

# Nutzung der Ergebnisse zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen (ZfP-Bau) zum statischen Nachweis von Brücken im Bestand

Dr.-Ing. Thomas BRAML\*, Dr.-Ing. Karl MORGEN\*\*

\*HFR Ingenieure GmbH, München,  
\*\* WTM ENGINEERS GmbH, Hamburg

**Kurzfassung.** Der Vorteil bei der Bewertung von bestehenden Bauwerken besteht darin, dass Informationen wie Baustoffkennwerte, Geometrie, Spanngliedverläufe etc. direkt am Bauwerk gemessen werden können. Besonders probabilistische Berechnungsverfahren nutzen große Potenziale, die aus zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen (ZfP-Bau) statistisch ausgewerteten Ergebnisse direkt in die Berechnung einfließen zu lassen, da die maßgebenden Basisvariablen für Einwirkungen und Widerstände der Grenzzustandsfunktionen jeweils mit einem stochastischen Modell abgebildet werden. Eine realistische Bewertung des Zuverlässigkeitsniveaus ist dann möglich. Zudem können durch eine vorgeschaltete Sensitivitätsanalyse die maßgebenden Parameter am Bauwerk bestimmt werden, so dass ZfP-Bau Verfahren zielgerichtet eingesetzt werden können.

Die zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen haben in letzter Zeit zunehmend an Bedeutung gewonnen und können immer wirtschaftlicher eingesetzt werden. Wichtig ist dabei die Gütebewertung für die qualitativen und quantitativen Prüfaufgaben, so dass stochastische Modelle zur Verfügung gestellt werden können die alle Unsicherheiten enthalten. Dazu stellt der GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) zusammen mit der POD(a) Analyse eine Methodik zur Verfügung.

Der Beitrag stellt einen Vorschlag für eine praktikable Vorgehensweise für die Nutzung von ZfP-Bau Ergebnissen bei der Bewertung von bestehenden Brückenbauwerken vor und zeigt die Vorteile an einem Anwendungsbeispiel.

## 1. Probabilistische Berechnungen

### 1.1 Grundlagen

Probabilistische Methoden ermöglichen im Gegensatz zu den deterministischen und semi-probabilistischen Berechnungsmethoden die direkte Ermittlung der rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks oder Bauteils u. a. auf der Grundlage der tatsächlichen Materialeigenschaften sowie der lokalen Belastungssituation. Die Unsicherheiten und die Streuungen der maßgebenden Variablen auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite werden dadurch auf das Einzelbauwerk bezogen reduziert und dieses kann auf der Grundlage der tatsächlich vorhandenen Eigenschaften beurteilt werden. Die Veröffentlichungen des Joint Committee on Structural Safety, [1] und [2], geben dabei die Grundlagen für eine probabilistische Berechnung an die Hand.



Die Zuverlässigkeit eines Tragwerks wird grundsätzlich als Komplement zur Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  definiert. Die allgemeine Grenzzustandsfunktion ergibt sich zu:

$$g(R,E) = R - E \quad (1)$$

Das Versagen tritt ein, wenn die Einwirkung  $E$  größer wird als der Widerstand  $R$ . Im Allgemeinen sind dabei  $R$  und  $E$  Zufallsvariablen, die durch eine statistische Verteilung beschrieben werden.

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  kann dann mit:

$$p_f = p(g < 0) \quad (2)$$

und die Zuverlässigkeit  $p_s$  mit

$$p_s = 1 - p_f \quad (3)$$

berechnet werden.

Im konstruktiven Ingenieurbau ist der Sicherheitsindex  $\beta$  ein Maß für die Zuverlässigkeit eines Bauteils, der als sogenannter „verallgemeinerter Sicherheitsindex“ [3] eingeführt wird.

