

Zur Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes für Eigenlasten bei Bestandsbrücken

Jens Löschmann^{1*}, Peter Mark¹

¹Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Massivbau, Bochum

Kurzfassung

Ein Großteil der Bestandsbrücken stammt aus den 1960er und 70er Jahren und wurde dementsprechend nicht nach den derzeit gültigen Normen, Lastmodellen und Konstruktionsregeln bemessen und entworfen. Der Erhaltungszustand vieler Brücken ist kritisch, sodass für eine wirtschaftliche und ressourcenschonende Nachrechnung sämtliche Tragfähigkeitsreserven zu mobilisieren sind. Dabei kann die Beseitigung oder zumindest die Begrenzung von Streuungsunsicherheiten des Eigengewichts durch Messungen - aufgrund seines erheblichen Anteils an der Gesamtlast bei Großbrücken - einen wichtigen Beitrag leisten. Bei strikter Anwendung des aktuellen Nachweis- und Sicherheitskonzeptes für Neubauten ergeben sich hingegen unwirtschaftliche Tragfähigkeitsbewertungen und Defizite.

Der Beitrag zeigt Möglichkeiten zur Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes für Eigenlasten bei präziser Kenntnis der Bestandsgeometrie auf. Dazu sind Brücken detailliert - z.B. mittels 3D-Laserscanning - aufzumessen. Die geometrischen Messdaten können mit empirischen Literaturdaten für die Streuung der Wichte kombiniert und ein bauwerksspezifischer Teilsicherheitsbeiwert abgeleitet werden. Das Vorgehen wird am Beispiel einer Straßenbrücke demonstriert, die in Kooperation mit dem Vermessungs- und Katasteramt der Landeshauptstadt Düsseldorf mittels stationärem und mobilen Laserscans sowie photogrammetrischen Aufnahmen aus Multikopterüberflügen vermessen und automatisiert in ein digitales Modell überführt wurde. Aus dem Geometriemodell sind tatsächliche Brückenabmessungen dauerhaft abrufbar, sodass sich neben der Anwendung in der Nachrechnung ein Mehrwert bei Nutzung des Modells zur Bauwerksunterhaltung ergibt. Die Verknüpfung des Modells mit Daten (Materialien, Erstellungszeitpunkten oder Bauwerksschäden) kann die Grundlage für Building Information Modeling (BIM) im Bestand bilden.

1. Einleitung

In Deutschland gibt es derzeit rund 120.000 Straßenbrücken [1]. Entsprechend groß ist die Bedeutung der Bestandserhaltung, d.h. von Nachrechnungen, Lebensdauerprognosen [2, 3] sowie Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen. In diesem Zusammenhang wurde die *Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand* veröffentlicht, die den Handlungsrahmen bei Bestandsbrücken erweitert und damit eine stärkere Ausnutzung von Tragwerksreserven – ohne Unterschreitung des im Eurocode geforderten Zuverlässigkeitsniveaus - ermöglicht [4, 5]. Dies ist im Wesentlichen über die Berücksichtigung einer im Bestandsfall verbesserten Informationslage oder einer begrenzten Restnutzungsdauer möglich. Auf der Einwirkungsseite sieht die Nachrechnungsrichtlinie in den Nachweisstufen 2 und 3 eine Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes für Eigenlasten auf 1,20 vor, sofern die Eigenlastverteilung durch ausreichende und repräsentative Messungen der Bauteilgeometrie und Betonwichte unter Berücksichtigung des Bewehrungsgrades bestimmt und zur Schnittgrößenermittlung verwendet wird. Wann Messungen ausreichend repräsentativ sind ist einzelfallabhängig. In der Baupraxis bedeutet dies eine Abstimmung mit dem Prüfenieur. Alternativ ermöglicht der probabilistische Hintergrund des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes eine Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes an eine am Bauwerk bestimmte Streuung.

In Kooperation mit dem Vermessungs- und Katasteramt der Landeshauptstadt Düsseldorf wurde eine knapp 50 Jahre alte Hochstraße mittels 3D-Laserscans und photogrammetrischen Luftbildaufnahmen

*Vortragender Autor: jens.loeschmann@rub.de

vermessen. Die resultierende Punktwolke wurde manuell sowie automatisiert in ein 3D-Brückenmodell überführt. Basierend auf der am Modell ermittelten Streuung der Brückengeometrie wird in Kombination mit empirischen Literaturdaten der Wichtestreuung ein reduzierter, bauwerksspezifischer Teilsicherheitsbeiwert abgeleitet.

2. Beschreibung der Referenzbrücke

Die 339 m lange Hochstraße ist Teil des Verkehrsknotenpunktes am Düsseldorfer Nordfriedhof und überführt die Danziger Straße in Nord-Süd-Richtung in den Kennedy-Damm. Der Kreuzungspunkt umfasst darüber hinaus eine Unterführung in West-Ost-Richtung. Die 1967/68 erbaute Hochstraße weist eine gekrümmte Trassierung auf [Abbildung 1, rechts]. Klothoiden leiten den 142,4 m langen Kreisbogenabschnitt ($R = 190$ m) in gerade Rampenbauwerke ein [6].

Die Spannbetonbrücke überführt als Durchlaufträger elf Felder mit Stützweiten zwischen 27 und 33 m und ist als einzelliger Hohlkasten ausgeführt [Abbildung 1, links]. Die Konstruktionshöhe des Querschnitts beträgt konstant 2,40 m. Ebenfalls unveränderlich sind die Untergurtbreite von 4 m sowie die Plattendicke der gevouteten Fahrbahnplatte von 20 cm. Die Breite der Fahrbahnplatte ist veränderlich und weitet sich im Bereich des Kreisbogens von 16,30 m auf 17,14 m auf. Variabel sind auch die Abmessungen der Hohlkastenaußenöffnung. In den Stützbereichen liegen Querschotte, sodass die Hohlkastenöffnung lediglich 1,40 x 0,80 m beträgt. In Richtung der Feldmitte weitet sich die Ausnehmung in ihrer Höhe und Breite auf, bis der Regelquerschnitt des Feldbereiches mit inneren Hohlkastenabmessungen von 2,80 m Breite und 1,65 m Höhe erreicht ist. Auch die Querneigung des Überbaus ist variabel. Sie erhöht sich stetig von 4,2 % an den Endauflagern auf 6,0 % in der Brückenmitte. Die Gradienten sind mit konstant 4,5 % geneigt.

