

Schadensmodellierung mittels nichtlinearer FE-Simulationen zur Bauwerksüberwachung im Rahmen eines Digitalen Zwillings

Bjarne Sprenger, Martina Schnellenbach-Held

Institut für Massivbau, Universität Duisburg-Essen

Zusammenfassung: Die Abbildung eines Tragwerks durch einen digitalen Zwilling erfordert die automatische Validierung von Messdaten direkt am realen Bauwerk. Durch die Einbindung automatisierter Überwachungssysteme im Rahmen eines Structural Health Monitorings (SHM) können Bauwerkszustand und Schädigungen erfasst und das digitale Modell angepasst werden. Diese Ermittlung der Systemeigenschaften bzw. der Bauteilparameter erfolgt über die Adaption von Finite Elemente Modellen an die Messdaten des realen Bauwerks.

In diesem Beitrag werden relevante Parameter für die Schadensmodellierung in FE-Systemen vorgestellt und aussagekräftige Indikatoren zur Beschreibung von Schädigungen aufgezeigt. Ein Konzept zur Schadensmodellierung in nichtlinearen FE-Simulationen wird an einer realen Spannbetonbrücke entwickelt und aussagekräftige Bauteilparameter identifiziert.

1 Einleitung und Motivation

Geeignete Überwachungsstrategien im Bauwerksmonitoring können im Lebenszyklus eines Bauwerks vielseitig, von der Planungsphase über den Betrieb bis zum Rückbau, eingesetzt werden und dienen als Hilfsmittel zur Datenakquise oder Einschätzung des Bauwerkszustands. Mit einer kontinuierlichen Überwachung können Schädigungen rechtzeitig erkannt, anfallende Instandsetzungsmaßnahmen minimiert und ein frühzeitiger Rückbau verhindert werden [1]. Insbesondere im Brückenmonitoring bieten sich zerstörungsfreie Prüfverfahren an, die auf Messungen und rechnerischer FE-Analyse beruhen. Durch iterative Modifikation numerischer Rechenmodelle an Messergebnisse am realen Bauwerk kann mithilfe von Model-Updating Verfahren [2] das FE-Modell an das reale Bauwerk adaptiert werden und eine objektive Zustandsbewertung erfolgen. Für eine Anbindung des FE-Modells an den digitalen Zwilling sind der Detaillierungsgrad und die Möglichkeiten der Schadensmodellierung sowie die Materialmodelle des FE-Modells wesentliche Einflussgrößen für eine realitätsnahe Repräsentation des Bauwerks.

2 Das Konzept des digitalen Zwillings im Brückenbau

Der digitale Zwilling (DT) kann im Rahmen eines SHM als virtuelle Nachbildung des physischen Bauwerks in Form mehrerer implementierter Modelle interpretiert werden. Die 3D-Oberflächenmodellierung erfolgt durch optische 3D-Messverfahren wie 3D-Laserscanner oder 3D-Punktwolken und gibt Informationen über die tatsächliche Geometrie und Oberflächenschädigungen [3], [4]. FE-Modelle werden über Messdaten an das reale Bauwerk adaptiert und können so objektive Aussagen über den aktuellen Systemzustand und Vorhersagen über das Bauwerksverhalten ermöglichen [5]. Die Visualisierung von Schädigungen im Rahmen einer FE-Modelladaption wird aufgrund der jedoch oftmals stark vereinfachten FE-Modelle, bspw. durch die Verwendung linear-elastischen Materialverhaltens, erschwert, wodurch es zu fehlerhaften Ergebnissen und einer unrealistischen Darstellung des realen Bauwerks kommen kann [4]. Die Geometrie- und FE-Modelle können in BIM-basierenden Datenbasen mit Informationen der Lebenszyklusphasen (z.B. Planung, Sanierungen und Betrieb) hinterlegt werden. Durch die Integration der aus den Modellen identifizierten Indikatoren für Schädigungen kann der digitale Zwilling für die kontinuierlichen Prognosen, Überwachung, Bewertung und Planung von Instandsetzungsmaßnahmen verwendet werden [5].

