Der Digitale Zwilling zur Überwachung der Filstalbrücken

Ein innovativer Ansatz für eine messwertgestützte Zustandsbewertung

ALEX LAZOGLU | FREDERIK WEDEL | JENS MÜLLER | STEFFEN MARX

Der ressourcenschonende Erhalt der Verkehrsinfrastruktur gewinnt zunehmend an Bedeutung. Durch das derzeitig reaktive Erhaltungsmanagement werden Maßnahmen erst dann eingeleitet, wenn es der Bauwerkszustand erfordert. Kurzfristige Reaktionen können zu unvorhergesehenen Verfügbarkeitseinschränkungen der Infrastruktur führen und damit hohe volkswirtschaftliche Schäden verursachen. Ein Digitaler Zwilling vereint die Anwendung fortschrittlicher Technologien, wie hochwertige Messtechnik, automatisierte Datenanalysen und strukturiertes Datenmanagement, und kann perspektivisch damit zur Prädiktivität beitragen. Für die Filstalbrücken der Deutschen Bahn AG (DB) existiert seit der Inbetriebnahme im Dezember 2022 ein solcher Zwilling. Er vereint Inspektionsergebnisse, Tragsicherheitsnachweise und Messdaten und aggregiert diese kontinuierlich zu einem aktuellen und objektiven Brückenzustand.

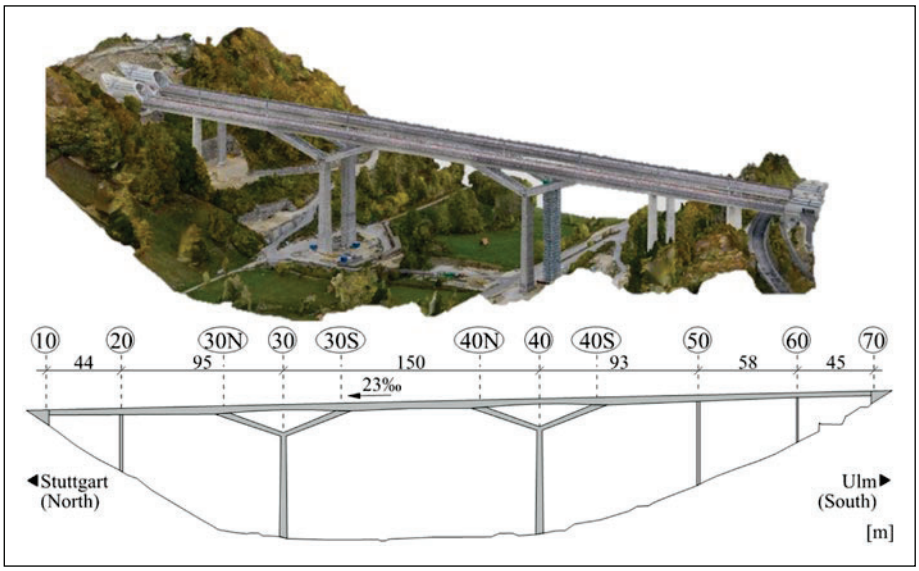

Abb. 1: Punktwolkenmodell (oben) und Ansicht der Filstalbrücke (unten)

Quelle: Infralytica GmbH, MKP GmbH

Digitale Zwillinge für die Instandhaltung von Brücken

Im Jahre 2015 haben die Vereinten Nationen einstimmig die Agenda 2030 mit 17 Zielen für eine nachhaltige Entwicklung verabschiedet. Dabei handelt es sich um globale Bestrebungen, die sich unter anderem auf die Entwicklung einer nachhaltigen, zuverlässigen und ressourceneffizienten Infrastruktur bis zum Jahr 2030 beziehen [1]. Die deutsche Erhaltungsstrategie für Straßen- und Eisenbahnbrücken berücksichtigt die genannten Ziele und ist durch den Grundsatz „Erhalt vor Neubau" gekennzeichnet [2].

Während des Lebenszyklus einer Brücke fallen große Mengen heterogener Daten an, die sowohl in Papierform als auch digital in verschiedenen Archiven und Datenbanken gespeichert werden. In der Regel sind die Daten dezentral, nicht miteinander verknüpft und nicht geometrisch am Bauwerk verortet. Eine optimale Zustandsbewertung der Infrastruktur erfordert eine ganzheitliche, kontextualisierte Betrachtung aller Brückendaten. Nur so kann das Erhaltungsmanagement langfristig optimiert werden.

Der technische Fortschritt und die Digitalisierung sind dazu bereits jetzt in der Lage. Digitale Zwillinge werden in anderen Branchen vielfältig als Abbild realer Objekte eingesetzt. Die ständige Interaktion mit dem überwachten, realen Objekt und die Zusammenführung verschiedener Daten ermöglicht eine hochaktuelle Zustandsbewertung. Informationen werden nachhaltig gespeichert, verortet, miteinander verknüpft und gemeinsam bewertet. Der Übertrag auf das Bauwesen hätte einen positiven Einfluss auf die Lebensdauer von Bauwerken und damit auf den Erhalt der Infrastruktur. Einige erste Umsetzungen zeigen bereits Ansätze und Erfahrungen bei der Erstellung von Digitalen Brückenzwillingen in der Praxis [3-6]. Der Vergleich dieser Praxisbeispiele verdeutlicht die heterogenen Ansätze. International sind bereits erste Richtlinien veröffentlicht [7, 8]. In [9] werden mögliche Anwendungsfälle für Digitale Zwillinge von Brücken definiert.

