Nachwuchspreis 2021
Zur Validierung von ZfP-Verfahren für die Nachrechnung von Brücken

Stefan Küttenbaum [1]

[1] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kontakt: stefan.kuettenbaum@bam.de

Kurzfassung. *Die Nachrechnung, d. h. die Beurteilung der Zuverlässigkeit von bestehenden Brücken, ist aufgrund der steigenden Anforderungen an die Bausubstanz und des sich alterungsbedingt verschlechternden Zustands der Bauwerke eine Kernherausforderung im Bauwesen. Sowohl die Berechnungsergebnisse als auch die Validität solcher Beurteilungen hängen im Wesentlichen von den Informationen ab, die über das zu beurteilende System vorliegen. Die Einbeziehung von zusätzlichem Wissen über das Tragwerk, welches vor Ort gemessen wurde, kann genutzt werden, um Unsicherheiten in den Berechnungen zu reduzieren und Abweichungen zwischen den tatsächlichen sowie den initial angenommenen Bauwerkseigenschaften zu identifizieren. Dies ermöglicht realitätsnähere Bauwerksbeurteilungen, die gezielte Planung von Maßnahmen wie Instandsetzungen oder Nutzungseinschränkungen und in der Konsequenz die Optimierung der infrastrukturellen Verfügbarkeiten sowie des Ressourcenverbrauchs.*

Die effiziente Verwendung von Messergebnissen bei der Nachrechnung und von Ergebnissen aus zerstörungsfreien Prüfungen im Speziellen setzt voraus, dass die Relevanz der messbaren Informationen beziffert, die Qualität der gemessenen Information berechnet und die Anforderungen an die Genauigkeit der Inspektionen aus der statischen Berechnung abgeleitet werden können. Der Vergleich der Anforderungen an eine zu messende Information mit der Qualität der gemessenen Information wird in diesem Aufsatz als Validierung eines Messverfahrens aufgefasst. Es wird gezeigt, wie zerstörungsfreie Prüfverfahren für die Nachrechnung validiert werden können. Die Methodik wird anhand einer mit der Ultraschallecho- und Impulsradarmethode untersuchten Spannbetonbrücke demonstriert.

1 Einleitung

Regelmäßige Bauwerksprüfungen haben sich als wesentlicher Bestandteil der Zustandsbeurteilung von Brücken etabliert. Sie dienen der rechtzeitigen Identifikation von Schäden und sind die Basis für die Bewertung der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und der Dauerhaftigkeit des Tragwerks [1]. Inspektionen vor Ort können darüber hinaus gewinnbringend bei der Bewertung der Zuverlässigkeit von bestehender Bausubstanz genutzt werden, da tatsächliche Material- und Bauwerkseigenschaften ermittelt werden können. Die Einbeziehung der Prüfergebnisse steigert die Urteilsfähigkeit des oder der Beurteilenden und ermöglicht insgesamt realitätsnähere Bauwerksbeurteilungen.

Die wesentliche Grundlage für die Bewertung der Zuverlässigkeit eines Tragwerks sind die über das System verfügbaren Informationen. Zu bestimmten Kosten kann zusätzliches Wissen erworben werden, um eine realitätsnähere Bauwerksbeurteilung durchzuführen. In der vorgestellten Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die es erlaubt, gezielt am Bauwerk erhobene ZfP-Ergebnisse bei der Zuverlässigkeitsbewertung einzubeziehen und die Eignung von ZfP-Verfahren anhand von Anforderungen aus der statischen Berechnung an die Prüfung nachzuweisen.

Die Zuverlässigkeit von Tragwerken kann bei der Anwendung von wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden anhand von berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten beurteilt werden. Eine solche sogenannte operative Versagenswahrscheinlichkeit P_f ist keine Eigenschaft eines nachzuweisenden Bauwerks. Sie ist vielmehr ein subjektives Maß für die (Un-)Zuverlässigkeit und hängt prinzipiell von den einbezogenen Informationen über das betrachtete Tragwerk ab.

Liegt den Berechnungen ein unverzerrtes Berechnungsmodell zugrunde, strebt P_f mit einer zunehmenden Anzahl an berücksichtigten Informationen und mit steigender Qualität der einbezogenen Informationen gegen den tatsächlichen Wert von P_f. Zusätzliches relevantes Wissen kann verwendet werden, um Unsicherheiten in einer Berechnung zu reduzieren. Darüber hinaus können sich bei Untersuchungen am Bauwerk Diskrepanzen zwischen den planmäßigen oder angenommenen Soll-Eigenschaften und den tatsächlichen Ist-Eigenschaften der Bausubstanz herausstellen. Es besteht folglich die Möglichkeit, Verzerrungen in den Materialeigenschaften, den Einwirkungen oder auch den geometrischen Abmessungen zu identifizieren und zu korrigieren. In diesem Kontext spielt die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) eine wichtige Rolle, weil die Verkehrslasten fortwährend steigen und sich die zu beurteilenden Brücken häufig in einem unzufriedenstellenden Zustand befinden. Auf destruktive Eingriffe in die Bausubstanz im Zuge der Bauwerksprüfungen sollte folglich weitgehend verzichtet werden.

Das Ziel dieses Aufsatzes ist die Einführung in das Konzept der ZfP-gestützten Zuverlässigkeitsbeurteilung von bestehenden Bauwerken im Abschnitt 2, die Vorstellung einer Möglichkeit zur Validierung von ZfP-Verfahren für die Nachrechnung anhand der Genauigkeit der gemessenen Informationen (Kapitel 3) und die Demonstration der Methodik im Abschnitt 4. Die Fallstudie befasst sich mit einer Spannbetonbrücke, die hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit anhand des Nachweises der Dekompression beurteilt wird. Der Nachweis wird nach den aktuellen Bemessungsvorschriften [2] geführt und dient dem Schutz des im Beton verbauten vorgespannten Stahls vor Korrosion, indem die Rissbildung im Beton rechnerisch

ausgeschlossen wird. In einem bestimmten Bereich um die Spannglieder dürfen keine Betonzugspannungen auftreten. Für den Spannungsnachweis ist die Normalkraft infolge der Vorspannung in ein Biegemoment zu überführen. Die hierfür benötigte vertikale Position der Querspannglieder wirkt sich wesentlich auf die Zuverlässigkeit aus und kann durch Radar-Untersuchungen gemessen werden. Die in diesem Beitrag aufbereiteten Ergebnisse der an der BAM durchgeführten Forschungsarbeit finden sich ausführlich in [3].

