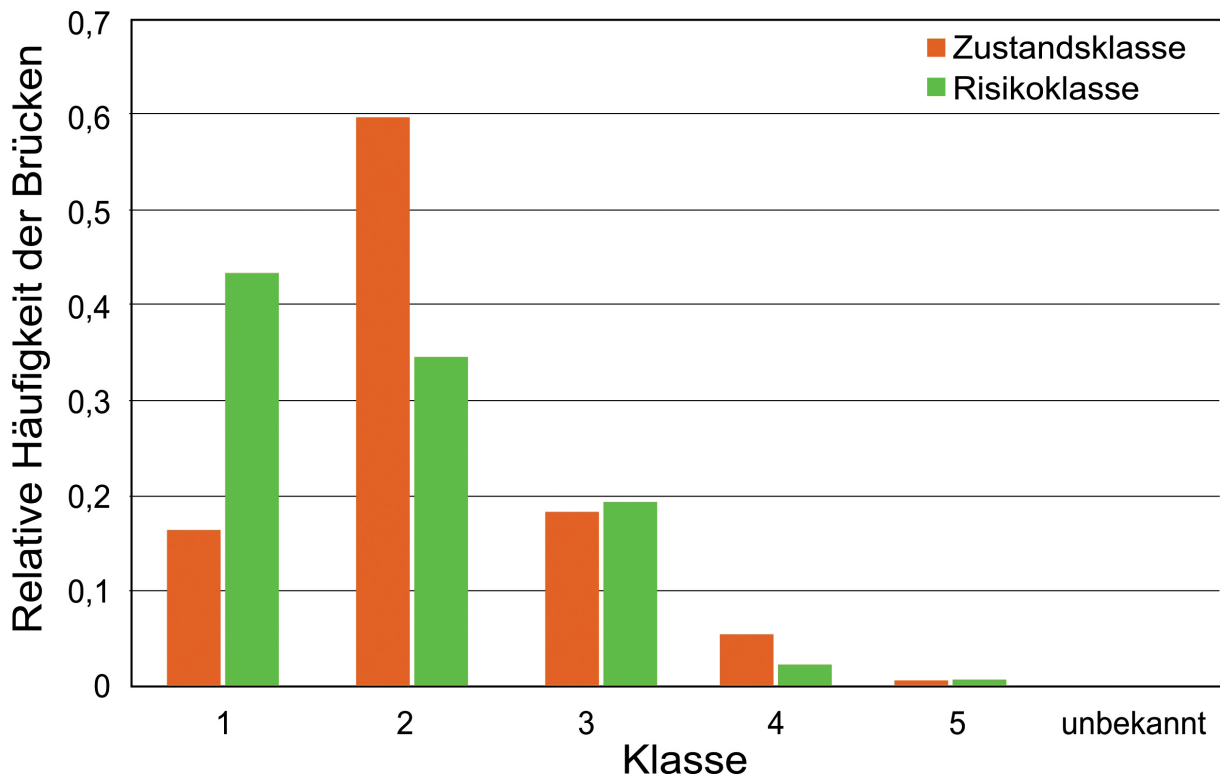


Bild 9 Vergleich Häufigkeit der Brücken in den Zustands- und Risikoklassen

Grafik: Dirk Proske

zer Franken und auf der y-Achse die Einsturzwahrscheinlichkeit. Man erkennt sehr deutlich sowohl die Verschiebung der Brücken in die y-Richtung (Kombinationen a und b) als auch die Stauchung der Brücken in x-Richtung (Kombinationen c und d) durch die vier Parameterkombinationen.

Bild 6 zeigt eine zweite Sensitivitätsstudie für 30 Brücken. Jede Spalte behandelt eine Brücke und jeder Punkt pro Spalte ist eine Parameterkombination. Der schwarze Punkt ist der jeweils gewählte Ankerpunkt (Base Case).

Im Ergebnis der Sensitivitätsstudien erhält man auch die Wichtung der verschiedenen Eingangsgrößen. Bild 7 zeigt die Bedeutung von vier Schadenkostengrößen für die Risikobestimmung. Diese Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit anderen Arbeiten zur Risikobewertung von Brücken [11]–[13].

7 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Risikobewertung aller SBB-Brücken können entweder in tabellarischer Form, z. B. als TOP-100-Risikoliste, oder geographisch dargestellt werden. Bild 8 zeigt die geographische Lage von 4.237 SBB-Brücken und die zugehörige Risikoklasse. Man erkennt

deutlich die Sensitivität der Berechnungsmodelle und damit auch die Auswirkungen von Handlungsoptionen. Die Lage der und die Informationen zu den Brücken wird in den GIS-Karten umfassender dargestellt, wird hier aber, wie bereits erwähnt, auf Grund des Copyrights nicht abgebildet.

8 Praktische Erfahrungen und Ausblick

Die praktische Anwendung des risikobasierten Erhaltungsmanagements erfolgte nicht ohne intensive Diskussionen und Herausforderungen. So zeichnete sich frühzeitig ab, dass die Festlegung der Anzahl der Risikoklassen erheblich zur Akzeptanz des Verfahrens bei den Inspektoren und Bauingenieuren führt [14]. Allerdings ergeben sich dann auch Diskussionen über die Vergleichbarkeit der Zustandsklassen und Risikoklassen, wie sie Bild 9 zeigt.