3 Schadensmodellierung von Massivbrücken mit der Finite-Elemente-Methode

3.1 Erfassung relevanter Schadensparameter

Die häufigste Schadensart an Brückenbauwerken stellt die Korrosion der Brückenlager und Verbindungen bzw. der Gelenke dar. Am Überbau und Unterbau treten Schäden in Form von freiliegender Bewehrung (Stahlkorrosion), Rissen und Betonabplatzungen auf. Schädigungen am Vorspannsystem sind deutlich seltener und begrenzen sich auf die Bereiche der Koppelstellen oder Hüllrohre [6]. Die verschiedenen Schadensarten können über Performance-Indikatoren (Schadensindikatoren) spezifiziert werden. Diese Indikatoren charakterisieren Eigenschaften des Tragwerks, womit der Zustand einer Tragwerksstruktur zu einem bestimmten Zeitpunkt beschrieben werden kann. Die Korrosion von Bewehrungsstahl kann beispielsweise über die Performance-Indikatoren der betroffenen Fläche [m²], die Messung des Chloridgehalts oder der Karbonatisierungstiefe und die prozentuale Beschädigung der Bewehrung [%] angegeben werden [7].

In FE-Simulationen können Schädigungen am Überbau über die Reduzierung der Biegesteifigkeit oder des Elastizitätsmoduls modelliert und als ein Parameter zusammengefasst werden [8], [9], [10], [11]. Für eine detailliertere Schadensdetektion kann im Rahmen einer nichtlinearen FE-Simulation der Parameterraum erweitert werden. Die Rissentwicklung ist durch die Zugfestigkeit des Betons, Rissorientierung, Rissenergie und Tension-Stiffening-Effekte beschreibbar [12], [13]. Ebenso können die Druckfestigkeit und die Wichte des Betons als Parameter festgelegt werden. Ein Spanngliedversagen ist durch einen Parameter f_p mit $0 \leq f_p \leq 1$ implementierbar [8]. Zur Modellierung von Lager- und Gelenkschädigungen können Dreh- bzw. Dehnfedern in das FE-Basismodell integriert und deren Steifigkeiten als Parameter berücksichtigt werden [8], [12].

3.2 Parameteridentifikation

Die Parameteridentifikation erfolgt bei einer FE-Modelladaption durch den Vergleich von gemessenen und numerischen Tragwerksreaktionen. Ein Optimierungsverfahren dient zur Bestimmung der adaptierten Modelleigenschaften innerhalb der Tragwerksstruktur, sodass die Abweichung zwischen gemessenen und numerischen Tragwerksreaktionen minimiert wird.

Mithilfe von mathematischen Funktionen können Eigenschaften einzelner Finite Elemente angepasst werden [9], [10]. Ein dimensionsloser Korrekturfaktor a passt den Parameter (bspw. die Biegesteifigkeit) B gegenüber seinem Anfangswert B_0 an:

$$a = -\frac{B - B_0}{B_0} \Rightarrow B = B_0(1 - a) \quad (1)$$

Da eine separate Bestimmung der Parameter jedes einzelnen Elementes zu großen Unterschieden in den Steifigkeitswerten zwischen benachbarten Elementen führen würde und somit den Steifigkeitsverlauf des Modells unrealistisch darstellt, kann der Korrekturfaktor mit mathematischen Funktionen über das Modell verteilt werden, was zu einer deutlich effizienteren Approximation der veränderlichen Biegesteifigkeit führt [14]:

$$a = \sum_{i=1}^n p_i N_i(x) \quad (2)$$

Der auf einen Abschnitt bezogene Schaden wird über die Funktion $N_i(x)$ definiert (siehe Abb. 1(a)), der Parameter p_i beschreibt die Intensität des Schadens ($0 \leq p_i < 1$) und wird innerhalb des Optimierungsverfahrens angepasst. Die endgültige Verteilung der Biegesteifigkeit ergibt sich durch die Korrektur des Anfangswertes B_0 durch die lineare Funktion $N_i(x)$:

$$B = B_0 \left[1 - \sum_{i=1}^n p_i N_i(x) \right] \quad (3)$$

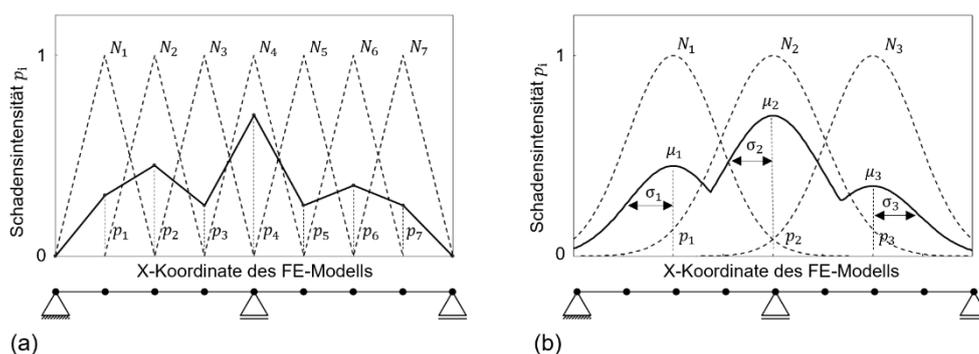


Abbildung 1: Funktionen zur Modellierung der Steifigkeitsabminderung: (a) Funktion zur Approximation der Biegesteifigkeitsverteilung (schwarz) und sieben lineare Schadensfunktionen (Strichlinien) [10]; (b) Approximation des Steifigkeitsverlaufs auf Grundlage von drei Gauß'schen Glockenkurven [8].

Die Genauigkeit des Steifigkeitsverlaufs kann durch Funktionen höherer Ordnung optimiert werden. Untersuchungen aus [8] ergaben eine realistische Approximation der Biegesteifigkeitsverteilung unter Einsatz von Gauß'schen Glockenkurven (siehe Abb. 1(b)):

$$N_i(x) = \exp\left(-\frac{(x - \mu_i)^2}{2 \cdot \sigma_i^2}\right) \quad (4)$$

Der approximierte Schaden wird um die Parameter μ_i (Lage des Scheitelpunktes) und σ_i (Standardabweichung der Glockenkurve) erweitert.

4 Anwendungsbeispiel: Schadensmodellierung an einem Brückenbauwerk

4.1 Validierungsbauwerk

Die Schadensmodellierung wird im Rahmen eines Structural-Health-Monitorings innerhalb des DFG-Schwerpunktprogramms 2388 „SPP 100+“ eingesetzt. Ausführliche Informationen des prototypischen Überwachungskonzepts werden in [15] beschrieben.

Das Validierungsbauwerk (siehe Abb. 2) – die Strombrücke der Nibelungenbrücke (B47) – verbindet die Städte Worms (Rheinland-Pfalz) und Lampertheim-Rosengarten (Hessen). Die Spannbetonbrücke wurde zwischen 1949 und 1957 gebaut und entstand als erste Brücke, die im Freivorbauverfahren errichtet wurde. Die Stützweiten der drei Hauptöffnungen betragen 98,63 m – 114,22 m – 96,17 m. Zuzüglich der beiden Vorlandbrücken beträgt die Gesamtspannweite insgesamt 744 m. Im Zuge einer Generalinstandsetzung zwischen 2005 und 2013 wurde die Längsvorspannung durch externe Zusatzvorspannung unterstützt, die Querkraftbewehrung ergänzt und die Scheitelgelenke instandgesetzt.

4.2 FE-Modellierung

Zur detaillierteren Repräsentation des digitalen Zwillings und einer möglichst exakten Modellierung von Schädigungen wurde ein parametrisiertes FE-Modell der Brücke mit insgesamt 713620 Knoten an 34670 3D-Volumenelementen (siehe Abb. 3) der Typen CHX60, CPY39, CTE30 und CTP45 mit dem Finite Elemente-Programm DIANA FEA [16] modelliert. Die Geometrie der Spannglieder und der statisch erforderlichen Betonstahlbewehrung wurde exakt nachgebildet und deren Steifigkeit den zugehörigen Elementen hinzugefügt. Die Berechnung berücksichtigt neben geometrischen Nichtlinearitäten auch das komplexe Materialverhalten von Beton. Das Materialmodell umfasst neben den linearen Materialparametern auch das Rissmodell, das Zug-, Druck- und Schubverhalten, die Rissenergie und die Dämpfung. Die Biegesteifigkeitsverteilung des Über- und Unterbaus wird über das E-Modul, die Zug- und Druckfestigkeit, die Vorspannung und den Querschnitt der Betonstahlbewehrung definiert. Die Parameter des Stahlbetons können für jeden Vorbauabschnitt und Pfeiler individuell festgelegt werden. Die parametrisierte Vorspannung ist in Gruppen aufgeteilt. Die Steifigkeit der Gelenke und Lager wird über die Materialeigenschaften der Scheitelgelenke und die Steifigkeit des Stahlbetons simuliert. Belastungen in Form von Fahrzeuggewicht und -position können auf beide Fahrstreifen der Brücke aufgebracht werden.