2 Konzept der ZfP-basierten Nachrechnung

Ein Nachweis der Zuverlässigkeit von Brücken, die nicht gemäß den aktuellen Bemessungsvorschriften errichtet wurden, wird in der Praxis auf der Grundlage der Nachrechnungsrichtlinie [4–6] geführt. Üblich ist die Anwendung des semi-probabilistischen Nachweiskonzeptes, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass die Eingangsgrößen in der statischen Berechnung (wie zum Beispiel Festigkeiten oder Einwirkungen) durch deterministische Werte ausgedrückt werden. Diese entsprechen bestimmten Quantilwerten und werden über genormte Sicherheitsfaktoren, die sog. Teilsicherheitsbeiwerte, je nachdem ob es sich um eine stabilisierende oder einwirkende Größe handelt, abgemindert bzw. beaufschlagt. Auf diese Weise werden Unsicherheiten, die in der Berechnung abzudecken sind, da z. B. die zukünftigen Verkehrslasten oder Materialeigenschaften beim Neubau nicht exakt bekannt sein können, praktikabel berücksichtigt.

Im nachfolgend zusammengefassten Konzept zur ZfP-basierten Nachrechnung wird mit der sog. First Order Reliability Method (FORM) [7–9] ein probabilistisches Lösungsverfahren gewählt. Die Eingangsgrößen im Nachweis sind nun als Zufallsgrößen, die auch als Basisvariablen bezeichnet werden, zu modellieren. Ein Vorteil ist, dass die prinzipiell streuenden Messgrößen explizit über geeignete Verteilungsfunktionen in die Berechnung einfließen können. Außerdem können Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, um die maßgebenden Eingangsgrößen im statischen Nachweis zu identifizieren. Die Messung dieser Größen wird als besonders nützlich erachtet, da sie die Tragwerkszuverlässigkeit signifikant beeinflussen.

Das Konzept zur ZfP-basierten Nachrechnung ist in Abbildung 1 anhand von vier Schritten visualisiert. Der Ausgangspunkt ist die Wahl eines Grenzzustands, also eines maßgebenden bzw. interessierenden Nachweises, der geführt wird, um z. B. die Biege- oder Querkrafttragfähigkeit eines Bauwerks zu bewerten. Das mechanische Modell wird in einer Grenzzustandsgleichung g(x) formuliert und die in der Gleichung enthaltenen Variablen wie Festigkeiten, Abmessungen oder Einwirkungen werden durch stochastische Modelle beschrieben. Dabei liegen die vor etwaigen Messungen verfügbaren Informationen zugrunde, die beispielsweise den Bestandsunterlagen entstammen. Auf Basis des derart entwickelten initialen Berechnungsmodells wird eine Zuverlässigkeits- und Sensitivitätsanalyse mithilfe der FORM durchgeführt. Ein Ergebnis ist der Zuverlässigkeitsindex β, der zur näherungsweisen Bestimmung der operativen Versagens-wahrscheinlichkeit P_f zu

$$\beta = \|\boldsymbol{u}^*\| = min\{\|\boldsymbol{u}\|\} \quad \text{für} \quad \{\boldsymbol{u}: g(\boldsymbol{u}) \leq 0\} \qquad \text{Gl. 1}$$

berechnet wird. Im Kern wird der wahrscheinlichste Versagenspunkt im Standardraum $\boldsymbol{u}^*$ über Suchalgorithmen ermittelt.

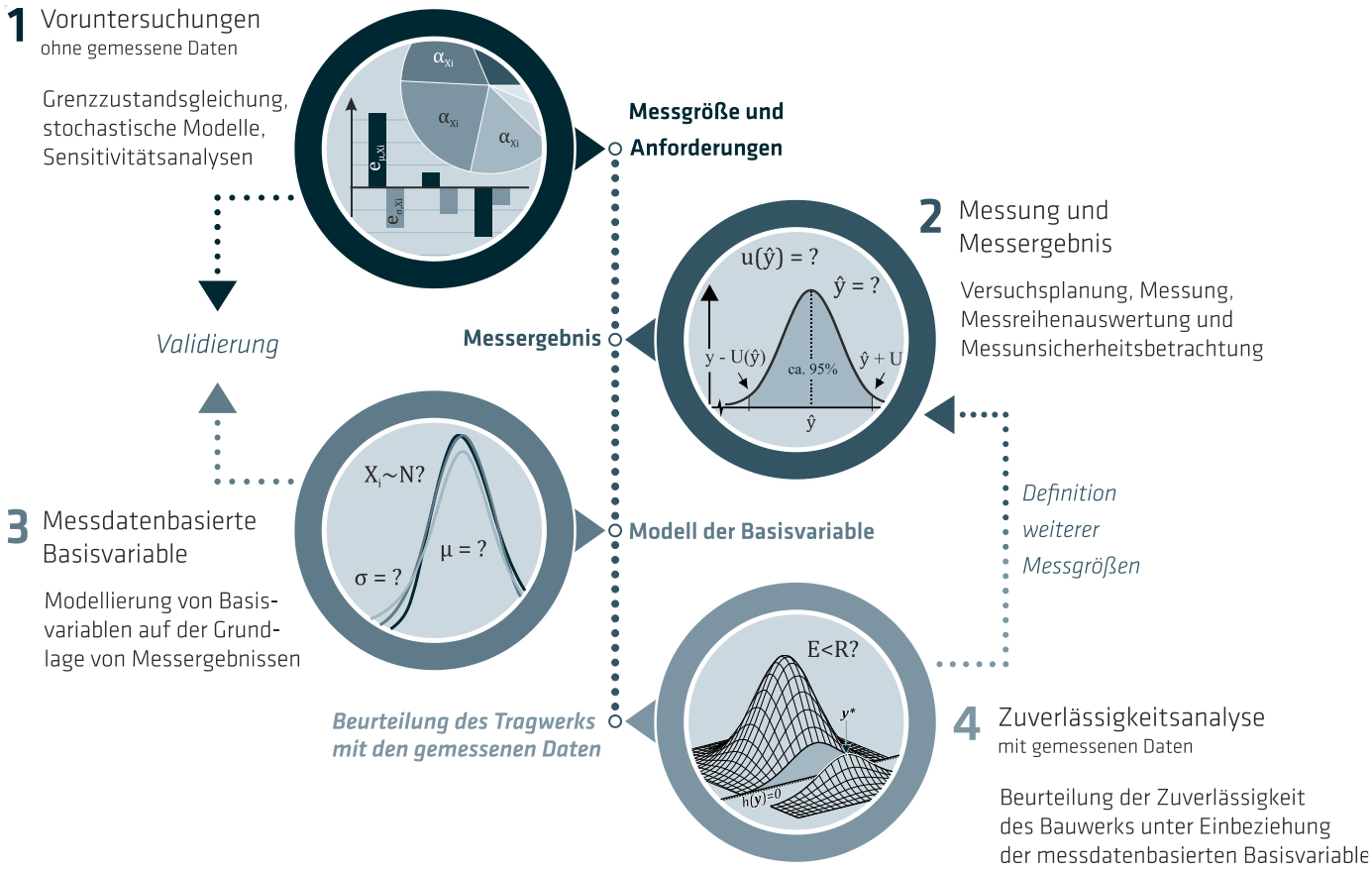

Abbildung 1: Konzept der messdatenbasierten Zuverlässigkeitsanalyse von bestehenden Bauwerken [3]