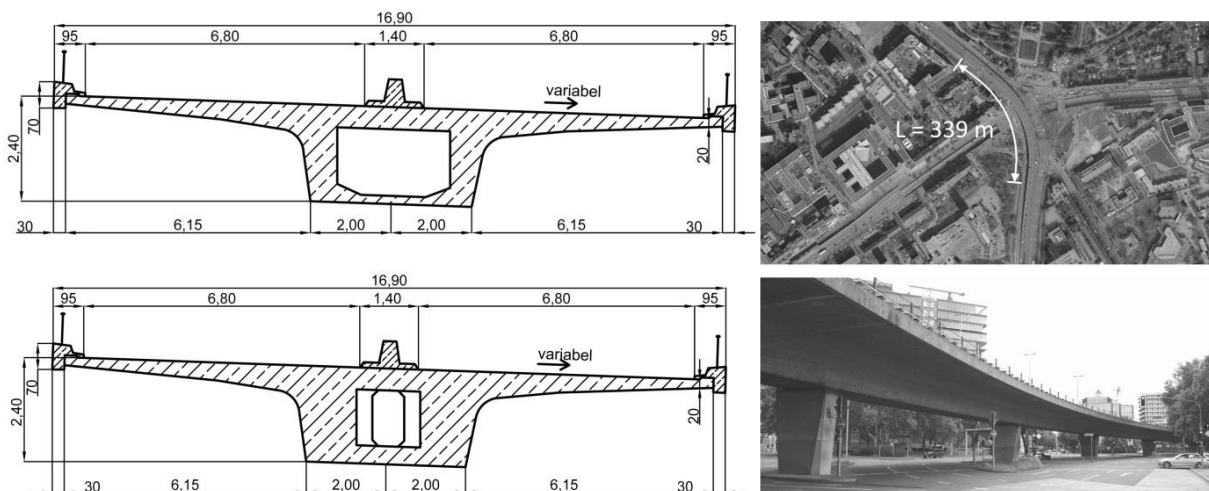


Abbildung 1: Links: Regelquerschnitt im Feld- (oben) und Stützbereich (unten); rechts: Draufsicht (oben) und Teilansicht (unten) der Hochstraße

3. Geometrieerfassung von Bestandsbrücken

Die Erzeugung eines, den Ist-Zustand abbildenden Geometriemodells erfordert eine ganzheitliche Erfassung der Bestandsgeometrie. Terrestrisches Laserscanning (TLS) kann dies grundsätzlich leisten. Da jedoch eine stationäre Vermessung der Fahrbahn bei laufendem Verkehr in der Regel nicht möglich ist und Sperrungen zu vermeiden sind, kommen für die Erfassung der Fahrbahn ergänzend mobile Ver-

fahren zum Einsatz. Die Brücke wird somit in die durch TLS erfassbaren Bereiche Untersicht und Hohlkasteninneres sowie die durch die mobilen Messverfahren Mobile Mapping (Laserscanbefahrung) und UAV-Befliegung (Photogrammetrie) von oben aufzunehmende Fahrbahn aufgeteilt. Aus allen drei Verfahren resultieren dreidimensionale Punktwolken, die die Ist-Geometrie der Bestandsbrücke bzw. einen Teilbereich davon abbilden.



Abbildung 2: Eingesetzte stationäre und mobile Messverfahren: 3D-Laserscanning (links), Mobile Mapping (Mitte) [eagle eye technologies] und Hexacopterüberflug (rechts)

3.1 Messverfahren

3.1.1 Terrestrisches Laserscanning (TLS)

3D-Laserscanner tasten Objekte automatisiert und rasterartig in hoher Geschwindigkeit ab und bilden sie als Punktwolke über Millionen von Einzelkoordinaten ab [Abbildung 3, links]. Im Gegensatz zu konventionellen Messverfahren, bei denen ausgewählte Punkte einzeln anvisiert werden, ist eine ganzheitliche Aufnahme von Bauwerken mit unregelmäßigen Geometrien oder feinen Oberflächenstrukturen möglich [7].

Laserscanner verfügen über einen Entfernungsmesser und einen Abtastmechanismus. Die Abtastung erfolgt über rotierende Spiegel und ermöglicht Scangeschwindigkeiten von bis zu einer Millionen Punkte je Sekunde [8]. Die Entfernungsmessung erfolgt über die Zeitmessung zwischen dem Impuls bei Entsendung und Empfang des Laserstrahls bzw. des reflektierten Anteils. Es handelt sich um ein Impulszeitverfahren mit einer Reichweite von 120 m [8]. In Kombination mit den beiden gemessenen Raumwinkeln ergibt sich eine eindeutige Koordinate im dreidimensionalen Raum. Die Punktfarben zeigen die Intensität des reflektierten Laserstrahls, sodass Oberflächenstrukturen und -farben voneinander abgrenzbar sind. Terrestrische Laserscans erreichen hohe Genauigkeiten mit Abweichungen kleiner 3 mm auf 50 m Entfernung [8]. Die Georeferenzierung, d.h. die Verknüpfung mit bekannten Koordinaten, erfolgt ebenfalls sehr genau über Passpunkte, deren globale Koordinaten z.B. mittels Tachymetermessungen und Nivellements bestimmt werden.

Für ein Bauwerk ist eine Vielzahl an Scans von unterschiedlichen Standpunkten aus erforderlich. Die Verknüpfung der einzelnen Punktwolken der Scans erfolgt computergestützt über Zieltafeln, den „Targets“ [Abbildung 2, links]. Die Anzahl erforderlicher Standpunkte hängt im Wesentlichen von der Geometrie und der Oberflächenstruktur der Brücke sowie von störenden Objekten wie Bäumen und Verkehrsschildern ab. Die von einer komplexen Kreuzung unterführte Referenzbrücke erforderte insgesamt 173 Standpunkte, davon 83 im Hohlkasten. Abbildung 3 zeigt rechts die verknüpfte und weitgehend von der Umgebung bereinigte Punktwolke des Scans.

3.1.2 Mobile Mapping (Laserscanbefahrung)

Um Sperrungen von Brücken zu vermeiden, bieten sich mobile Messverfahren (Mobile Mapping) zur Erfassung der Fahrbahnoberfläche an. Hierbei wird ein Messsystem mit Laserscanner auf einer mobilen

Trägereinheit (Kfz, Flugzeuge, Multikopter) installiert. Ein Messfahrzeug der Firma *eagle eye technologies* führte mit eigener Mobile-Mapping-Lösung die Laserscanbefahrung der Referenzbrücke durch (Abbildung 2, Mitte). *Leica* bietet mit dem *Pegasus: Backpack* auch eine Art Rucksack an, in den Messinstrumente integriert sind.