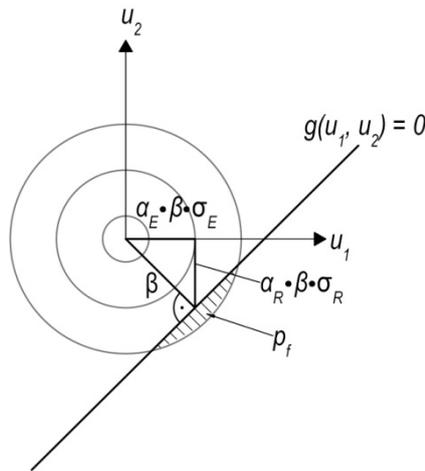
$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) = \Phi^{-1}(1 - p_f) \quad (4)$$

Strenge Lösungen für  $\beta$  existieren nur, wenn es sich um eine lineare Grenzzustandsfunktion handelt und die beiden Basisvariablen  $R$  und  $E$  normalverteilt oder logarithmisch normalverteilt sind. Ist dies, so wie in den meisten Fällen, nicht der Fall, dann wird auf Näherungsverfahren wie z. B. die Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung (FORM) sowie die Zuverlässigkeitstheorie 2. Ordnung (SORM) zurückgegriffen. Die Grundlagen hierfür sowie weitere Verfahren sind in [3] übersichtlich dargestellt. Die Zielzuverlässigkeiten sind in der DIN EN 1990 [4] angegeben. In Deutschland wurden die Teilsicherheitsbeiwerte des semi – probabilistischen Sicherheitskonzepts für die Schadensfolgeklasse CC 2 kalibriert. Eine Unterscheidung in unterschiedliche Lastklassen ist nicht vorgesehen. Dies ist durch die Anforderungen an den Brandschutz und durch die Prüfung der statisch konstruktiven Unterlagen, in Deutschland durch das 4-Augen Prinzip, d. h. die Prüfung der statisch – konstruktiven Berechnung durch einen Prüfingenieur, gerechtfertigt.

## 1.2 Wichtungsfaktoren und Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse zeigt im Rahmen einer probabilistischen Berechnung den quantitativen Einfluss der einzelnen Basisvariablen der Grenzzustandsfunktion auf die Zuverlässigkeit des Bauwerks. Dieser Einfluss wird direkt durch die Wichtungsfaktoren  $\alpha$  angegeben. Die einzelnen Werte geben dabei an, welches „Gewicht“ der Basisvariable am definierten Grenzzustand zukommt. Sie beschreiben dabei die Lage des Bemessungspunktes d. h. des wahrscheinlichsten Versagenspunktes. Das Bild 1 zeigt die Definition der Wichtungsfaktoren im standardisierten Raum, wobei mit  $\alpha_E$  die Wichtungsfaktoren für die Einwirkungen und mit  $\alpha_R$  die für die Widerstände bezeichnet werden. Mit  $\sigma$  ist die Standardabweichung der jeweiligen Verteilungsfunktion und mit  $u$  ist das Koordinatensystem im standardisierten Raum bezeichnet. Die Wichtungsfaktoren hängen

neben dem Verhältnis der Streuungen der Basisvariablen untereinander, auch von deren funktionalen Zusammenhang und damit der so genannten Grenzzustandsfunktion ab. Weitere Einzelheiten können aus [3] entnommen werden.



**Abb. 1.** Definition der Wichtungsfaktoren im standardisierten Raum

In Bild 5 dieses Beitrages sind die Ergebnisse einer solchen Sensitivitätsanalyse für den Grenzzustand der Biegetragfähigkeit am Beispiel eines Brückenbauwerks dargestellt.

## 2. Möglichkeiten und Gütebewertung ZfP-Bau

Folgende Fragestellungen können grundsätzlich unter anderem mithilfe der ZfP-Bau beantwortet werden:

- Ermittlung der Bauteildicke zur Bestimmung des Eigengewichts
- Messung der Betondeckung tiefer liegender Bewehrung
- Ermittlung der lateralen Lage und Tiefenlage von Spanngliedern zur Bestimmung des inneren Hebelarms
- Spanndrahtbrüche von vorgespannten metallischen Einbauteilen
- Fehlstellen z.B. in Form von Kiesnestern oder Hohlstellen