Die Versagenswahrscheinlichkeit berechnet sich dann aus

$$P_f = \int_{V_x} f_X(\boldsymbol{x})d\boldsymbol{x} = \int_{V_u} \varphi_U(\boldsymbol{u})d\boldsymbol{u} \approx \underbrace{\Phi(-\beta)}_{FORM}. \qquad \text{Gl. 2}$$

Dabei entsprechen die Integrale der multivariaten Dichtefunktionen der in der Praxis häufig nicht angewandten strengen Lösung im Original- (x) bzw. im Standardraum (u). Der rechte Term ist die Näherung gemäß FORM und beinhaltet mit Φ die Dichtefunktion der Standardnormalverteilung. Weiterführende Informationen können z. B. [10–13] entnommen werden.

Ein weiteres, für die Voruntersuchungen gleichermaßen bedeutsames Ergebnis sind die Werte der Sensitivitätsfaktoren α_i der einzelnen Basisvariablen X_i. Diese ermöglichen es, die relevanten Eingangsgrößen im individuellen Nachweis zu identifizieren. Darauf basiert die bedarfsgerechte Definition der Messgrößen und Wahl des Prüfverfahrens. Die Sensitivitätsfaktoren folgen in der Anschauung aus der partiellen Ableitung der Grenzzustandsfunktion nach den jeweiligen Basisvariablen an den Stellen der Koordinaten des wahrscheinlichsten Versagenspunktes.

Die Zuverlässigkeitsanalysen werden zusätzlich unter Variation der jeweiligen Eingangswerte wiederholt, um Funktionsverläufe der Zuverlässigkeit über bestimmte Verteilungsparameter der einzelnen Basisvariablen generieren zu können. Im Abschnitt 3 dieses Aufsatzes wird gezeigt, wie diese Funktionsverläufe zur Ableitung von Anforderungen aus dem statischen Nachweis an ein zerstörungsfreies Prüfverfahren genutzt werden können. Auf diese Weise wird die erforderliche Genauigkeit der Inspektionsergebnisse individuell spezifiziert.

Der zweite Schritt des Konzeptes gemäß Abbildung 1 umfasst die Versuchsplanung zur Messung der im ersten Schritt gezielt definierten Messgröße unter Würdigung der erforderlichen Prüfgenauigkeit, die Durchführung der Inspektionen am Bauwerk sowie die Messunsicherheitsberechnung nach den Regeln des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [14], um ein hinsichtlich dessen Qualität bewertetes und darüber hinaus vergleichbares Messergebnis zu erhalten.

In Schritt drei wird dieses Messergebnis in das stochastische Modell einer ZfP-basierten Basisvariable überführt. Dabei sind einerseits grundsätzliche Schwierigkeiten bei der Modellierung von Zufallsgrößen zu berücksichtigen, die für die Berechnung von sehr kleinen Wahrscheinlichkeiten formuliert werden [15]. Andererseits ist zu prüfen, ob neben der Messunsicherheit auch weitere Unsicherheitsarten wie statistische Unsicherheiten oder Modellierungsunsicherheiten abzudecken sind. Ferner kann die Einbeziehung von Vorinformationen z. B. dann notwendig sein, wenn die erhobenen Messdaten die interessierende Messgröße nicht vollumfänglich beschreiben können. Das Ergebnis ist eine Zufallsgröße, die auf den ZfP-Ergebnissen basiert. Die in dieser Größe abgedeckte Unsicherheit kann durch die Standardabweichung oder die Varianz beziffert und mit der erforderlichen Genauigkeit aus dem ersten Schritt verglichen werden. Wenn die erzielte Unsicherheit nicht größer ist als die maximal zulässige, kann das zur Prüfung am Bauwerk angewandte ZfP-Verfahren, wie im folgenden Abschnitt ausgeführt wird, individuell validiert werden.

Die ZfP-basierte Basisvariable fließt in die nun messdatengestützte Zuverlässigkeitsanalyse im Schritt vier ein, um eine realitätsnähere Bauwerksbeurteilung durchführen zu können. Da wiederum Sensitivitätsfaktoren berechnet werden, kann dies der Ausgangspunkt für die Definition weiterer Messgrößen sein.

3 Validierungskonzept

Das internationale Wörterbuch der Metrologie (VIM) definiert die Verifizierung als objektive Bestätigung, dass eine Betrachtungseinheit (hier ein zerstörungsfreies Prüfverfahren) bestimmte Anforderungen erfüllt [16]. Von einer Validierung wird zusätzlich gefordert, dass die formulierten Anforderungen für den jeweils „beabsichtigten Zweck angemessen sind“ [16]. Im Abschnitt 2 wurde eingeführt, dass maximal zulässige Unsicherheiten als Anforderungen an ein ZfP-Verfahren spezifiziert werden. Diese werden mit einer in der ZfP-basierten Basisvariable erzielten Unsicherheit als Maß für die Leistungsfähigkeit verglichen, um die Eignung des ZfP-Verfahrens, das vor Ort am Bauwerk angewandt wurde, individuell überprüfen zu können.

Die Anforderungen werden aus der statischen Berechnung bzw. der initialen Zuverlässigkeitsanalyse (Schritt 1 gemäß Abbildung 1) abgeleitet. Die Wahl einer maximal zulässigen Unsicherheit (MPU) zur Spezifizierung der Anforderung an ein ZfP-Verfahren wird damit begründet, dass der Wert der vor Ort zu messenden Informationen für die Beurteilenden eines Tragwerks von der Qualität dieser Information abhängt. Die Forderung bestimmter Grenzwerte für den Messwert wie einer Mindestfestigkeit wird abgegrenzt, da Inspektionen häufig erst durch die Unwissenheit über tatsächliche Eigenschaften des Tragwerks motiviert sind. Wie auch bei der Forderung einer Mindestzuverlässigkeit, die nach der Einbeziehung der Messdaten erzielt werden soll, kann selbst eine beliebig kleine Messunsicherheit für die Validierung eines ZfP-Verfahrens nicht ausreichen, wenn die gemessene Bauwerkseigenschaft zu stark und in die „ungünstige Richtung“ von der zur Spezifizierung der Anforderungen angenommenen abweicht.