Darüber hinaus wurde die Berechnung auch auf Brücken *über* die SBB-Strecken erweitert. Hier liegen allerdings nicht alle Daten vor, da es sich um andere Eigentümer handelt. Die Frage der Erweiterung der Grundgesamtheit stellt sich aber auch für die SBB selbst, da prinzipiell auch Durchlässe bewertet werden können.

Daneben haben sich in der praktischen Anwendung weitere Effekte gezeigt:

- ❑ Bestimmte Brückentypen (Stahl-Einfeldträger) und bestimmte Konstellationen (Brücken über Gewässer) treten häufiger in der TOP-100-Risikoliste der Brücken auf bzw. dominieren diese. Diese Beobachtung kann im Augenblick nicht unabhängig geprüft werden, weil bereits alle bekannten Schadensereignisse für die Modellerstellung verwendet wurden – sogenannte verbrannte Daten.
- ❑ Einzelne Kontrollrechnungen zeigen Unstimmigkeiten in den Eingangsdaten. Hier sind dann Einzelfallprüfungen notwendig. Für die Brücken dürfte die Fehlerrate in den Datenbanken aber unterhalb 5 % liegen. In der nächsten Forschungsphase sollen die Daten mit effizienten Algorithmen (KI etc.) automatisiert bereinigt und korrigiert werden.
- ❑ Für einzelne Brücken wurden die Risikowerte durch die SBB individuell berechnet. Diese Nachrechnungen zeigten häufig größere Risikowerte als die automatisierten Berechnungen, weil individuell größere Schadenskosten angesetzt wurden. Die berechneten Versagenshäufigkeiten stimmten überein.
- ❑ Insgesamt zeigt eine Cross-Validierung der TOP-300-Risikoliste, dass etwa 2/3 der gelisteten Brücken mit Listen basierend auf anderen Parametern, wie z. B. Brücken mit Lastbeschränkungen, ermüdungsrelevante Brücken oder Stahlbrücken aus Schweißisen übereinstimmen. Die Interpretation dieser Validierung ist allerdings aufwendig, da die genannten Listen ebenfalls Unsicherheiten beinhalten. Die im Januar 2021 gesperrte Brücke Ossingen befand sich im Bereich der höchsten 4 % der TOP-Risikoliste.
- ❑ Sehr positiv war das Feedback von den Brückenverantwortlichen, wenn die für sie relevanten Brücken durch die Risikoliste bestätigt wurden.
- ❑ Die Kommunikation der Ergebnisse der risikobasierten Bewertungen erfordert einen erhöhten Aufwand. Dabei spielen auch technologische Effekte eine Rolle, wie die mögliche Sperrung und Sperrzeit einer Strecke, die Erreichbarkeit von Brücken etc.
- ❑ Das Verfahren ist sensitiver gegen Änderungen der Rahmenbedingungen, wie z. B. das

mit COVID-19 verbundene, veränderte Verkehrsaufkommen. Hier sind die Zustandsklassen stabiler, allerdings unterliegen auch diese sich daraus ergebenden budgetären Zwängen.

- ❑ Für einige Parameter liegen noch keine Werte vor. So ist z. B. unbekannt, welche Auswirkungen bestimmte Brückenbautechnologien auf die Einsturzwahrscheinlichkeit von Brücken haben. Hier sind weitere Arbeiten notwendig. Bisher wird hier der Faktor 1 verwendet.
- ❑ Eine Erweiterung des vorhandenen Modells auf zeitabhängige Einflüsse, wie Häufigkeiten und Kosten von Instandsetzungen, ist geplant. Die Daten wurden bereits vorbereitet. Das wäre der Übergang von den allein risikobasierten zu den lebenszyklusbasierten Modellen. Da hier bei der SBB-Modelle vorliegen, müssten die beiden Modelle verknüpft und angepasst werden.
- ❑ Bei der SBB liegen Naturgefahrenmodelle vor [15], [16]. Diese könnten mit den Modellen für die Einsturzwahrscheinlichkeiten verknüpft werden.

Mit der methodischen Entwicklung und programmtechnischen Umsetzung des risikobasierten Anlagemanagements der SBB-Brücken können sowohl statische Rechnungen und Untersuchungen von Brücken als auch bauliche Maßnahmen priorisiert werden. Aus Sicht der Autoren bleibt das Konzept der Zustandsklassen erhalten und erlaubt so, dem Bauwerksverantwortlichen auf die Berechnungen Einfluss zu nehmen und unter Umständen ein Veto einzubringen (z. B. Zustandsklasse 5 schlägt immer Risikoliste).