Anders als beim TLS werden beim Mobile Mapping aufgrund der beweglichen Trägereinheit nur Punktstreifen im Abstand von 4 cm erzeugt, was allerdings für die Erfassung der Brückenoberseite ausreicht. Die Georeferenzierung erfolgt über geodätische PD-GNSS-Empfänger (Präzises Differentielles Globales Navigations-Satelliten-System), die Genauigkeiten von 1 bis 5 cm erreichen [10]. Es kann daher bei der Einordnung der Punktwolke in ein globales Koordinatensystem und der Verknüpfung mit anderen Punktwolken eine manuelle Anpassung der Gesamtlage erforderlich sein.



Abbildung 3: Rasterartige Erfassung von Oberflächen durch den 3D-Laserscanner (links) [9] und aus Einzelscans zusammengefügte Punktwolke (rechts)

3.1.3 Photogrammetrie (UAV-Befliegung)

Alternativ ist eine Erfassung der Brückenoberseite aus der Luft mittels unbemannter Fluggeräte („unmanned aerial vehicle“ = UAV) möglich (Abbildung 2, rechts). Hierbei werden während eines Überflugs photogrammetrische Aufnahmen gemacht. Multikopter sorgen für eine bestmögliche Stabilität der Messapparatur in der Luft. Sensoren ermöglichen einen automatisierten Flug nach vorab geplanter Route. Der Einbezug von Passpunkten bewirkt eine deutlich präzisere Georeferenzierung als es die GNSS-Messungen der Befahrung bieten. Die photogrammetrische Auswertung ergab im Anwendungsfall Abweichungen der Passpunktkoordinaten in den einzelnen Aufnahmen von durchschnittlich nur 1,2 cm. Für den von *Aibotix* durchgeführten Überflug der Hochstraße mittels Hexakopter war aus Sicherheitsgründen eine kurzzeitige Brückensperrung von drei Stunden erforderlich.

3.2 Erstellung eines Volumenmodells

Für die Modellierung sind die Punktwolken aus den einzelnen Messverfahren zunächst zusammenzuführen. Die Lage der Punktwolken der Fahrbahnoberfläche aus dem Mobile Mapping sowie der UAV-Befliegung ist aufgrund der verfahrensbedingten Ungenauigkeiten bei der Georeferenzierung manuell anzupassen. Die mittels terrestrischem Laserscanning erfassten Kappen können dabei als Referenzniveau dienen. Eine Modellbildung auf der Grundlage der zusammengeführten Punktwolke kann dann auf zwei Arten erfolgen, manuell über das Nachzeichnen von Querschnitten in der Punktwolke sowie automatisiert über Approximationsverfahren wie der Triangulation.

Bei der manuellen Modellierung über Einzelquerschnitte sind mindestens die Stellen zu berücksichtigen, an denen sich der Brückenquerschnitt un stetig verändert. Der Ist-Zustand wird somit nur an ausgewählten Querschnittsstellen abgebildet. Dazwischen wird linear interpoliert. Die Interpolationsbereiche zwischen den Querschnitten weisen Modellgenauigkeiten auf, die exemplarisch an einem 12 m langen

Teilabschnitt der Referenzbrücke mit konstantem Querschnitt untersucht werden, indem das resultierende Volumen zweier unterschiedlich feiner Modelle verglichen wird. Die Abweichung des Volumens eines aus Anfangs- und Endquerschnitt erzeugten Modells und einem feineren Modell mit Querschnitten im Abstand von 2 m ist mit 0,03 % vernachlässigbar gering. Das manuell erstellte Volumenmodell der Referenzbrücke besteht insgesamt aus 78 Querschnitten, was einem mittleren Querschnittsabstand von 4,20 m entspricht. Insbesondere bei Großbrücken ist dieses Modellierungsverfahren sehr zeitaufwendig und daher ineffizient.

Eine Steigerung der Effizienz sowie der Modellgenauigkeit ist durch automatisierte Verfahren möglich, die aus ungeordneten Punkten im dreidimensionalen Raum Oberflächen approximieren. Ein gängiges Approximationsverfahren ist die Triangulation, auch Triangulierung oder „Dreiecksvermaschung“ genannt, bei der aus einer Punktwolke ein Dreiecksnetz gebildet wird. Eine bestmögliche Oberflächenapproximation erfolgt bei der Delaunay-Triangulierung über eine Maximierung der Innenwinkel der Dreieckselemente, sodass jeder Punkt innerhalb des Dreiecks einem Eckpunkt möglichst nahe ist. Dazu ist das sogenannte Umkreis-Kriterium einzuhalten, welches besagt, dass sich kein Eckpunkt innerhalb des Umkreises eines anderen Dreiecks befinden darf [11]. Der Algorithmus muss robust gegenüber Ausfällen und Ausreißern in der Punktwolke sowie schwankenden Punktdichten sein. Zur Qualitätsverbesserung des Modells ist eine Vor- (Ausreißerbeseitigung, Datenreduktion bzw. -bereinigung) und Nachbehandlung (Glättung, Lückenfüllung, Interpolation) üblich [12]. Für die Oberflächenmodellierung der Referenzbrücke wurde die Software *3D Reshaper* (mittlerer Punktabstand: 2 cm) verwendet. Zur besseren Darstellung des Dreiecksnetzes wurde das Teilstück in Abbildung 4 gröber trianguliert.

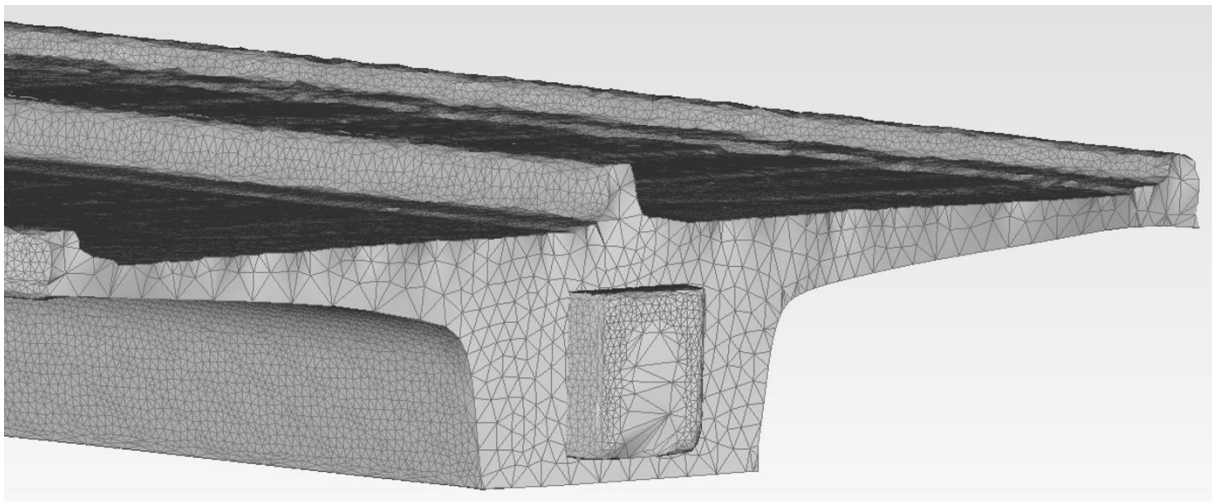


Abbildung 4: Teilstück des triangulierten Modells mit nachbehandeltem Bereich im Hohlkasten

4. Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes für Eigenlasten γ_G

Die Kenntnis der Geometrie einer Bestandsbrücke ermöglicht die Verwendung eines reduzierten Teilsicherheitsbeiwertes für Eigenlasten und damit eine günstigere Tragfähigkeitsbewertung. Dies begründet sich im Wesentlichen mit - je nach Messgenauigkeit - gänzlich wegfallenden oder eingrenzbaaren Streuungsunsicherheiten.