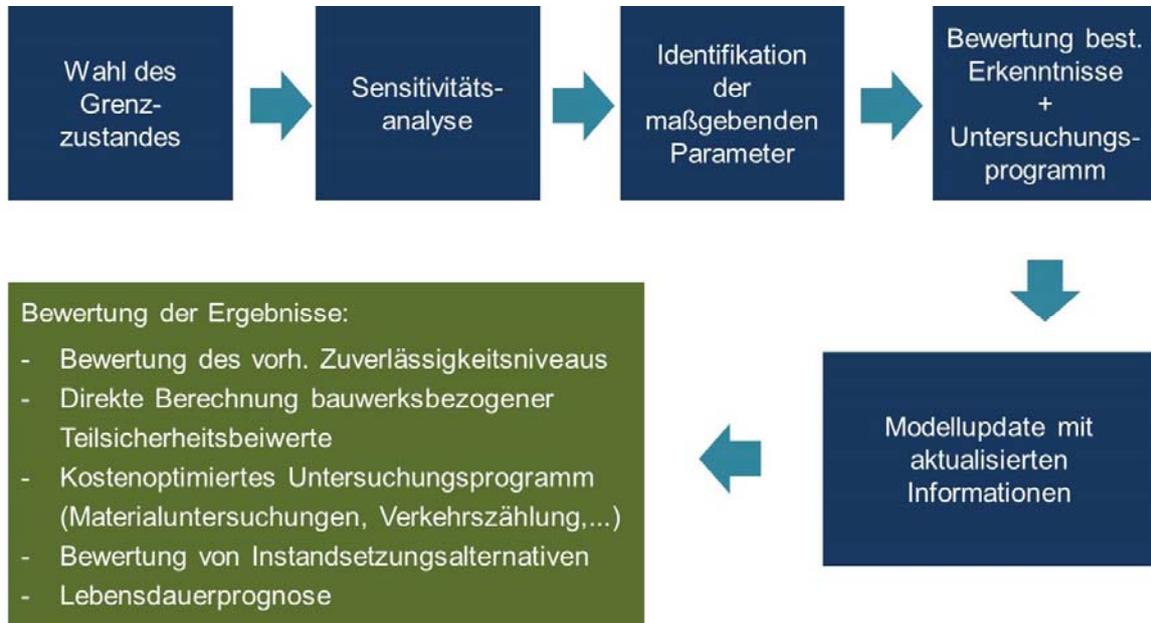
Die Stärken und Grenzen der gängigen Verfahren Radar, Ultraschallecho, Impakt-Echo und Wirbelstrom (Betondeckungsmessung) können [5] entnommen werden.

Die oben genannten Fragestellungen können in qualitative und quantitative Fragestellungen eingeteilt werden. Besteht das Ergebnis aus einem Zahlenwert mit zugehöriger Messunsicherheit, handelt es sich um eine quantitative Fragestellung. Soll die Frage beantwortet werden, ob ein Objekt oder ein Zustand (wie beispielsweise Korrosion) vorhanden ist (ja oder nein), liegt eine qualitative Fragestellung vor.

In [6] wird ausführlich dargestellt wie die Gütebewertung von ZfP-Ergebnissen mit Hilfe des GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) sowie einer POD(a) – Analyse erfolgen kann. Die am Bauwerk gemessenen und anschließend aufbereiteten Ergebnisse können in Form von stochastischen Modellen mit Mittelwert und Standardabweichung der zugrunde gelegten Verteilungsfunktion direkt in eine probabilistische Berechnung eingehen.

### 3. Vorschlag für eine praktikable Vorgehensweise

Das Bild 2 zeigt einen Vorschlag für eine praktische Vorgehensweise bei der Bewertung bestehender Bauwerke mit probabilistischen Berechnungsmethoden.