Die Einwirkung auf die Fahrstreifen infolge Verkehrsbelastung erfolgt mit Flächenlasten nach Lastmodell 1 des Eurocode Teil 1-2 [17], Wind- und Temperaturbeanspruchungen wurden für die Parameteridentifikation bisher nicht berücksichtigt. Die Reduzierung der Materialparameter, der Vorspannung sowie die Steifigkeit der Scheitelgelenke erfolgt um 25 % bzw. 50 %, Art und Position der abgeminderten Parameter sind in Tab. 1 und Abb. 2 dargestellt. Die Abminderung des jeweiligen Parameters erfolgt über eine (zunächst für die Parameteridentifikation) konstante Schadensfunktion.

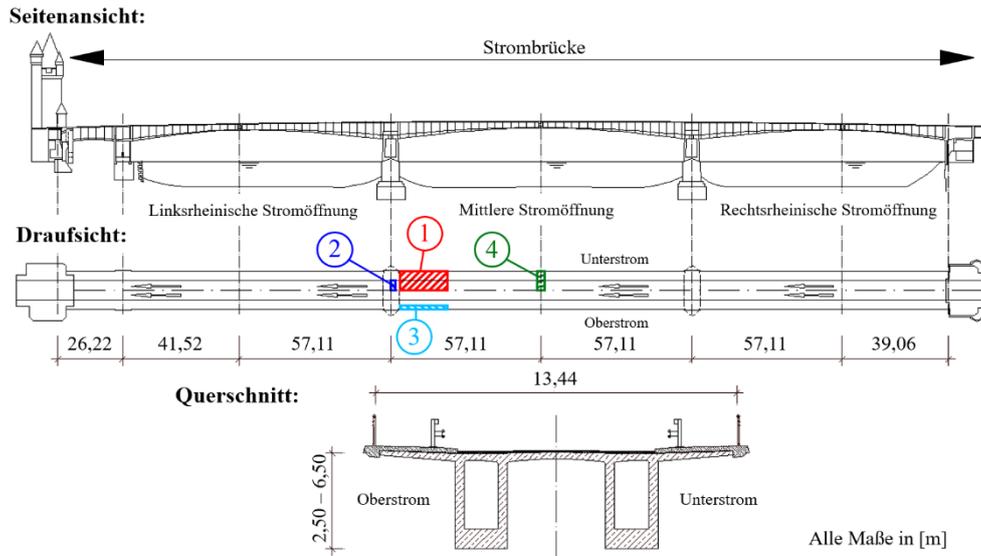


Abbildung 2: Anwendungsbeispiel: Strombrücke der Nibelungenbrücke (B47) in Worms und Positionen der abgeminderten Parameter (farbig)



Abbildung 3: Finite Elemente Modell

Position	Ort und abgeminderte Parameter (um 25 % und 50 %)
1	Abminderung des E-Moduls, der Druckfestigkeit, der Zugfestigkeit des Betons und der Bewehrungsmenge (Steg und Platte, Unterstrom)
2	Vorspannkraft in Längsrichtung (in Richtung der mittleren Stromöffnung)
3	Vorspannkraft in Querrichtung (Platte, Oberstrom)
4	Steifigkeit des Scheitelgelenks (Unterstrom)

Tabelle 1: Position und Ort der variierten Parameter des FE-Modells

4.3 Ergebnisse der Parameteridentifikation und Schadensmodellierung

Zur Identifikation von relevanten Parametern und aussagekräftigen Performance-Indikatoren wurden die Modelleigenschaften des Tragwerks parametrisiert und die durchschnittlichen Änderungsraten von Dehnungen, Verformungen und Horizontalverschiebungen in Abhängigkeit des jeweilig variierten Parameters in Tab. 2 dargestellt. Die Messung der Dehnungen und Verformungen erfolgt an der Ober- und Unterkante beider Stege, sowie an der Fahrbahnplatte in einem Abstand von 6,0 m. Die Horizontalverschiebung der Scheitelgelenke wird an den Lagern der Gelenke aufgenommen.