4.1 Reduktion gemäß der Nachrechnungsrichtlinie

Die Nachrechnungsrichtlinie sieht bei Verwendung einer durch Messungen am Bauwerk bestimmten Eigenlastverteilung eine Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes für Eigenlasten auf den Wert 1,20 vor.

Die statistische Streuung wird dann direkt in der Lastverteilung berücksichtigt, sodass theoretisch ausschließlich Modellunsicherheiten, konservativ mit 1,19 abgeschätzt, vom Teilsicherheitsbeiwert abzudecken sind [13].

$$\gamma_{G,red} = \gamma_{Ed} \cdot \gamma_g = 1,19 \cdot 1,00 = 1,19 \approx 1,20$$

Physikalisch verbleibt bei der statistischen Streuung aufgrund begrenzter Messgenauigkeit stets eine gewisse Unsicherheit. Die Nachrechnungsrichtlinie definiert jedoch keine Genauigkeitsanforderungen an die Geometrie- und Wichtemessungen, sodass eine Reduktion von γ_G in jedem Einzelfall beurteilt werden muss.

Für eine Reduktion auf den Wert 1,20 müssen alle drei Eigenlastgrößen - Geometrie, Wichte und Bewehrungsgrad - bekannt sein [4]. Für die Geometrieerfassung sind die Verfahren aus Kapitel 3 einsetzbar. Die tatsächliche Betonwichte ist punktuell durch Messungen, üblicherweise an Bohrkernen, zu bestimmen. Der Bewehrungsgrad kann aus den Bestandsunterlagen entnommen werden, da in der Regel keine signifikanten Abweichungen vom Soll-Wert zu erwarten und ohnehin nur stichprobenartige Messungen möglich sind. Die Streuung der Stahlwichte ist vernachlässigbar gering [14].

4.2 Bauwerksspezifische Reduktion

4.2.1 Methodik

Alternativ zur pauschalen Reduktion auf 1,20 ist eine ebenfalls probabilistisch begründete Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes an eine durch Messungen am Bauwerk ermittelte Eigenlaststreuung möglich [15]. Die bekannte Streuung wird dabei weiterhin - wie Streuungsunsicherheiten bei Neubauten - über den Teilsicherheitsbeiwert abgedeckt, sodass die planmäßige Eigenlastverteilung zur Schnittgrößenberechnung verwendet werden darf. Das Vorgehen bietet auch bei unvollständigen Messdaten die Möglichkeit einer Reduktion, indem Teilinformationen mit empirischen Literaturwerten verknüpft werden. Denkbar ist es, nur die Geometrie detailliert aufzumessen und den Variationskoeffizienten der Wichte konservativ abzuschätzen, sodass aufwendige und schädigende Bohrkernentnahmen entfallen. Eine Reduktion auf den Wert 1,20 ist bei nicht vollständiger Messung der Geometrie- und Wichtestreuung hingegen kritisch zu sehen, da relevante Streuungsunsicherheiten verbleiben.

Der Variationskoeffizient der Eigenlast v_g ergibt sich gemäß Gl. (1) aus den Streuungen der Geometrie (v_{Geo}) und der Stahlbetonwichte (v_{Wi}).

$$v_g(v_{Geo}, v_{Wi}) = \sqrt{v_{Geo}^2 + v_{Wi}^2} \quad (1)$$

Mit der bauwerksspezifischen Eigenlaststreuung kann nach dem allgemeinen Ansatz für Teilsicherheitsbeiwerte (Gl. (2) [15, 16]) ein angepasster Lastfaktor $\gamma_{g,mod}$ berechnet werden.

$$\gamma_{g,mod} = 1 + \beta_0 \cdot \alpha_g \cdot v_g(v_{Geo}, v_{Wi}) \quad (2)$$

mit: $\gamma_{g,mod}$: bauwerksspezifischer Lastfaktor
 β_0 : Zuverlässigkeitsniveau
 α_g : Wichtungsfaktoren zur Trennung von Einwirkungs- und Widerstandsseite
 v_g : Variationskoeffizient der Eigenlast

Der vollständige Teilsicherheitsbeiwert ergibt sich schließlich aus dem Lastfaktor $\gamma_{g,mod}$ und dem Modellunsicherheitsfaktor γ_{Ed} , der im Wesentlichen Ungenauigkeiten der idealisierten Last- und Berechnungsmodelle abdeckt [17].

$$\gamma_{G,mod} = \gamma_{Ed} \cdot \gamma_{g,mod} \quad (3)$$

Für die Berechnung der **Geometriestreuung** (v_{Geo}) wird ein Datensatz von Soll-Ist-Abweichungen benötigt. Die Soll-Geometrie ist den Bestandsunterlagen entnommen; die Ist-Geometrie einem Volumenmodell. Der Vergleich zwischen Soll und Ist erfolgt abschnittsweise über mittlere Querschnittsflächen (Abbildung 5), sodass die gesamte Brückengeometrie und nicht nur ausgewählte Querschnitte in die Streuungsberechnung einfließen. Die Berechnung der mittleren Querschnittsflächen aus den Bestandsplänen bzw. dem Volumenmodell erfordert Abschnitte mit stetigem Querschnittsverlauf. An Querschnittssprüngen oder -aufweitungen endet ein Abschnitt. Im Zuge der Varianzberechnung erfolgt eine Wichtung der Abweichungen über ihre jeweilige Abschnittslänge.

Die Verwendung von mittleren Abweichungen kann selbst im Falle eines exakten Ist-Volumenmodells Ungenauigkeiten nach sich ziehen. Weicht z.B. die Geometrie innerhalb eines Abschnittes sowohl positiv als auch negativ von der planmäßigen Geometrie ab, so gleichen sich die Abweichungen rechnerisch weitgehend aus. Theoretisch sind daher auch bei geringen mittleren Abweichungen lokale Abweichungsspitzen nicht auszuschließen. Auch statisch gesehen findet bei geringer Abschnittslänge ein Ausgleich der Mehr- und Mindereigenlast statt. Mit steigender Abschnittslänge ist dies jedoch nicht mehr der Fall, sodass die mittleren Abweichungen die statisch relevante Streuung zunehmend unzuverlässiger widerspiegeln.