**Abb. 2.** Praktikables Vorgehen bei der probabilistischen Bewertung bestehender Bauwerke

Nach der Wahl des zu betrachtenden Grenzzustandes können mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse die für die Zuverlässigkeit maßgebenden Parameter am Bauwerk identifiziert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse von den Vorinformationen beeinflusst werden, d. h. größere Unsicherheiten in der Basisvariable schaffen eine größere Bedeutung in der Strukturantwort. Auf dieser Grundlage können nun bestehende Dokumente und Unterlagen, z. B. vorhandene Untersuchungsberichte aus der Bauwerksprüfung, ausgewertet werden oder es können zusätzliche Untersuchungen zielsicher initiiert werden. Da die maßgebenden Parameter bekannt sind, kann zudem im Vorfeld durch „fiktives“ Modellupdate nachvollzogen werden, welchen Einfluss die Eingrenzung von Unsicherheiten auf das Zuverlässigkeitsniveau des Bauwerks hat.

ZfP-Bau Verfahren können nun zielgerichtet und wirtschaftlich zur Bestimmung der maßgeblichen Parameter am Bauwerk eingesetzt werden. Liegen nach Untersuchungen neue Erkenntnisse vor, so können die Basisvariablen und das zugrunde gelegte stochastische Modell im Rahmen eines Modellupdates präzisiert und damit den aktuellen Verhältnissen angepasst werden. Die aus den ZfP-Bau gewonnen und aufbereiteten Ergebnisse können direkt in die probabilistische Berechnung eingehen. In dieses Modellupdate werden auch beobachtete oder befürchtete Schäden miteinbezogen.

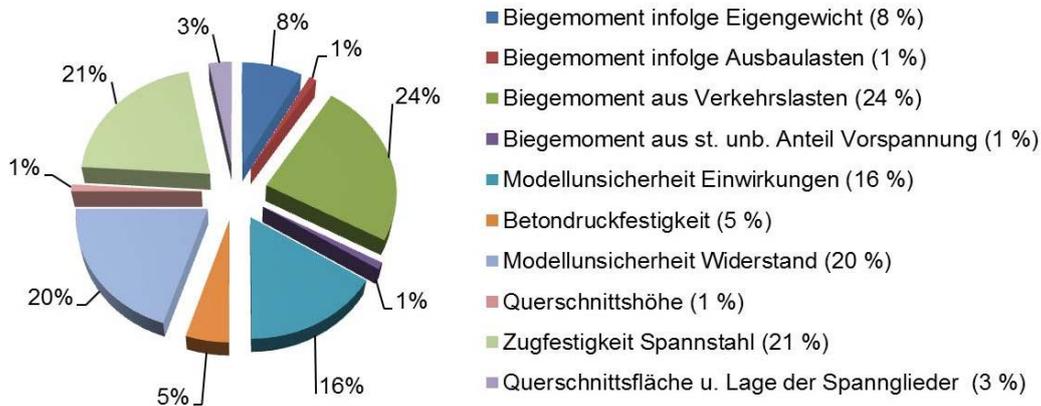
Nach einem erneuten Rechenlauf kann dann die abschließende Bewertung der Ergebnisse erfolgen. Dies umfasst vor allem die Beurteilung des errechneten Zuverlässigkeitsniveaus. Auch die Ermittlung auf das einzelne Bauwerk bezogener Teilsicherheitsbeiwerte erscheint hier möglich. Diese können im Rahmen von semi – probabilistischen Tragwerksberechnungen genutzt werden. Werden zur weiteren Erfassung des Bauwerkszustandes zusätzliche Monitoringsysteme in Betracht gezogen, so können diese in Kenntnis der für die Zuverlässigkeit maßgebenden Parameter zielgerichtet vorbereitet und umgesetzt werden. Außerdem können in Betracht zu ziehende Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen in ihrer Auswirkung auf die Bauwerkszuverlässigkeit und die Lebensdauer prognostiziert werden.



### Bewertung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

In Bild 5 ist das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse auf der Grundlage der Grenzzustandsgleichungen für die Biegetragfähigkeit dargestellt.

Die prozentualen Angaben bezeichnen den Anteil der jeweiligen Basisvariablen an der Zuverlässigkeit des Bauwerks der sich aus den Sensitivitätsfaktoren ergibt. Diese sind neben dem Verhältnis der Streuungen der Basisvariablen untereinander auch von deren funktionalem Zusammenhang und damit von der Grenzzustandsfunktion abhängig.