Die MPU wird im Folgenden anhand von zwei Kriterien definiert. Eine triviale Forderung besteht darin, dass die Unsicherheit, die in der ZfP-gestützten Basisvariable abgebildet ist, nicht größer sein darf als die initiale Unsicherheit (bevor gemessen wurde). Außerdem wird gefordert, dass sich kleinere Fehler bei der ZfP-gestützten Modellierung der messdatenbasierten Zufallsgröße oder auch bei der Berechnung der Messunsicherheiten nicht übermäßig stark auf die ZfP-gestützte Beurteilung der Zuverlässigkeit des Bauwerks auswirken dürfen. Dieses Kriterium wird in dieser Arbeit als Robustheitskriterium bezeichnet und kann anhand der Funktionsverläufe des Zuverlässigkeitsindex über das Streuverhalten der zu messenden Basisvariable veranschaulicht werden (vgl. Abbildung 2).

Ausgehend von der Unsicherheit, die in diesem fiktiven Beispiel mit $v_x = 6{,}2\ \%$ vor der Erhebung von zusätzlichen, gemessenen Informationen in der Basisvariable berücksichtigt wurde und dem oberen Grenzwert $T_{O\ (Mind.\ \ Gleichwertigkeit)}$ entspricht, zeigt sich bei einer Reduzierung der Unsicherheit ein hier nicht weiter beziffertes, verhältnismäßig großes Gefälle im Funktionsverlauf des Zuverlässigkeitsindex β, der in der Abbildung 2 prozentual auf der Y-Achse aufgetragen ist, über das Streuverhalten v_x. Dieses Gefälle kann individuell und in Abhängigkeit vom untersuchten Bauwerk bzw. vom Grenzzustand und von den Ergebnissen aus den Voruntersuchungen begrenzt werden, um eine hinreichende Robustheit des ZfP-gestützten Modells zu fordern. Im Folgenden wird das Gefälle zur Veranschaulichung der Methodik in diesem spezifischen Fall auf einen Maximalwert von 5 % limitiert. Die Zuverlässigkeit darf sich bei einer Variation um $\Delta v_x = 1\ \%$ also nicht um mehr als 5 % ändern.

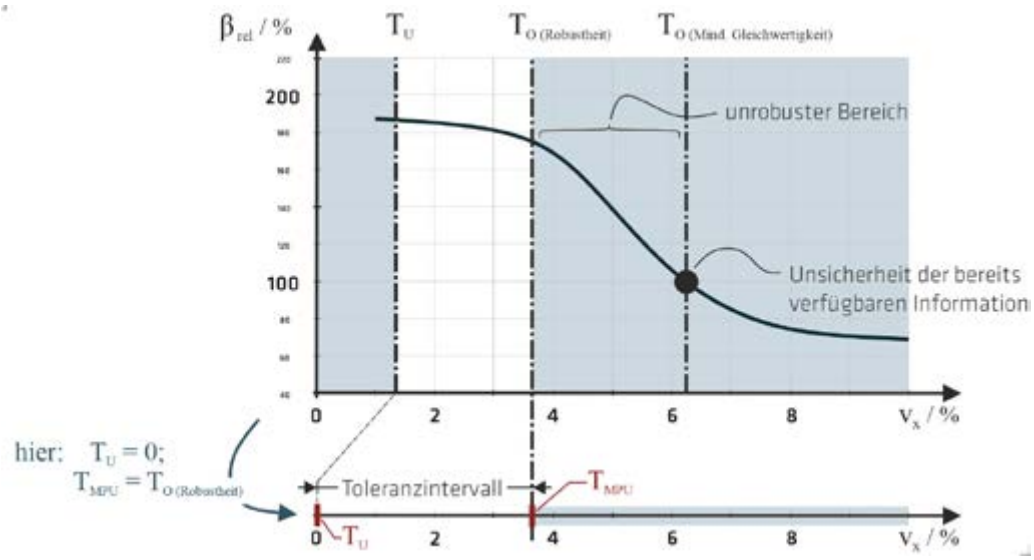

Abbildung 2: Der Zuverlässigkeitsindex als Maß für die Tragwerkszuverlässigkeit über das Streuverhalten (hier über den Variationskoeffizient) einer zu messenden (normalverteilten) Eingangsgröße im statischen Nachweis. Das Intervall, in welches die in der ZfP-gestützten Basisvariable erzielte Unsicherheit fallen darf, ist durch einen unteren Wert T_U und einen oberen Wert T_O begrenzt, wobei T_U z. B. anhand von wirtschaftlichen Kriterien definiert werden kann und sich T_O aus dem strengeren Wert der einbezogenen Kriterien ergibt. Aus [3]; Abkürzungen bearbeitet.

Die geforderte maximal zulässige Unsicherheit T_{MPU} entspricht dann dem strengeren Wert aus den jeweils herangezogenen Kriterien, hier der Robustheit und der mindestens gleichwertigen Unsicherheit. In der nachfolgenden Fallstudie wird auf diese Weise ein einseitiges Toleranzintervall festgelegt, in welches die Unsicherheit, die in der ZfP-gestützten Basisvariable abgedeckt ist und u. a. die Messunsicherheit umfasst, fallen muss, wenn das ZfP-Verfahren für die jeweilige probabilistische Beurteilung der Tragwerkszuverlässigkeit erfolgreich validiert werden soll.

4 Fallstudie

Die untersuchte vierfeldrige Spannbetonbrücke wurde im Jahr 1980 errichtet und ist in Längs- und Querrichtung vorgespannt. Sie führt eine vierspurige Bundesstraße über eine Parkanlage. Der Plattenbalkenquerschnitt weitet sich in Richtung des westlich anschließenden Kreuzungsbereiches auf. Die Gesamtlänge der Brücke beträgt etwa 96 m und die Breite ist größer als 23 m. Die Höhe der Fahrbahnplatte ist in Relation zu den Hauptträgern gering. Ein Foto der untersuchten Brücke kann Abbildung 3 und die Zeichnungen können der Abbildung 4 entnommen werden. Die nachfolgend zusammengefasste Fallstudie ist in [3, 17] ausführlich aufbereitet.

Mit dem Nachweis der Dekompression wird im Folgenden ein Spannungsnachweis betrachtet. Es wird überprüft, ob der Beton in einem bestimmten Bereich um die Spannglieder vollständig unter Druckspannungen steht. Der Nachweis ist zu führen, um die Bildung von Rissen im Beton infolge von Zugspannungen zumindest rechnerisch auszuschließen und auf diese Weise den vorgespannten Stahl vor Korrosion zu schützen [18]. Das Versagensereignis tritt ein, wenn sich Betonzugspannungen im untersuchten Bereich einstellen. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Zugspannungen entspricht dementsprechend der operativen Versagenswahrscheinlichkeit P_f. Die Berechnungen werden in Brückenquerrichtung anhand eines repräsentativen Ein-Meter-Streifens zwischen der Pfeilerachse 30 und dem Widerlager Ost (s. Abbildung 4) durchgeführt und beziehen sich auf die Querschnittsmitte, welche sich in Finite-Elemente-Berechnungen als maßgebender Querschnitt herausgestellt hat.