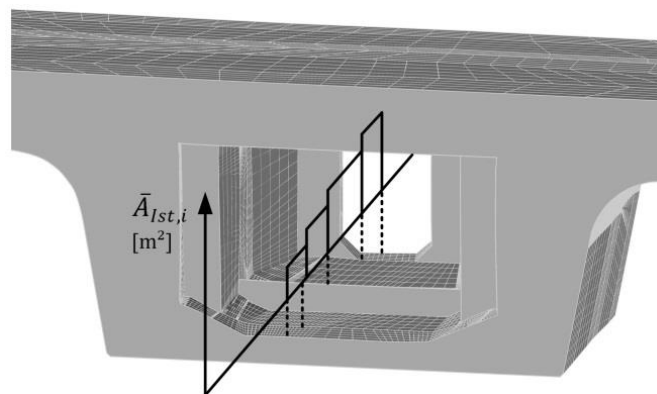


Abbildung 5: Ist-Geometriemodell mit abschnittsweise gebildeten mittleren Querschnittsflächen

Der erste Schritt zur Bestimmung der Geometriestreuung ist die Berechnung der Varianz aus den mittleren Abweichungen.

$$Var = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n (\bar{A}_{Ist,i} - \bar{A}_{Soll,i})^2 L_i \quad (4)$$

Als Erwartungswert μ der Grundgesamtheit kann die mittlere Soll-Querschnittsfläche $\bar{A}_{Soll,i}$ eines Abschnittes i angesetzt werden, sofern systematische Fehler ausgeschlossen werden können. Bei einem veränderlichen Querschnittsverlauf hat jede mittlere Ist-Querschnittsfläche $\bar{A}_{Ist,i}$ einen eigenen Erwartungswert ($\bar{A}_{Soll,i}$) und gehört dementsprechend einer anderen Grundgesamtheit an. Aufgrund des anzunehmenden, nahezu gleichen Streuungsverhaltens und ähnlich großer Erwartungswerte wird jedoch näherungsweise ein gemeinsames Streuungsmaß aus allen Abweichungen berechnet.

Aus der Varianz sind die Standardabweichung (Gl. (5)) und der dimensionslose Variationskoeffizient (Gl. (6)), der ein vom Erwartungswert entkoppeltes Streuungsmaß darstellt, zu ermitteln. Die „Normierung“ der Standardabweichung erfolgt mit dem kleinsten auftretenden Erwartungswert, um einen maximalen Variationskoeffizienten zu erhalten.

$$\sigma = \sqrt{Var} \quad (5)$$

$$v_{Geo} = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sigma}{\min(\bar{A}_{Soll})} \quad (6)$$

Die Bestimmung der **Streuung der Stahlbetonwichte** (v_{Wi}) aus Messwerten, z.B. aus Bohrkernen, ist nicht Teil dieser Untersuchungen, da sie in der Regel mit einem schädigenden Eingriff in den Bestand verknüpft ist. Insbesondere bei Großbrücken mit mehreren Betonchargen ist eine erhebliche Anzahl an Proben erforderlich, sofern keine Streuungsunsicherheit der Wichte verbleiben soll. Es werden stattdessen empirische Literaturwerte für v_{Wi} verwendet (Tabelle 1).

Dabei ist zu beachten, auf welchen Bewehrungsgrad sich der angegebene Variationskoeffizient bezieht. Die Stahlbetonwichte γ_{RC} ergibt sich aus dem Bewehrungsgrad ρ sowie den Wichten des Bewehrungs- bzw. Spannstahls γ_S und des Betons γ_C :

$$\gamma_{RC} = \rho \gamma_S + (1 - \rho) \gamma_C \quad (7)$$

Die Streuung um den Mittelwert der Stahlbetonwichte bleibt bei abweichenden Bewehrungsgraden grundsätzlich unverändert, jedoch ergibt sich zunehmend eine Abweichung zum üblicherweise für die Eigenlast angesetzten Wert der Stahlbetonwichte (i.d.R. 25 kN/m³). Bei hohen Bewehrungsgraden kann ein künstlich erhöhter Variationskoeffizient diesen Effekt kompensieren. Alternativ ließe sich auch direkt die vom Regelwert abweichende Stahlbetonwichte im Lastansatz berücksichtigen. Bei niedrigeren Bewehrungsgraden als in Tabelle 2 angegeben, verringert sich der tatsächliche Mittelwert der spezifischen Stahlbetonwichte, sodass der Einfluss auf die Streuung nicht berücksichtigt werden muss, solange es sich nicht um ungünstige Wirkungen wie Abheben oder Auftrieb handelt.

Tabelle 1: Empirische Literaturdaten für die Streuung der Stahlbetonwichte

Quelle	Festigkeitsklasse Beton	Bewehrungs- grad [%]	Mittelwert Stahlbetonwichte [kN/m ³]	Variations- koeffizient [%]
Braml / Wurzer [18]	keine Differenzierung	3,0	25,0	2,5
Rackwitz [19]	< C20/25	2,0	24,5	4,0
	> C40/50	2,0	25,5	3,0

4.2.2 Anwendungsfall

Die Eigenlaststreuung v_g der Referenzbrücke wird nach Gl. (1) aus der am Bauwerk bestimmten Geometriestreuung, kombiniert mit einem empirischen Literaturwert für die Streuung der Stahlbetonwichte ermittelt.

Für den Soll-Ist-Geometrievergleich sind die vom Laserscanner miterfassten Brückenkappen sowie Fahrbahnaufbauten, die nicht zur Tragkonstruktion gehören, vom Ist-Volumen abzuziehen. Ohne weitere Maßnahmen wie Testbohrungen können allerdings nur ihre planmäßigen Abmessungen abgezogen werden. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse des abschnittsweise durchgeführten Soll-Ist-Vergleichs der mittleren Querschnittsflächen entlang der Brücke (links) sowie in einem Histogramm (rechts) aufgeführt. Systematische Abweichungen oder Tendenzen sind nicht zu erkennen, sodass sich die Abweichungen über die Brückenlänge im Wesentlichen ausgleichen. Es verbleibt eine Abweichung zwischen dem realen (4050 m³) und dem planmäßigen Gesamtvolumen (4034 m³) von 16 m³, was einem relativen Wert von 0,39 % entspricht. Abschnittsweise liegen die mittleren Abweichungen im Bereich ± 2 %. Die für geometrische Abweichungen etablierte Normalverteilung [19] kann aufgrund der geringen Datenmenge hier nicht explizit nachgewiesen werden; sie wird im Folgenden jedoch vereinfachend angenommen.