Parameter (Abminderung um 50 %)	Durchschnittliche Änderung der Dehnungen [%]	Durchschnittliche Änderung der Verformungen [%]	Durchschnittliche Änderung der Horizontalverschiebung an den Scheitelgelenken [%]
E-Modul	41,71 %	7,83 %	7,52 %
Druckfestigkeit	0,22 %	0,04 %	0,03 %
Zugfestigkeit	0,18 %	0,02 %	0,08 %
Bewehrungs- fläche	0,08 %	0,02 %	0,01 %
Vorspannkraft (X-Richtung)	52,70 %	4,63 %	10,13 %
Vorspannkraft (Y-Richtung)	2,46 %	0,22 %	0,35 %
Steifigkeit der Scheitelgelenke	2,06 %	0,15 %	2,90 %

Tabelle 2: Ergebnisse der Parameteridentifikation

Der Einfluss der Betondruck- und Zugfestigkeit auf die Dehnungen und Verformungen des Bauwerks sind im Verhältnis zu deren Abminderung als sehr gering zu spezifizieren. Diese Parameter sind wenig aussagekräftig und werden somit für weitere Berechnungen vernachlässigt bzw. in Abhängigkeit des E-Moduls gesetzt. Der Querschnittsverlust der Betonstahlbewehrung hat aufgrund seines geringen Anteils an der Steifigkeit keine messbare Auswirkung auf die Reaktion des Tragwerks. Ebenso konnte bei den Simulationen, übereinstimmend mit Beobachtungen am Referenzbauwerk, keine Rissentwicklung festgestellt werden. Die Modellierung von Betonabplatzungen oder Kiesnestern kann über eine Abminderung des E-Moduls der Elemente erfolgen und über lokale Dehnungsänderung (siehe Abb. 4(a)) und den Verlauf der Biegelinie als Schaden klassifiziert werden. Schädigungen am Vorspannsystem in Längs- und Querrichtung sind über die Vorspannkraft implementierbar. Ein Schaden der Vorspannung in Längsrichtung kann über Dehnungsänderungen über einen größeren Abschnitt (siehe Abb. 4(b)) in Kombination mit Änderungen der Horizontalverschiebungen an Scheitelgelenken spezifiziert werden. Schädigungen der Vorspannung in Querrichtung sind über Dehnungsänderungen der Platte in Querrichtung identifizierbar. Schäden an Gelenken können über die Steifigkeitsabminderung im Bereich des Gelenks simuliert und mit Horizontalverschiebungen am Gelenk selbst identifiziert werden.

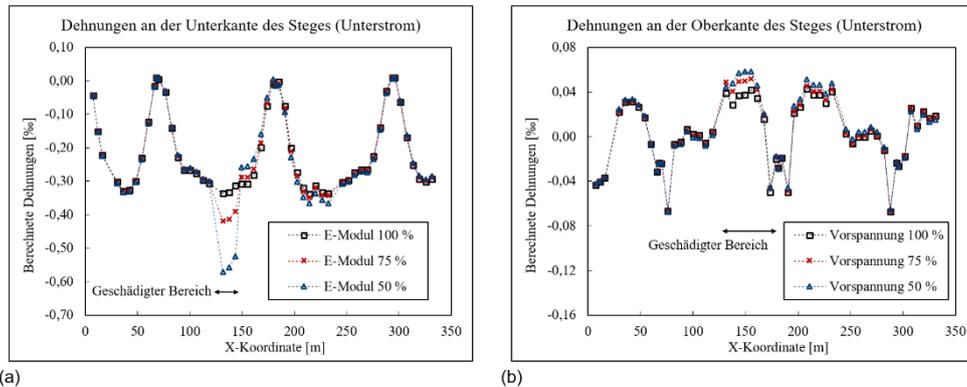


Abbildung 4: Berechnete Dehnungen an Ober- und Unterkante des Steges: (a) Dehnungsänderung infolge einer Reduzierung des E-Moduls; (b) Dehnungsänderung infolge reduzierter Vorspannkraft.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Präzise numerische Rechenmodelle, der steigende Informationsaustausch durch BIM sowie Fortschritte im Gebiet der Messtechnik ermöglichen innovative und nachhaltige Möglichkeiten der Zustandsüberwachung und Schadensdiagnose eines Tragwerks und dessen Repräsentation durch den digitalen Zwilling. Mit leistungsstarken und detaillierten nichtlinearen 3D-FE-Modellen können Schädigungen durch einen höheren und aussagekräftigeren Parameterraum exakter modelliert und detektiert werden. Durch die Kombination von Messergebnissen und Materialparameter können Performance-Indikatoren zur Beschreibung möglicher Schädigungen spezifiziert und Schäden lokalisiert werden. Für eine realitätsnahe Modellierung von Schäden ist die Implementierung von 3D-Schadensfunktionen höherer Ordnung [11] sowie weitere Untersuchungen der Einwirkungsparameter, wie unterschiedlicher Belastungssituationen infolge Verkehrs- oder Temperaturbeanspruchungen, notwendig. Durch Variation der Schadens- und Belastungsparameter werden anschließend Sensitivitätsstudien durchgeführt, um deren Einflüsse auf das Tragverhalten zu untersuchen und zu bewerten.