Abbildung 3: Die untersuchte Spannbetonbrücke [17]

Die verwendete Grenzzustandsfunktion für den Nachweis der Dekompression an der Plattenoberseite lautet:

$$g(\sigma_c) = 0 - \left(\frac{N}{A} + \frac{M}{W}\right) = 0 - \frac{\Theta_{E,N} \cdot \sum N_i}{h \cdot b} - \frac{\Theta_{E,M}(N_P \cdot z_p + \sum M_i)}{h^3 b/12} \cdot \frac{h}{2}$$

Gl. 3

Dabei sind N und M die Normalkräfte bzw. Biegemomente, A ist die Querschnittsfläche und W das Widerstandsmoment. Die $\Theta_{E,i}$ sind die Modellunsicherheiten der Beanspruchungen, N_P ist die Normalkraft infolge Vorspannung und z_p der Abstand zwischen der Schwerlinie des Querschnittes und der Spanngliedachse, wobei z_p als Funktion der Querschnittshöhe h, der Exzentrizität der Stahllitzen im Hüllrohr ϵ und des Abstands zwischen der Betonunterkante und der Hüllrohrunterkante $d_{Sp,y}$ an der Stelle y in Brückenquerrichtung geschrieben werden kann. Diese geometrische Größe $d_{Sp,y}$ wird nachfolgend betrachtet.

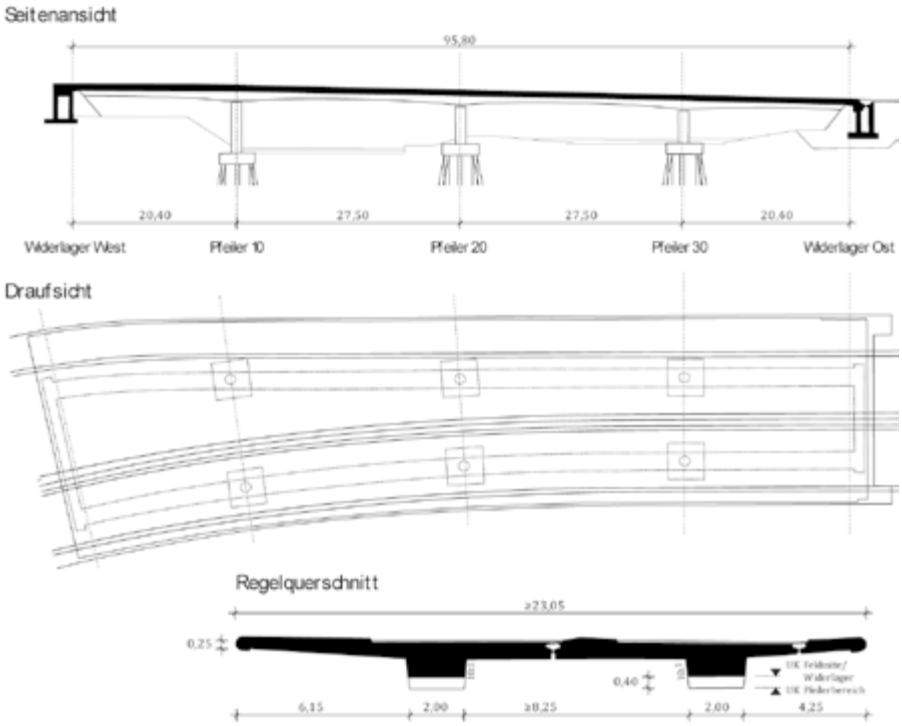

Abbildung 4: Ansichten der untersuchten Brücke und Regelquerschnitt [3] gemäß Bestandsunterlagen

Die in der Gleichung 3 enthaltenen Eingangsgrößen wurden mit Ausnahme der Querschnittsbreite b, welche konstant ist, da der Nachweis anhand eines repräsentativen Ein-Meter-Streifens geführt wird, und der vernachlässigbaren Schnittgrößenanteile, die gleichermaßen als Konstanten aufgefasst werden, als Zufallsgrößen modelliert. Die Modelle aller Basisvariablen werden in diesem Aufsatz abgegrenzt und finden sich u. a. in [17]. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die spätere Messgröße $d_{Sp,y}$ – den vertikalen Abstand zwischen der Unterkante der Fahrbahnplatte und der Unterkante des Spannglieds. Auf Basis der Bestandsunterlagen wurde vor den Messungen davon ausgegangen, dass $d_{Sp,y} \sim N(\mu = 16{,}3$ cm,$\sigma = 1$ cm) mit y ≙ Querschnittsmitte, wobei die Standardabweichung mit den Modellierungsempfehlungen in [13] übereinstimmt.

Die Basisvariable $d_{Sp,y}$ folgt also einer Normalverteilung, deren Verteilungsparameter in den Voruntersuchungen (Schritt 1 gem. Abbildung 1) sukzessive variiert und die zugehörigen Werte des Zuverlässigkeitsindex β und der Versagenswahrscheinlichkeit P_f berechnet wurden. Durch die Veränderung des Mittelwerts μ lässt sich zeigen, wie sich eine Verzerrung im stochastischen Modell, d. h. eine Diskrepanz zwischen planmäßiger (Soll-)Lage der Spannglieder und der tatsächlichen (Ist-)Lage auf die Tragwerkszuverlässigkeit auswirken würde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 (oben) dargestellt – je größer der Mittelwert, desto höher liegt das Spannglied im Querschnitt. Nachgewiesen wird hier die obere Randfaser des Querschnittes. Wird hingegen der Variationskoeffizient $V_{d_{sp,y}}$ (Abbildung 5, unten) variiert, so kann abgeleitet werden, welche Auswirkungen die Reduzierung der Unsicherheit in der Basisvariable $d_{Sp,y}$ durch die Messungen auf die Tragwerkszuverlässigkeit hätte. Diese Vorgehensweise ist zumindest bei normalverteilten Größen zulässig, da deren Verteilungsparameter voneinander unabhängig sind.