Nach den Gln. (4) und (5) ergibt sich aus den Abweichungen in Abbildung 6 eine Varianz von $0,0361 \text{ (m}^3/\text{m)}^2$ und eine Standardabweichung von $0,1899 \text{ m}^3/\text{m}$ sowie folgender Variationskoeffizient:

$$v_{Geo} = \frac{\sigma}{\bar{A}_{Soll,min}} = \frac{0,1899}{10,97} = 1,73 \% \quad (8)$$

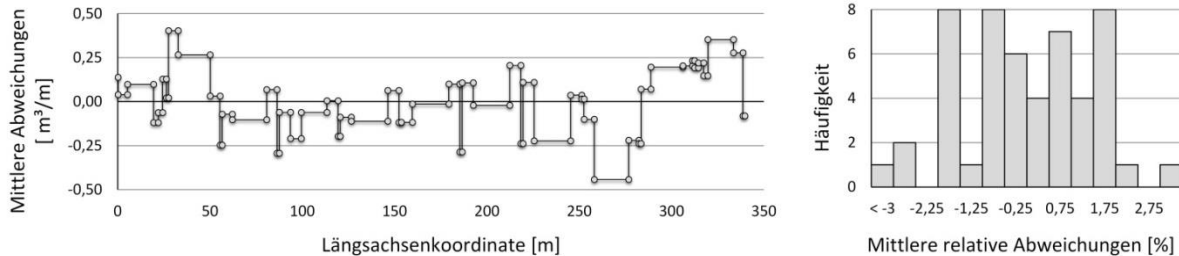


Abbildung 6: Soll-Ist-Abweichungen der mittleren Querschnittsflächen über die gesamte Brückenlänge (links) und im Histogramm (rechts)

Der Bewehrungsgrad der Brücke liegt mit $1,4 \%$ unterhalb von 2 bzw. 3% , sodass für die Wichte die Streuungsabschätzungen gemäß Tabelle 1 verwendet werden können. Aus den Variationskoeffizienten $v_{Wi} = 3,5 \%$ (interpoliert für C30/37 nach Rackwitz [19]) und $v_{Geo} = 1,73 \%$ (aus Messungen) ergibt sich eine Eigenlaststreuung von $3,90 \%$.

$$v_g = \sqrt{0,0173^2 + 0,035^2} = 3,90 \% \quad (9)$$

Eingesetzt in die Gln. (2) und (3) ergibt sich für die in der DIN EN 1990 festgelegten Parameter, dem Zuverlässigkeitsniveau $\beta_0 = 3,8$ (bei 50-jähriger Bauwerksnutzung) und dem Wichtungsfaktor der Einwirkungsseite $\alpha_g = 0,7$, sowie einem konservativen Modellunsicherheitsfaktor $\gamma_{Ed} = 1,19$ folgender modifizierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{G,mod}$:

$$\gamma_{g,mod} = 1 + \beta_0 \cdot \alpha_g \cdot v_g = 1 + 3,8 \cdot 0,7 \cdot 0,039 = 1,10 \quad (10)$$

$$\gamma_{G,mod} = \gamma_{Ed} \cdot \gamma_{g,mod} = 1,19 \cdot 1,10 = 1,31 \quad (11)$$

Die Eigenlastverteilung kann infolge des Laserscans jedoch präziser bestimmt werden als bei Neubauten, womit ein niedrigerer Modellunsicherheitsfaktor begründbar ist [17]. Eine geringere Modellunsicherheit von 5% ($\gamma_{Ed} = 1,13$), die Graubner [20] bei Berücksichtigung der am Bauwerk ermittelten Eigenlast noch als konservativ bezeichnet, rechtfertigt eine Reduktion auf $1,24$.

$$\gamma_{G,mod} = \gamma_{Ed} \cdot \gamma_{g,mod} = 1,13 \cdot 1,10 = 1,24 \quad (12)$$

Der Deutsche Beton- und Bautechnik-Verein beziffert γ_{Ed} in Heft 24 [17] auf lediglich $1,10$, was im Anwendungsfall auf einen Teilsicherheitsbeiwert von $1,21$ führt. Ein Variationskoeffizient von $2,5 \%$ nach Tabelle 1 führt zu einer weiteren Reduktion. Die reduzierten Teilsicherheitsbeiwerte der Referenzbrücke variieren je nach Modellunsicherheitsfaktor und Annahme der Wichtestreuung zwischen $1,19$ und $1,31$ (Tabelle 2). Verkürzte Restnutzungsdauern erlauben weitere Reduktionen, da unter Einhaltung des geforderten Zuverlässigkeitsniveaus β_0 verminderte Restzuverlässigkeitsindizes zulässig sind [17].

Tabelle 2: Variation des bauwerksspezifischen Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_{G,mod}$

$\gamma_{G,mod}$	v_{Wi}	
	2,5 %	3,5 %

γ_{Ed}	1,10 (\triangleq ca. 3,8 %) [17]	1,19	1,21
	1,13 (\triangleq ca. 4,9 %) [20]	1,22	1,24
	1,19 (\triangleq ca. 7,1 %) [13]	1,29	1,31

5. Building Information Modeling (BIM) im Bestand

Building Information Modeling (BIM) bezeichnet die Koordination von Prozessen, wie der Planung und Ausführung von Baumaßnahmen oder der Unterhaltung von Bauwerken, über intelligente 3D-Modelle [21]. Ein BIM-Modell enthält neben den geometrischen Abmessungen weitere Daten wie z.B. Materialien, Zeitabläufe oder Kosten. Wesentlicher Vorteil von BIM ist, dass sämtliche Planungsunterlagen wie 2D-Pläne, Stücklisten, Bauwerksmassen oder Bauablaufpläne aus einem einzigen mehrdimensionalen Datenmodell generiert werden können, auf das alle Beteiligten Zugriff haben [21].

Bei Neubauten basiert die Geometrie des Modells auf den planmäßigen Abmessungen. BIM im Bestand unterscheidet sich insofern davon, dass sich die Geometrie aus den tatsächlichen Bauwerksabmessungen des Bestandsbauwerks ergibt. Dazu ist eine ganzheitliche Vermessung erforderlich, z.B. mittels 3D-Laserscanning (vgl. Kapitel 3). Anwendungsgebiete von BIM im Bestand sind die Bauwerksunterhaltung und Gebäudebewirtschaftung [21].