Literatur

- [1] DEUTSCHER BETON- UND BAUTECHNIK-VEREIN E.V. Merkblatt Brückenmonitoring. Planung, Ausschreibung und Umsetzung, Berlin, 2018
- [2] EREIZ, S.; DUVNJAK, I.; JIMÉNEZ-ALONSO, J.F. Review of finite element model updating methods for structural applications. Structures, Volume 41 (2022), S. 684-723
- [3] HOSAMO, H.H.; HOSAMO, M.H. Digital Twin Technology for Bridge Maintenance using 3D Laser Scanning: A Review. Advances in Civil Engineering, Volume 2022 (2022), 2194949

- [4] HONGHONG, S.; GANG, Y.; HAIJIANG, L.; TIAN, Z.; ANNAN, J. Digital twin enhanced BIM to shape full life cycle digital transformation for bridge engineering. *Automation in Construction*, Volume 147 (2023), 104736
- [5] YE, C.; BUTLER, L.; CALKA, B.; IANGURAZOV, M.; LU, Q.; GREGORY, A.; GIROLAMI, M.; MIDDLETON, C. A Digital Twin of Bridges for Structural Health Monitoring. In: Chang, F.-K.; Güemes, A.; Kopsaftopolos, F. (Hrsg.) 12th International Workshop on Structural Health Monitoring 2019. Stanford University, 2019, S. 1619-1626
- [6] SCHNELLENBACH-HELD, M.; PEETERS, M. Einwirkungen und Schäden von Massivbrücken erfassen und bewerten. In: Krieger, J.; Isecke, B. (Hrsg.) 1. Brückenkolloquium „Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken“. Technische Akademie Esslingen, 2014, S. 189-200
- [7] STRAUSS, A.; IVANKOVIC, A.M.; MOLD, L.; BERGMEISTER, K.; MATOS, J.C.; CASAS, J.R. Performance-Indikatoren für die Bewertung von Strukturen aus Konstruktionsbeton auf europäischer Ebene nach COST TU1406. *Bautechnik*, Volume 95 (2) (2018), S. 123-138
- [8] KARCEWSKI, B. Strukturidentifikation von Massivbrücken auf Grundlage einer Dauerüberwachung [Dissertation]. TUDpress, Duisburg-Essen, 2016
- [9] UNGER, J.F.; TEUGHELS, A.; DE ROECK, G. System Identification and Damage Detection of a Prestressed Concrete Beam. *Journal of Structural Engineering*, Volume 132 (11) (2006), S. 1691-1698
- [10] TEUGHELS, A.; DE ROECK, G. Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 278 (2004), S. 589-610
- [11] FANG, S.E.; PERERA, R.; DE ROECK, G. Damage identification of a reinforced concrete frame by finite element model updating using damage parameterization. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 313 (2008), S. 544-559
- [12] MERCAN, B.; SCHULTZ, A.E.; STOLARSKI, H.K. Finite element modeling of prestressed concrete spandrel beams. *Engineering Structures*, Volume 32 (9) (2010), S. 2804-2813
- [13] YAPAR, O.; BASU, P.K.; NORDENDALE, N. Accurate finite element modeling of pretensioned prestressed concrete beams. *Engineering Structures*, Volume 101 (2015), S. 163-178
- [14] TEUGHELS, A.; MAECK, J.; DE ROECK, G. Damage assessment by FE model updating using damage functions. *Computers & Structures*, Volume 80 (25) (2002), S. 1869-1879
- [15] STEINER, D.; SPRENGER, B. Moderne Konzepte im Massivbau – über Potentiale von Methoden der künstlichen Intelligenz. *Bautechnik*, Volume 100 (2023), S. 344-350
- [16] DIANA FEA, Advanced Finite Element Analysis Solutions, <https://dianafea.com/>, Release 10.7, DIANA FEA BV, 2023
- [17] Eurocode 1: DIN EN 1991-2, Einwirkung auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, 12/2010