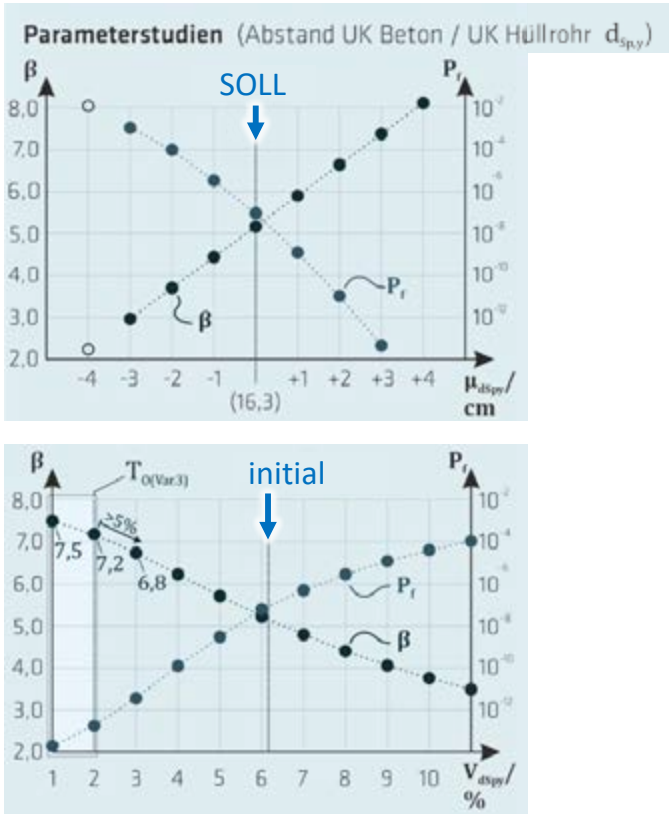

Abbildung 5: Funktionsverläufe des Zuverlässigkeitsindex β und der Versagenswahrscheinlichkeit P_f über den Erwartungswert (oben) und den Variationskoeffizienten (unten) des Abstands zwischen der Unterkante der Betonfahrbahnplatte und der Unterkante des Hüllrohrs. Entnommen aus [3], gekürzt, umstrukturiert, Beschriftung ergänzt.

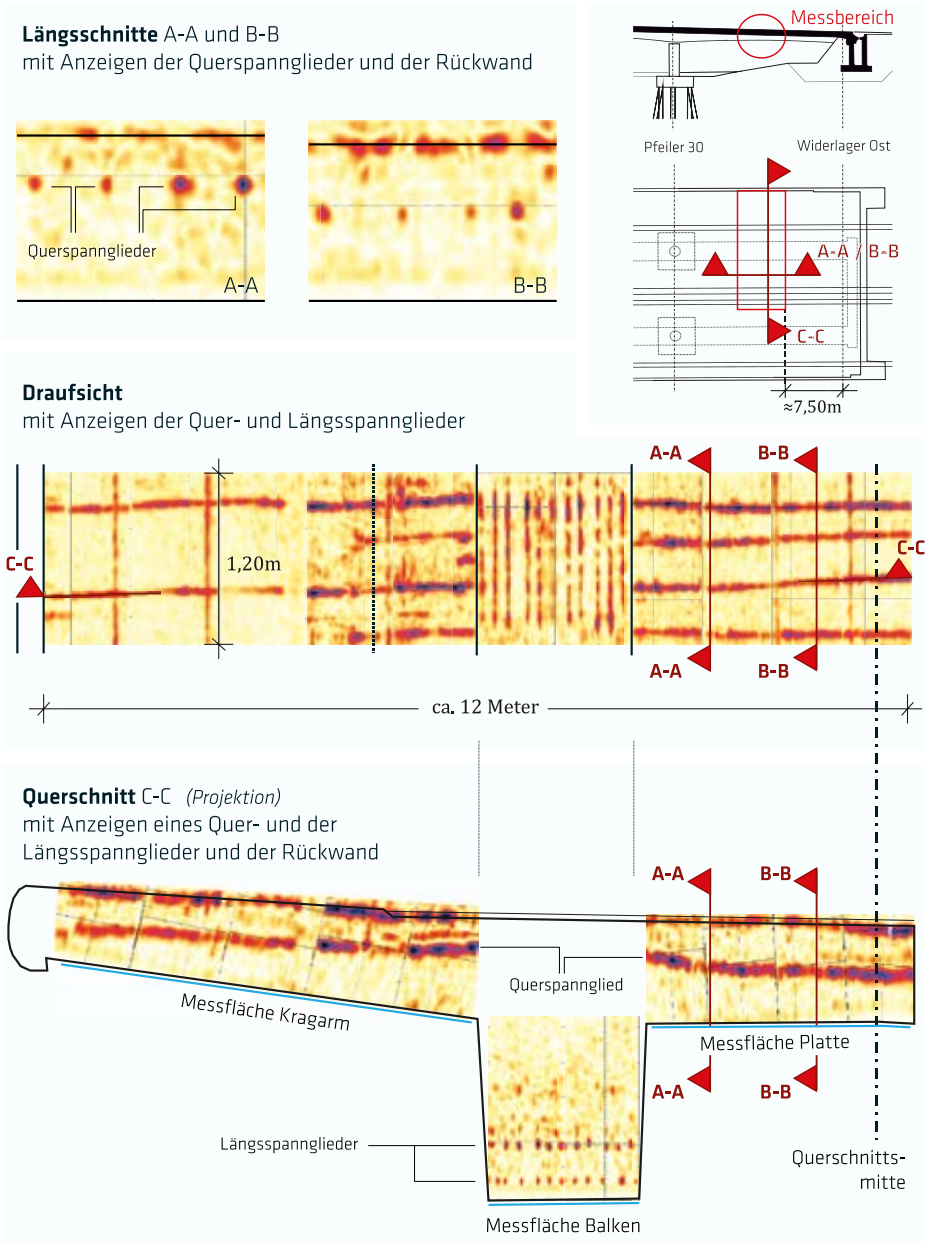

Abbildung 6: Bildgebende Darstellung der mithilfe der Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) rekonstruierten Ultraschallmessdaten [3]

Neben den Parameterstudien, die in Abbildung 5 gezeigt sind, wurden weitere Größen wie der Wert des Sensitivitätsfaktors der vertikalen Spannliedposition im untersuchten Querschnitt, der Querschnittsmitte, herangezogen. Die große stochastische Bedeutung der vertikalen Spannliedposition zeigt sich u. a. an $\alpha^2_{d_{Sp,y}} = 55\,\%$ [17]. Unter Einbeziehung der steilen Funktionsverläufe in Abbildung 5 – verlaufen die Spannglieder im untersuchten Bereich z. B. drei Zentimeter höher als angenommen, steigt die Tragwerkszuverlässigkeit um $\Delta\beta \approx +2{,}5 \approx +50\,\%$ - konnte die Spannliedlage $d_{Sp,y}$ als relevante, messbare Basisvariable identifiziert und gezielt als Messgröße definiert werden. Die Anforderungen aus der Nachrechnung der Brücke an die Genauigkeit der Inspektion folgt aus dem Robustheitskriterium (vgl. $T_{O(Var.3)}$ in Abbildung 5, unten). Die maximal zulässige Unsicherheit T_{MPU} entspricht in diesem Fall $V_{d_{sp,y}} = 2\,\%$ und wird durch den Variationskoeffizienten ausgedrückt.