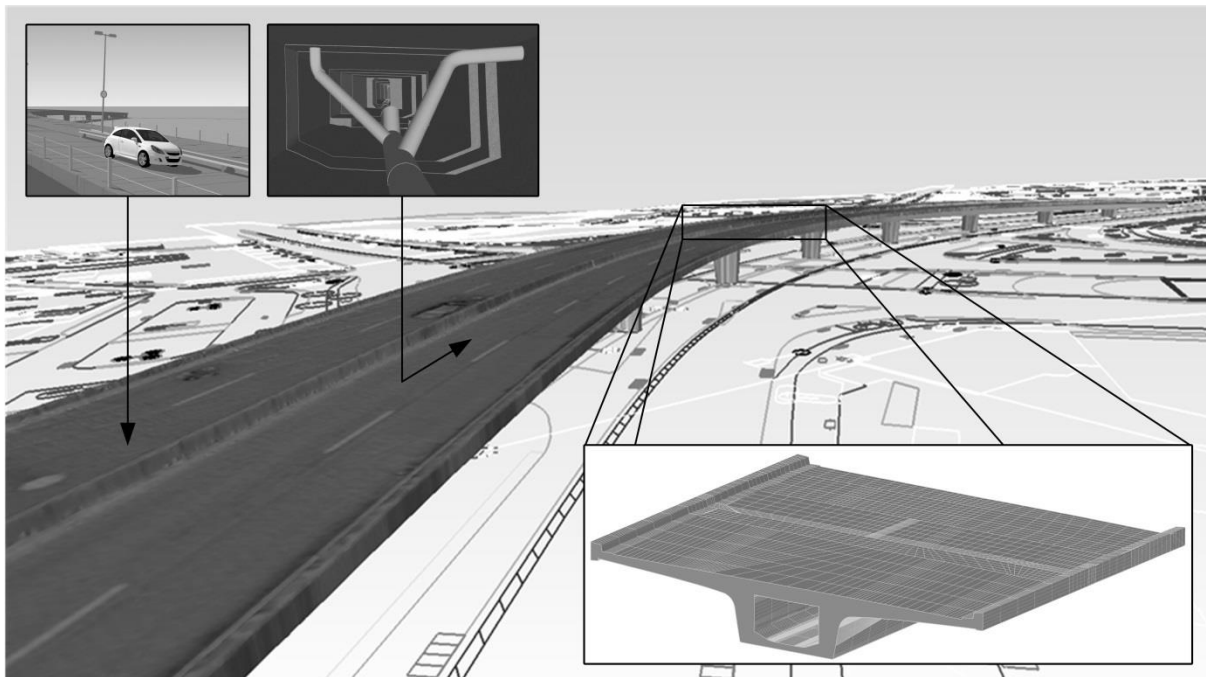


Abbildung 7: Digitales Modell der Hochstraße, integriert in eine 2D-Stadtgrundkarte, und Ausschnitte der Fahrbahn (o. l.), der Rohrleitungen (o. r.) und eines Teilschnittes der Brücke (u. r.)

5.1 Erzeugung eines BIM-Modells aus der Punktwolke

Für die Erzeugung eines BIM-Modells ist ein Arbeitsablauf von der Punktwolke des Laserscans bis zum intelligenten BIM-Modell erforderlich. Dieser Ablauf wird auch „Scan to BIM“ genannt [21]. Die Erzeugung eines 3D-Volumenmodells auf der Grundlage einer Punktwolke wird in Kapitel 3 ausführlich beschrieben. Das Geometriemodell ist anschließend in ein intelligentes BIM-Modell umzuwandeln. Gängige BIM-Software wie *Autodesk Revit* oder *Tekla Structures* unterstützt den Import von DWG-Dateien, allerdings wird das Modell grundsätzlich als ein gesamtes Objekt importiert. Ein in Bauteile, Sektoren oder Bereiche unterteiltes bzw. unterteilbares Modell ist jedoch Voraussetzung für BIM, speziell für die

Verknüpfung von Geometrie und Daten. *Imaginit* bietet für die BIM-Software *Revit* das Add-on *Scan to BIM* an, welches eine automatische Erzeugung von Objekten aus der Punktwolke ermöglicht. Jedoch beschränkt sich die Anwendung auf ausgewählte geometrische Objekte des Hochbaus wie Wände oder Stützen.

5.2 Anwendung von BIM in der Bauwerksunterhaltung und -prüfung

Ein BIM-Modell ermöglicht dauerhaften Zugriff auf Geometrien, Abmessungen und Entfernungen von Bauteilen, ohne dass zeitaufwendige Ortsbegehungen und Vermessungen erforderlich sind. Es können außerdem Schnitte oder Teilabschnitte (Abbildung 7) an beliebigen Stellen ausgelesen werden. Die Zustandserfassung und Planung notwendiger Baumaßnahmen, wie z.B. Verstärkungen oder Rohrleitungen (Abbildung 7), kann deutlich schneller und wirtschaftlicher erfolgen.

Der Nutzen von BIM geht jedoch über das Abrufen der geometrischen Daten hinaus. So können z.B. im Rahmen von Bauwerksprüfungen Schäden in Form von Fotos oder Beschreibungen im Modell an den entsprechenden Stellen hinterlegt werden. Es ist denkbar, die Schadensstelle und -art direkt vor Ort digital auf einem Laptop oder Tablet zu dokumentieren, sodass der Zwischenschritt der Übertragung der Handaufzeichnungen weitgehend entfällt. Im Büro sind dann lediglich tiefergehende Auswertungen wie Schadenseinstufungen und -abschätzungen vorzunehmen. Auch dazu kann das BIM-Modell seinen Beitrag liefern. An der Referenzbrücke wurden im südlichen Endfeld Betonabplatzungen an der Bodenplatte im Hohlkasten festgestellt. Mit Hilfe des Modells konnte die verbleibende Dicke der Bodenplatte ermittelt und der Schaden bewertet werden, ohne dass aufwendige und zugleich schädigende Bohrungen notwendig waren.