**Abb. 5.** Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Grenzzustand Biegung Stützquerschnitt

Im vorliegenden Beispiel zeigt sich deutlich, dass die Verkehrslasten sowie die Modellunsicherheiten auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite einen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Bauwerks haben. Im Bereich der Biegebeanspruchung spielt auch die Zugfestigkeit des Spannstahls erwartungsgemäß eine große Rolle.

Ein für das betrachtete Bauwerk zu empfehlendes Untersuchungsprogramm sollte sich deshalb vor allem auf die oben genannten maßgeblichen Einflussparameter richten. Die bauwerksbezogene Tabelle 1 zeigt einen Auszug der Möglichkeiten, die bisher gewählten stochastischen Modelle durch weitere Untersuchungen zu aktualisieren und die Unsicherheiten der oben genannten Basisvariablen einzugrenzen.

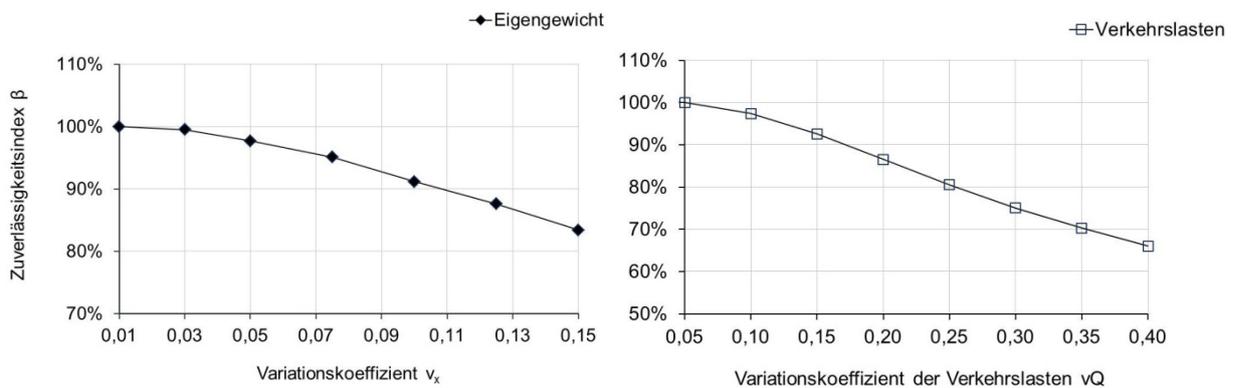
**Tabelle 1.** Auswertung der Sensitivitätsanalysen (Auszug)

Basisvariable	Möglichkeiten (Auszug) für die Anpassung der stochastischen Eigenschaften der jeweiligen Basisvariablen
Konstruktionseigengewicht	Tatsächliche Bauteilabmessungen, Bestandspläne
Geometrie, Lage und Anzahl der Spannglieder, Lage der Betonstahlbewehrung	Einsatz ZfP-Bau
Verkehrslasten	Nutzung der DTV-SV Werte (Verkehrszählung); Variationskoeffizienten, Monitoring
Modellunsicherheit Einwirkung	Anpassung möglich (sehr genaue Ermittlung der Einwirkungen, Rechenmodell)
Modellunsicherheit Widerstand	Anpassung möglich bei klarem mechanischen Modell (Biegetragfähigkeit vs. Querkrafttragfähigkeit)
Materialparameter	Stahlzugfestigkeiten, Betondruckfestigkeiten; Festlegung des Umfangs der Untersuchungen

Aus wirtschaftlichen Gründen kann für eine Kosten - / Nutzenanalyse eine Berechnung des Zuverlässigkeitsniveaus mit angepassten stochastischen Modellen für die Basisvariablen im Rahmen eines „fiktiven“ Modellupdates erfolgen. Das Bild 6 zeigt die

Auswirkungen angepasster Variationskoeffizienten auf den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  beispielhaft für die Einwirkungen infolge Eigengewicht und Verkehrslasten. Der Variationskoeffizient für die Geometrieabmessungen des Bauwerks kann durch Messungen am Bauwerk bestimmt werden. Insbesondere bei großen Querschnittshöhen, wie im betrachteten Fall, hat dies einen erheblichen Einfluss auf das Zuverlässigkeitsniveau. Im Falle der Verkehrslasten können die Unsicherheiten und Streuungen durch Erhebung des Verkehrs mit Monitoringverfahren oder durch verkehrliche Nutzungseinschränkungen siehe [1] reduziert werden.