Das entwickelte Modell mit einem errechneten Risiko pro Brückentragwerke dient schon heute als eine zusätzliche Information für Entscheidungen. Die langfristigen Auswirkungen der Risikoanalyse bei Einbindung in Lebenszykluskostenanalysen sollen eine transparente und optimale Verwendung der finanziellen Ressourcen ermöglichen und so das finanzielle und gesundheitliche Risiko für die Gesellschaft zu begrenzen. Dies wird mit dem Risikoansatz möglich, da neben der Zustandsklasse zahlreiche weitere Faktoren berücksichtigt werden, die für die Beantwortung der Frage des verantwortungsvollen Einsatzes der finanziellen Ressourcen notwendig werden bzw. hilfreich sind.

Literatur

- [1] Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK, Hrsg.): Zukunft der Nationalen Infrastrukturnetze in der Schweiz. Bericht des Bundesrates vom 17. September 2010, UVEK, Bern
- [2] SBB Statistikportal: Die SBB in Zahlen und Fakten – Zahlen und Fakten. sbb.ch abgerufen am 15.10.2021
- [3] Proske, D.; van Gelder, P.: Safety of historical stone arch bridges. Heidelberg et al.: Springer, 2009 – DOI: 10.1007/978-3-540-77618-5
- [4] SBB (Hrsg.): Netzzustandsbericht 2020. SBB Infrastruktur, Bern, März 2021
- [5] Friedl, H.: Herausforderungen und Stossrichtungen im Anlagenmanagement für Brücken der SBB. Vortrag zum Burgdorfer Brückenbautag 2019, Berner Fachhochschule und Bau und Wissen, Tagungsunterlagen, September 2019
- [6] SBB (Hrsg.): Vision und Strategie der SBB. <https://company.sbb.ch/de/ueber-die-sbb/profil/strategie.html>, August 2021
- [7] SIA 269: Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2011
- [8] Taricska, M. R.: An Analysis of Recent Bridge failures in the United States (2000–2012). MSc. Thesis, The Ohio State University, 2014
- [9] Proske, D.; Hostettler, S.; Friedl, H.: Korrekturfaktoren der Einsturzwahrscheinlichkeit von Brücken. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020) 2, S. 128–135
- [10] Proske, D.: Zur Berücksichtigung hypothetischer Opferzahlen in Lebenszykluskostenberechnungen von Brücken. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020) 6, S. 459–468
- [11] Al-Wazeer, A. A.-R.: Risk-based Bridge Maintenance Strategies. Diss., University of Maryland, 2007
- [12] Imhof, D.: Risk Assessment of Existing Bridge Structures. Diss., University of Cambridge, Kings College, 2004
- [13] Saydam, D.: Reliability and Risk of Structural Systems under Progressive and Sudden Damage. Thesis and Diss., 2013, Lehigh University, Lehigh Preserver, Paper 1616
- [14] Proske, D.; Tschan, D.: The Definition of Risk Classes for Risk based Maintenances. In: J. C. Matos et al. (Hrsg.): Proc. of 18th Int. Probabilistic Workshop, Lecture Notes in Civil Engineering 153, 12.–14.05.2021 an der University of Minho in Guimarães (Portugal), Springer Nature Switzerland, 2021, S. 281–291
- [15] Winkler, C.; Lambrigger, A.; Bründl, M.: EconoMeRailway: Risikoanalysen Naturgefahren entlang von Bahnstecken. Methodik, Version 1.0, Bundesamt für Umwelt BAFU, 25.06.2012
- [16] Hess, J.; Lager, S.; Manser, R.; Willi, H. P.: Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 12.4271 Darbelly vom 14.12.2012

- 7 Herzlich willkommen zum 31. Dresdner Brückenbausymposium 2022
- 11 Grußwort des Sächsischen Staatsministers für Regionalentwicklung
- 13 Brücken auf geokunststoffbewehrten Widerlagern – schnell, umweltgerecht und kostengünstig
- 27 Brücken mit Verbunddübelleisten – Entwurf, Bemessung und Ausführungsbeispiele
- 43 Die Filstalbrücken im Zuge der NBS Wendlingen-Ulm – Integrale Bauwerke mit besonderen statisch-konstruktiven Herausforderungen
- 57 Zugglieder aus Faserverbundwerkstoff im Brückenbau – Besonderheiten beim Einsatz von Netzhängern aus Carbon
- 75 Verstärken von Bestandsstrukturen mittels Verbundankerschrauben
- 89 Verstärkung von Stahl- und Spannbetonbrücken mit Carbonbeton – Aktuelles aus Praxis und Forschung
- 107 Integration of FEM Analysis and Construction Geometry Management on the Example of the Thu Thiem 2 Cable Stayed Bridge
- 121 Brückendenkmalpflege – Erfahrungen aus Baden-Württemberg
- 139 smartBRIDGE Hamburg – die Brückeninstandhaltung der Zukunft
- 151 Risikobasiertes Anlagemanagement der Brücken der SBB – Methode und erste Anwendungserfahrungen
- 163 Die Schorgasttalbrücke – Herzstück der Ortsumgehung Untersteinach
- 175 Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton
- 191 Fertigung und Montage der Chenab Railway Bridge in Indien – Ein Erfahrungsbericht
- 207 Chronik des Brückenbaus