6. Schlussfolgerungen

Die genaue Kenntnis der drei wesentlichen Kenngrößen des Eigengewichts einer Bestandsbrücke - Geometrie, Betonwichte und Bewehrungsgrad - ermöglicht eine Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes für Eigenlasten, was mit dem Wegfall bzw. dem Eingrenzen von Streuungen zu begründen ist. Die Nachrechnungsrichtlinie sieht eine pauschale Reduktion von 1,35 auf 1,20 vor, sofern die tatsächliche Eigenlastverteilung in situ durch Messungen bestimmt und bei der Lastverteilung im Berechnungsmodell mit ihren tatsächlichen Werten, also alternierend, angesetzt wird. Sofern für eine der Größen keine oder nur punktuelle Messungen mit begrenztem Umfang vorliegen, ist eine Reduktion auf den Wert 1,20 kritisch zu sehen, da unter Umständen relevante Streuungsunsicherheiten verbleiben. Speziell Messungen der Betonwichte, in der Regel schädigende Bohrkernentnahmen, sind nicht immer zulässig. Für diesen Fall ermöglicht die Methode zur Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes an eine ermittelte Streuung eine Verknüpfung vorhandener Messdaten mit empirischen Werten aus der Literatur. Vorge schlagen wird, die Brücke per Laserscanning bzw. Photogrammetrie aus Überflügen geometrisch zu vermessen, die Betonwichten mit empirisch begründeten Reststreuungen aus der Literatur abzuschätzen und den Bewehrungs- bzw. Spannstahl aus den Bestandsplänen zu entnehmen. Dieses Vorgehen führt im Anwendungsfall zu einer Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes auf einen Wert zwischen 1,19 und 1,31, je nach Annahme des Modellunsicherheitsfaktors und der Streuung der Wichte. Das Ausmaß der bauwerksspezifischen Reduktion hängt somit im Wesentlichen von den beiden genannten Annahmen sowie der tatsächlichen Geometriestreuung und der planmäßigen Restnutzungsdauer ab. Da die Eigenlaststreuung weiterhin im Teilsicherheitsbeiwert integriert ist, darf darüber hinaus wie bei Neubauten die planmäßige Lastverteilung zur Schnittgrößenberechnung verwendet werden.

Voraussetzung für eine Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes ist ein, den Ist-Zustand abbildendes Geometriemodell. Die Modellierung auf der Grundlage einer durch Messungen erhaltenen Punktwolke ist automatisiert mittels Triangulation möglich, lediglich geringe manuelle Vor- und Nachbehandlungen sind notwendig. Das Modell ist dann über die Anwendung im Rahmen der Nachrechnung hinaus einsetzbar, z.B. in Lebensdauerprognosen oder in der Bauwerksunterhaltung und -prüfung. Eine Nutzung

im Rahmen von Building Information Modeling im Bestand erfordert weitergehende Untersuchungen zur Erstellung eines intelligenten BIM-Modells aus dem triangulierten Geometriemodell bzw. direkt aus den Punktdaten und zur Zuweisung und Aufbereitung relevanter Bauwerksinformationen.

Danksagung

Die Arbeiten sind im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes „Genauigkeitsgrenzen von Lebensdauerprognosen - Experimentelle und numerische Untersuchungen einer Spannbetonhochstraße unter Ermüdungsbeanspruchung“ entstanden. Für die finanzielle Unterstützung sei der DFG herzlich gedankt. Der Landeshauptstadt Düsseldorf sei für die große Unterstützung im Rahmen der Vermessung der Referenzbrücke gedankt.

Literatur

- [1] Empelmann, M.; Unger, C.: Zuverlässigkeitsanalyse bestehender Brückenbauwerke, Technische Universität Braunschweig, 2012
- [2] Sanio, D.; Ahrens, M. A.; Rode, S.; Mark, P.: Untersuchung einer 50 Jahre alten Spannbetonbrücke zur Genauigkeitssteigerung von Lebensdauerprognosen, Beton- und Stahlbetonbau 109, Heft 2, 2014
- [3] Ahrens, M. A.; Strauss, A.; Bergmeister, K.; Mark, P.; Stangenberg, F.: Lebensdauerorientierter Entwurf, Konstruktion, Nachrechnung, Betonkalender 2013, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), Bonn, 2011
- [5] Marzahn, G.; Maurer, R.; Zilch, K.; Dunkelberg, D.; Kolodziejczyk, A.: Die Nachrechnung von bestehenden Straßenbrücken aus Beton. Betonkalender 2013, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [6] Beyer, E.; Schmarsel, P.: Verkehrsknotenpunkt Nordfriedhof in Düsseldorf, Beton 20, Heft 2, 1970
- [7] Kern, F.: Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten, Technische Universität Braunschweig, 2003
- [8] Leica Geosystems AG: Leica Scan Station P20, Heerbrugg, 2013
- [9] Schleinkofer, M.: Wissensbasierte Unterstützung zur Erstellung von Produktmodellen im Baubestand, TU München, 2007
- [10] Bäumker, M.; Ludwig, J.: „eagle eye technologies“: Ein kinematisches terrestrisches photogrammetrisches Stereoaufnahmesystem mit direkter Georeferenzierung mittels INS, GPS oder Odometer, In: Proceedings 14. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl/Ötztal, 2007
- [11] Burghardt, M.: Parallele Netzgenerierung für ebene und räumliche Problemstellungen aus dem Bauwesen, Technische Universität Darmstadt, 2001
- [12] Gaßmann, F.; Franke, K.-H.: Verfahren zur Triangulation ungeordneter 3D-Punktmengen, Workshop 3D-NordOst, 2005
- [13] Maurer, R.; Zilch, K.; Hegger, J.; Zichner, T.; Dunkelberg, D.; Karakas, A.; Kolodziejczyk, A.: Erläuterungen und Hintergründe zur Nachrechnungsrichtlinie - Betonbrücken. Bauingenieur 87, Heft 1, 2012
- [14] Schnell, J.; Fischer, A.; Loch, M.: Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten auf Bestandsbauten im Hochbau, Technische Universität Kaiserslautern, Fraunhofer IRB Verlag, 2009
- [15] Löschmann, J.; Ahrens, M. A.; Dankmeyer, U.; Ziem, E.; Mark, P.: Methoden zur Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes für Eigenlasten bei Bestandsbrücken. Beton- und Stahlbetonbau 112, Heft 8, 2017
- [16] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau, Springer, Berlin, 2010
- [17] Fischer, A.; Grünberg, J.; Schnell, J.; Stauder, F.: DBV-Heft 24: Begründung eines reduzierten Zuverlässigkeitsindex und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetontragwerke im Bestand, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, Berlin, 2014
- [18] Braml, T.; Wurzer, O.: Probabilistische Berechnungsverfahren als zusätzlicher Baustein der ganzheitlichen Bewertung von Brücken im Bestand, Beton- und Stahlbetonbau 107, Heft 10, 2012
- [19] Rackwitz, R.: Einwirkungen auf Bauwerke. In: G. Mehlhorn (Hrsg.), Der Ingenieurbau: Tragwerkszuverlässigkeit, Ernst & Sohn, Berlin 1996
- [20] Graubner, C.-A.; Glowienka, S.: Zuverlässigkeit von Stahlbetondruckgliedern unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_G auf der Einwirkungsseite, Fraunhofer IRB Verlag, Darmstadt, 2005
- [21] Ehm, M.; Hesse, C.: 3D-Laserscanning zur Erfassung von Gebäuden – Building Information Modeling (BIM), Beton- und Stahlbetonbau 91, Heft 4, 2014