Liegen zudem die Bestandspläne für das Bauwerk vor, so kann weiterhin die Unsicherheit der Wichte des Stahlbetons reduziert werden, da sich der Bewehrungsgehalt aus den Unterlagen und damit die genaue Wichte der Bauteile bestimmen lässt.



**Abb. 6.** Darstellung des Einflusses des Variationskoeffizienten des Eigengewichts (links) und der Verkehrslasten (rechts) auf den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$

Es zeigt sich dabei deutlich, welchen Nutzen zusätzliche Untersuchungen, z. B. ZiP-Bau, für die Eingrenzung der Unsicherheiten der jeweiligen Basisvariable auf das Zuverlässigkeitsniveau haben.

Für das vorhandene Bauwerk liegen derzeit lediglich die Höhenaufnahmen sowie die Bestandspläne für den Überbau vor, so dass im Rahmen der probabilistischen Berechnungen nur die Modellparameter für die Geometrie sowie für die Stahlbetonwichte aktualisiert werden konnten.

Um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Stufen der Nachrechnungsrichtlinie durchführen zu können werden in der nachfolgenden Tabelle die Ausnutzungsgrade der Biegetragfähigkeit und der Querkrafttragfähigkeit gegenübergestellt.

**Tabelle 2.** Vergleich der Nachrechnungsergebnisse anhand des Ausnutzungsgrades

Nachrechnungsrichtlinie	Lastmodell	Norm	Ausnutzungsgrad	
			Biegung	Querkraft
<b>Stufe 1</b>	LM 1	DIN – FB 102	1,03	1,76
<b>Stufe 2</b>	LM 1	DIN – FB 102 ( $\gamma_G = 1,20$ )	-	1,44
<b>Stufe 2</b>	BK 60	DIN – FB 102 ( $\gamma_G = 1,20$ )	-	1,41
<b>Stufe 2</b>	BK 60	DIN 4227 - Ausg. 1988	-	1,22
<b>Stufe 4</b>	LM 1	Grenzzustandsfunktion gem. DIN Fachbericht	1,00 (50 Jahre)	1,28 (50 Jahre)
<b>Stufe 4</b>	LM 1	Grenzzustandsfunktion gem. DIN Fachbericht (Modifikation Eigengewicht $v_h = v_b = 0,02$ ; $v_{G1} = 0,03$ )	0,93 (50 Jahre)	1,15 (50 Jahre)

Allein durch die Eingrenzung der Unsicherheiten der Bauwerkshöhe können im Zuge der probabilistischen Betrachtungen Sicherheitsreserven mobilisiert werden. Das primäre Ergebnis einer probabilistischen Berechnung ist eine Versagenswahrscheinlichkeit bzw. ein Zuverlässigkeitsindex. Die Benennung von Ausnutzungsgraden ist bei dieser Methode eher unüblich. In Tabelle 2 wurde sie gewählt um eine Vergleichbarkeit zu deterministischen und semi-probabilistischen Berechnungsverfahren herzustellen. Der als Ergebnis der probabilistischen Berechnung in Tabelle 4 benannte Ausnutzungsgrad bezieht sich auf Zuverlässigkeitsklasse RC 2 gemäß DIN EN 1990 [4].

Im vorliegenden Beispiel wurde unterstellt, dass die Lage der Spannglieder den Angaben in den Bestandsunterlagen entspricht.