Zur Bestimmung der vertikalen Spannliedposition in der Querschnittsmitte und der Spannliedverläufe wurden Georadar- und Ultraschallechomessungen von der Plattenunterseite durchgeführt. Die rekonstruierten Ultraschalldaten sind in der Abbildung 6 bildgebend dargestellt. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Radaruntersuchungen, die mit einem kommerziell erhältlichen Messsystem und einem an der BAM entwickelten Bauwerksscanner mechanisiert ausgeführt wurden. Eingesetzt wurde eine Antenne mit einer Antennenfrequenz $f = 2\ GHz$.

Um die erhobenen Messdaten bei der Zuverlässigkeitsanalyse nutzen zu können, sind die Beobachtungen in ein Messergebnis zu überführen. Hierfür werden Messunsicherheitsbetrachtungen nach den Regeln des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), vgl. Richtlinie [14] und Ergänzungen [19, 20], durchgeführt. Das Ziel ist die Berechnung eines Messwerts und einer diesem Wert beigeordneten Messunsicherheit. Die Voraussetzung für die Berechnung ist ein Modell der Messung.

Das Modell der Messung besteht im vorliegenden Fall aus einer (expliziten) Modellgleichung in der Form $Y=f(X_i)$, wobei Y die Messgröße (hier die vertikale Spanngliedlage in Querschnittsmitte) und X_i die Eingangsgrößen im Modell beschreiben. Diese beeinflussen den Ausgang der Messung (häufig ungewollt) oder sind zur Berechnung des Messergebnisses erforderlich. Bei den Radaruntersuchungen wurden Einbautiefen der Spannglieder in Bezug auf die Messfläche, die Plattenunterseite, aus Laufzeitmessungen abgeleitet. Folglich zählen zu den notwendigen Eingangsgrößen die Laufzeit und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle im Beton. Eine „störende" Eingangsgröße, die zur Unsicherheit beiträgt, ist z. B. die tiefen- und frequenzabhängige Impulsformänderung. Das verwendete Modell der Messung wurde in [3] entwickelt und wird in diesem Aufsatz nicht betrachtet. Das Ergebnis der in [3] dokumentierten Berechnungen – das Messergebnis – lautet:

$$\hat{d}_{Sp,y} = 16{,}8\ cm; u(\hat{d}_{Sp,y}) = 0{,}8\ cm.$$

Dabei ist $\hat{d}_{Sp,y}$ der (repräsentative) Messwert und $u(\hat{d}_{Sp,y})$ die kombinierte Standardmessunsicherheit, welche sich aus den einzelnen Unsicherheitsbeiträgen, die in den Eingangsgrößen modelliert sind, zusammensetzt und einer Standardabweichung entspricht. Die Annahme der Normalverteilung für die Messgröße wurde über Monte-Carlo-Simulationen überprüft [3].

Ein nach dem GUM berichtetes Messergebnis ist anschließend in das stochastische Modell einer ZfP-basierten Basisvariable zu überführen (vgl. Schritt 3 in Abbildung 1). Der Erwartungswert der normalverteilten Basisvariable, welche die vertikale Position eines repräsentativen Spannglieds beschreiben soll, entspricht dem Messwert $\hat{d}_{Sp,y}$ = 16,8 cm und die Standardabweichung der kombinierten Messunsicherheit $u(\hat{d}_{Sp,y})$=0,8 cm. Folglich ist das Messergebnis in dieser Fallstudie gleich der messdatenbasierten Basisvariable, die in die Zuverlässigkeitsanalyse mit den gemessenen Daten einfließt (Schritt 4 in Abbildung 1). In anderen Szenarien kann die zusätzliche Berücksichtigung von weiteren Unsicherheitsarten erforderlich sein. Hierzu zählen die statistische und die Modellierungsunsicherheit. Auch die Einbeziehung von Vorwissen und die Berücksichtigung von grundlegenden Problemen bei der Modellierung von Zufallsgrößen für die Berechnung von sehr kleinen Wahrscheinlichkeiten kann notwendig sein. Detaillierte Ausführungen finden sich in [3, 17].

Die Auswirkungen der Einbeziehung der ZfP-gestützten Basisvariable auf die Tragwerkszuverlässigkeit können u. a. anhand des nun messdatengestützt berechneten Zuverlässigkeitsindex β untersucht werden. In der Abbildung 7 ist dargestellt, dass einerseits die abzudeckende Unsicherheit (Variationskoeffizient auf der X-Achse) reduziert und andererseits eine (relativ kleine) Verzerrung im stochastischen Modell von $\Delta E(d_{Sp,y}) \approx$ 0,5cm korrigiert werden konnte. Im Ergebnis steigt die rechnerische Zuverlässigkeit der nachgerechneten Brücke durch die Berücksichtigung der Inspektionsergebnisse von β_{init} = 5,18 um 19 % auf β_{ZfP} = 6,18. Obwohl die Einbeziehung der ZfP-Ergebnisse eine realitätsnähere Bauwerksbeurteilung ermöglicht, konnte die Eignung des angewandten ZfP-Verfahrens infolge des strengen Robustheitskriteriums individuell nicht nachgewiesen werden. Die erzielte Unsicherheit ist mit $V_{d_{sp,y}}$ = 4,8 % größer als T_{MPU} = 2 %. Nichtsdestotrotz werden die Inspektionen auch im vorliegenden Fall als sinnvoll erachtet, da die Absicherung der Annahmen durch Messungen besonders bedeutsam ist, wenn sich kleinere Fehler in den Eingangsgrößen unverhältnismäßig stark auf das Berechnungsergebnis auswirken können.

5 Fazit

Jede Entscheidung – auch über die Zuverlässigkeit eines Bau-werks – ist mit Unsicherheiten behaftet. Durch Messungen vor Ort können Unsicherheiten reduziert werden, ohne das normativ geforderte Zuverlässigkeitsniveau einzuschränken. Das vor Ort gemessene zusätzliche Wissen spiegelt die tatsächlichen Tragwerks- und Materialeigenschaften wider. Die Einbeziehung der gemessenen Informationen bei der Nachrechnung ermöglicht realitätsnähere Bauwerksbeurteilungen, die gezieltere Planung von Maßnahmen wie Instandsetzungen, Ersatzneubauten oder auch Nutzungseinschränkungen und erlaubt folglich sowohl die Optimierung der infrastrukturellen Verfügbarkeiten als auch des Ressourcenverbrauchs und der Ressourcenverteilung.