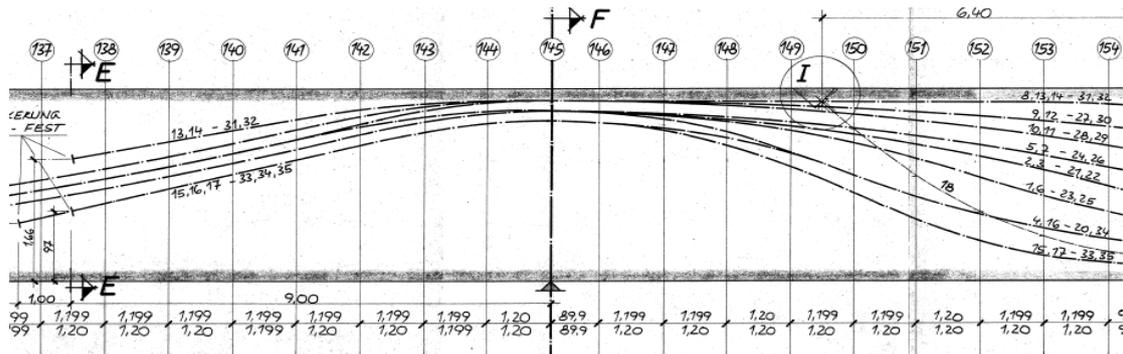


Abb. 7. Lage der Spannglieder im Längsschnitt gemäß den Angaben in den Bestandsplänen

Bei der Betrachtung der Anteile der Sensitivitätsanalyse erscheint es zunächst so, als würde eine genauere Kenntnis geometrischer Größen (z. B. Querschnittshöhe, Hebelarm, Lage der Spannglieder) und der Querschnittsfläche eine untergeordnete Rolle spielen. Das ist jedoch nur der Fall, wenn die Konstruktion genau wie in den Bestandsplänen ausgeführt ist und die angenommenen Abweichungen sich in einem sehr geringen Toleranzmaß bewegen. Treten dagegen deutlich größere Abweichungen, z. B. des tatsächlichen Spanngliederverlaufs zum angenommenen Verlauf auf, oder treten Zweifel am Vorhandensein aller angenommenen Spannglieder auf, werden diese Anteile der Sensitivitätsanalyse deutlich größer.

Mit ZfP-Bau Verfahren kann die tatsächliche Lage der Spannglieder festgestellt werden. Die nachfolgenden Bilder Nr. 8 und 9 zeigen den Einfluss einer abweichenden Lage der Spannglieder ( $d_{sp}$  = Abstand der Spannglieder vom Querschnittsrand;  $M_{vp}$  = Biegemoment infolge Vorspannung) auf den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$ .

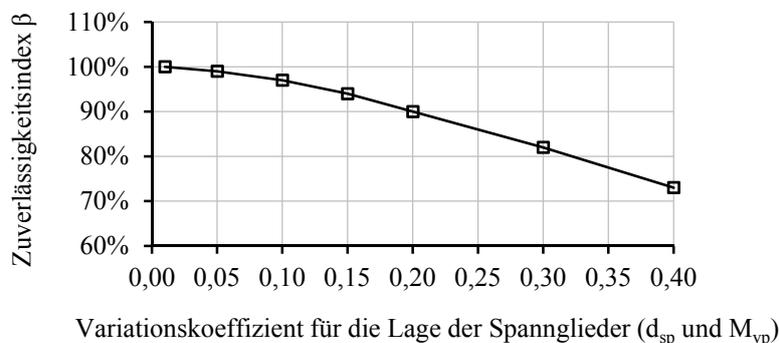
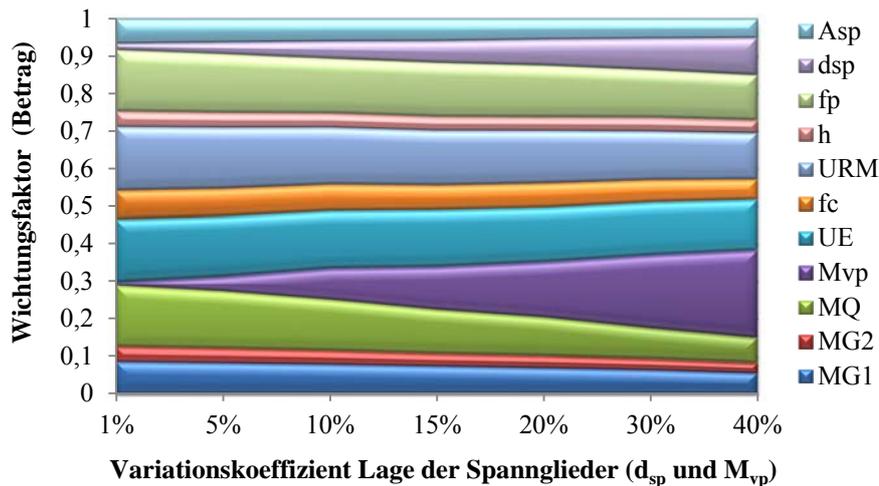


Abb. 8. Einfluss der Größe des Variationskoeffizienten für die Lage der Spannglieder auf den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$



**Abb. 9.** Einfluss der Größe des Variationskoeffizienten für die Lage der Spannglieder auf die Wichtungsfaktoren

## 5. Ausblick

Für eine ganzheitliche Bewertung des Zustandes bestehender Bauwerke stellt eine probabilistische Berechnung neben einer Bauwerksprüfung, einer objektbezogenen Schadensanalyse und einer Nachrechnung gemäß der neuen Nachrechnungsrichtlinie [9] einen wichtigen Baustein dar.

Für die realitätsnahe Bewertung ist insbesondere die unmittelbare Anpassung der stochastischen Modelle der einzelnen Basisvariablen an die tatsächlich vorhandenen Bauwerkseigenschaften und an die lokale Belastungssituation von wesentlicher Bedeutung. Deshalb sind die probabilistischen Methoden in ihrer Aussagekraft unmittelbar an die Qualität der zur Verfügung stehenden Mess- und Monitoringverfahren angebunden. Der Fortentwicklung dieser Untersuchungsverfahren kommt deshalb wesentliche Bedeutung zu. Zur Abgrenzung des Versuchs- und Messprogramms in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht liefert eine vorgeschaltete Sensitivitätsanalyse wichtige Hinweise.

Mit den Methoden des GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) sowie einer POD(a) – Analyse können die Ergebnisse aus ZfP-Bau Verfahren so aufbereitet werden, dass Sie direkt in probabilistische Berechnung eingesetzt werden können. Eine realitätsnahe Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Brücken wird dadurch möglich.

## Literatur

- [1] Joint Committee on Structural Safety (JCSS): Probabilistic Model Code 12<sup>th</sup> draft. <http://www.jcss.ethz.ch>, 17.05.2002.
- [2] Joint Committee on Structural Safety (JCSS), Probabilistic Assessment of Existing Structures, RILEM Publications S.A.R.L, January 2001
- [3] Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen . Springer – Verlag, Berlin 1992.
- [4] DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, Europäisches Komitee für Normungen, Brüssel. Dezember, 2010.
- [5] Taffe, A., Wiggenhauser, H. und M. Raupach: Validierung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen, Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 12, S. 828-836, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2008.
- [6] Taffe, A., Feistkorn, S.: Methoden zur Gütebewertung von ZfPBau-Verfahren, Beton – und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 4, S. 237-251, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2013.

- [7] Reliability Consulting Programs (RCP) 2004. STRUREL, a Structural Reliability Analysis Program-System, COMREL & SYSREL, STATREL: User's Manual. Munich: RCP Consult.
- [8] Braml, Th.: Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse von Überprüfungen am Bauwerk. Dissertation. Universität der Bundeswehr München. Fortschritt – Bericht VDI Reihe 4 Nr. 214. ISBN 978-3-18-321404-4. VDI – Verlag, Düsseldorf. 2010.
- [9] Nachrechnungsrichtlinie: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – Abteilung Straßenbau. Ausgabe 05/2011.