Das in diesem Beitrag zusammengefasste Konzept der ZfP-gestützten Nachrechnung ist geeignet, um die Relevanz von messbaren Informationen abzuschätzen, Anforderungen an die zu messende Information aus der statischen Berechnung zu spezifizieren und die Qualität von gemessenen Informationen zu beziffern. Dadurch können Inspektionen bedarfsgerecht geplant und die ZfP-Ergebnisse bei der Nachrechnung genutzt werden.

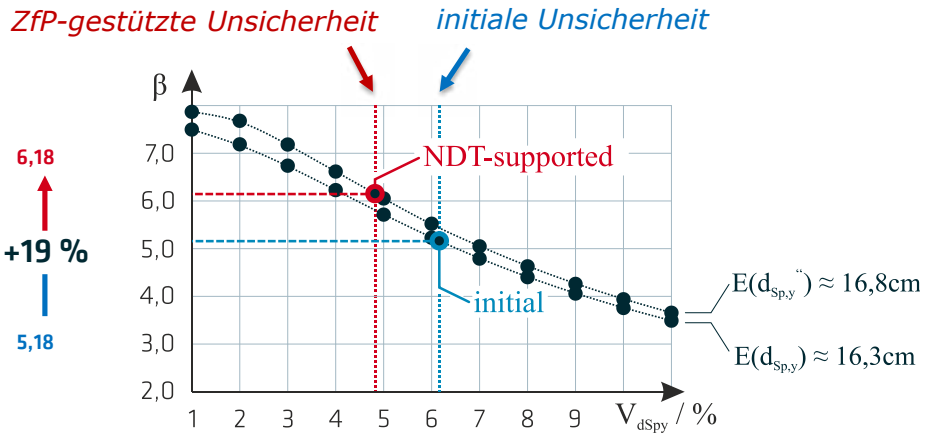

Abbildung 7: Zuverlässigkeitsindex β über das Streuverhalten des Abstands zwischen der Unterkante der Betonfahrbahnplatte und der Unterkante des Hüllrohres in Abhängigkeit des zugehörigen Erwartungswertes, wobei $E(d''_{Sp,y}) = 16{,}8\ cm$ dem Messwert entspricht.
Durch die Einbeziehung der ZfP-Ergebnisse vergrößert sich der Wert von β um +19 %. Entnommen aus [21], Beschriftungen ergänzt.

Das Konzept wurde anhand von einer Spannbetonbrücke und geometrischen Radarmessdaten, welche in einen Nachweis der Dekompression eingeflossen sind, demonstriert. Wenngleich die Abweichung zwischen der planmäßigen, angenommenen vertikalen Spanngliedposition im untersuchten Querschnitt und der tatsächlichen, gemessenen Lage gering ist, konnte das zur Nachrechnung genutzte Berechnungsmodell an die Realität angenähert werden. Die Auswirkungen auf die bereits vor der ZfP in Relation zu den Zielwerten großen Zuverlässigkeit sind zwar bereits deutlich erkennbar. Nichtsdestotrotz kann sich die ZfP-gestützte Nachrechnung dann als besonders nützlich erweisen, wenn für die Nachrechnung relevante Informationen entweder nicht vorliegen oder Zweifel an den verfügbaren Kenntnissen über das Bauwerk aufgekommen sind.

Dank

Für die Unterstützung und Begleitung dieser Forschungsarbeit danke ich dem Fachbereich 8.2 der BAM, insb. Stefan Maack, Sean Smith und Jens Wöstmann, sowie ferner Alexander Taffe, Thomas Braml und Sylvia Keßler.

Referenzen

[1] *DIN 1076:1999-11. Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. Überwachung und Prüfung.*

[2] *DIN EN 1992-2:2010-12. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln; Deutsche Fassung EN 1992-2:2005 + AC:2008.*

[3] *Küttenbaum, S.: Zur Validierung von zerstörungsfreien Messverfahren für die probabilistische Beurteilung von Bestandsbauwerken mit gemessenen Daten. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, im Druck, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, Neubiberg, 2021.*

[4] *Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2011.*

[5] *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), 1. Ergänzung. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015.*

[6] *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Abteilung Bundesfernstraßen: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), 2. Ergänzung (Entwurf, Stand 01/2020). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Abteilung Bundesfernstraßen, 2020.*

[7] *Hasofer, A. M.; Lind, N. C.: Exact and Invariant Second-Moment Code Format. Journal of the Engineering Mechanics Division 1974 (1974), Heft 100, S. 111–121.*

[8] *Rackwitz, R.; Fiessler, B.: Structural reliability under combined random load sequences. Computers & Structures 9 (1978), Heft 5, S. 489–494.*

[9] *Hohenbichler, M.; Rackwitz, R.: Non-Normal Dependent Vectors in Structural Safety. Journal of the Engineering Mechanics Division 107 (1981), EM6, S. 1227–1238.*

[10] *Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Springer Wien, Wien, 2013.*

[11] *Rackwitz, R.; Zilch, K.: Zuverlässigkeit von Tragwerken. In: Zilch, K.; Diederichs, C. J.; Katzenbach, R. et al. (Hrsg.): Handbuch für Bauingenieure. Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit, S. 337–378. Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2012.*

[12] *Diamantidis, D. (Hrsg.): Probabilistic assessment of existing structures. A publication of the Joint Committee on Structural Safety (JCSS). RILEM report, Heft 32. RILEM Publications, Cachan, 2001.*

[13] *JCSS: Probabilistic Model Code. Part 1-3. Joint Committee on Structural Safety, Zurich, 2001/2002.*

[14] *JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement.*

[15] *Kiureghian, A. D.; Ditlevsen, O.: Aleatory or epistemic? Does it matter? Structural Safety 31 (2009), Heft 2, S. 105–112.*

[16] *Brinkmann, B.; Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Internationales Wörterbuch der Metrologie. Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) Deutsch-Englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007. Beuth Wissen. Beuth Verlag GmbH, s.l., 2012.*

[17] *Küttenbaum, S.; Braml, T.; Taffe, A. et al.: Reliability assessment of existing structures using results of nondestructive testing. Structural Concrete (2021).*

[18] *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2). DAfStb-Heft, Heft 600. Beuth, Berlin, 2012.*

[19] *JCGM 102:2011. Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Extension to any number of output quantities.*

[20] *JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" — Propagation of distributions using a Monte Carlo method.*

[21] *Küttenbaum, S.; Braml, T.; Taffe, A. et al.: From Uncertainty in Measurement to Certainty in Bridge Reassessment. Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures – EUROSTRUCT2021. 29.08.2021 - 01.09.2021 at University of Padova, Italy in print (2021).*

Der Autor

Stefan Küttenbaum ist Bauingenieur und seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der BAM. Zuvor war er im Bauprojektmanagement bei der Deutschen Bahn tätig. Sein aktueller Forschungsschwerpunkt liegt auf der messdatenbasierten Beurteilung der Zuverlässigkeit von bestehender Bausubstanz.