Mit den Filstalbrücken wurde erstmals ein Digitaler Zwilling für eine Eisenbahnbrücke in Deutschland erstellt und bildet somit ein Pilotprojekt für die Integration von Digitalen Zwillingen in die Brückeninstandhaltung.

Die Filstalbrücken

Die Filstalbrücken sind zwei nahezu baugleiche, parallel verlaufende eingleisige Eisenbahnbrücken auf der Strecke Stuttgart – Ulm im Südwesten Deutschlands. Als semiintegrale Bauwerke mit durchgehenden Trägern über sechs Felder und Bauwerkslängen von 472 m und 485 m überqueren die beiden Brücken das Filstal in 75 m Höhe und sind damit die drittthöchsten Eisenbahnbrücken Deutschlands (Abb. 1).

Die außerordentlich schlanken Pfeiler sind monolithisch an den Überbau angeschlossen. Dieser ist als längs vorgespannter Hohlkasten ausgeführt. Aufgrund der besonderen Bauweise gelten die Brücken als prestigeträchtig im Eisenbahnbrückenbau. Eine genauere Betrachtung der Konstruktionsdetails und der besonderen Konstruktionsmerkmale findet sich in [10].

Die Abweichungen von im Eisenbahnbrückenbau geregelten Bauweisen und normativen Grundlagen erfordern eine automatische und sensorbasierte Überwachung neuralgischer Bereiche. Zu diesen Besonderheiten gehören u. a. die nachfolgenden Punkte:

- Die Längsfesthaltungen je Bauwerk sind als Sonderkonstruktion, bestehend aus zwei sich kreuzenden Stahllamellen (Federlamellen) ausgeführt. Die Funktionsfähigkeit ist relevant für die Standsicherheit der Bauwerke (Abb. 2, links).
- Die Führungslager begrenzen die Querverschiebung des Bauwerks und somit des Schienenoberbaus. Die Funktionsfähigkeit bestimmt daher maßgeblich die Verkehrssicherheit der Bauwerke (Abb. 2, rechts).

Beleg-E-Paper der Ausgabe EI 2/24; Veröffentlichung des eigenen Beitrags im unternehmenseigenen Inter- und Intranet sowie auf Social-Media-Plattformen unbefristet genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Abb. 2: Neuralgische Bereiche der Filstalbrücken – Federlamelle (links) und Führungslager (rechts) *Quelle Abb. 2, 3, 5, 6: MKP GmbH*

Monitoringsystem zur Dauerüberwachung

Die Überwachung des Zustandes und der Tragsicherheit der neuralgischen Bereiche erfolgt über eine messtechnische Erfassung physikalischer Bauwerksreaktionen und Umgebungsbedingungen mit insgesamt 192 Sensoren. Darunter sind verteilt angeordnete Dehnmessstreifen an den Federlamellen zur Erfassung lokaler Beanspruchungen und deren Umrechnung in globale Schnittgrößen. Im Bereich der Bauwerksübergänge zu den Dammbereichen erfassen Wegaufnehmer und Inklinometer Relativverformungen wie Translationen und Verdrehungen der Bauwerke. Diese Verschiebungen werden genutzt, um die Funktionsfähigkeit der für die Betriebssicherheit relevanten Komponenten wie die Führungslager, Ausgleichsplatten und Schienenstützpunkte zu überwachen. Die Beanspruchungen in den filigranen Pfeilern werden an verschiedenen Querschnitten mithilfe von Dehnmessstreifen und Temperatursensoren überwacht. Diese wurden vor der Betonage an den Bewehrungsstäben appliziert und messen damit alle entstehenden Beanspruchungen ab Stunde Null.

Die Abb. 3 zeigt einen groben Überblick über die am Bauwerk applizierten Sensoren.

Die aufgezeichneten Messdaten werden automatisch von der Messanlage vor Ort auf eine cloudbasierte Datenbank übertragen und anschließend durch automatisierte Auswerteprozesse zu Informationen verarbeitet. Dazu gehören u.a. Algorithmen zur Umrechnung der elektrischen in physikalische Größen, die Bereinigung von Messfehlern sowie die Umrechnung der physikalischen in die zu bewertende Größe (z.B. Schnittgröße). Angeknüpft an die Auswertung erfolgt eine automatisierte Datenbewertung durch Gegenüberstellung von Schwellenwerten.

Bei einer Schwellenwertüberschreitung werden die entsprechenden Stakeholder nach einer Plausibilitätsprüfung sofort benachrichtigt. Die Verantwortlichen leiten vordefinierte Gegenmaßnahmen für die entsprechenden Überwachungsbereiche ein. So kann beispielsweise der Verschleiß der Führungslager frühzeitig erkannt und eine Instandsetzungsplanung mit ausreichend Vorlaufzeit eingeleitet werden.

Digitale Zwillinge der Filstalbrücken

Im Allgemeinen kann unter dem Begriff „Digitaler Zwilling" das digitale Abbild eines physischen Objektes verstanden werden. Standardisierte Definitionen gibt es bisher nicht. Verschiedene Autoren [11-14] verwenden verschiedene Charakteristika, um Digitale Zwillinge zu beschreiben, darunter die Informationstiefe, die Intelligenz, die menschliche Unabhängigkeit, die Realitätsnähe und die Autonomie des digitalen Abbildes sowie den Grad der Konnektivität zwischen dem realen Objekt und dem digitalen Abbild. Die Konzeption des Digitalen Zwillings für die Filstalbrücken war zunächst losgelöst von bestehenden Charakteristika. Das Ziel war es, den Digitalen

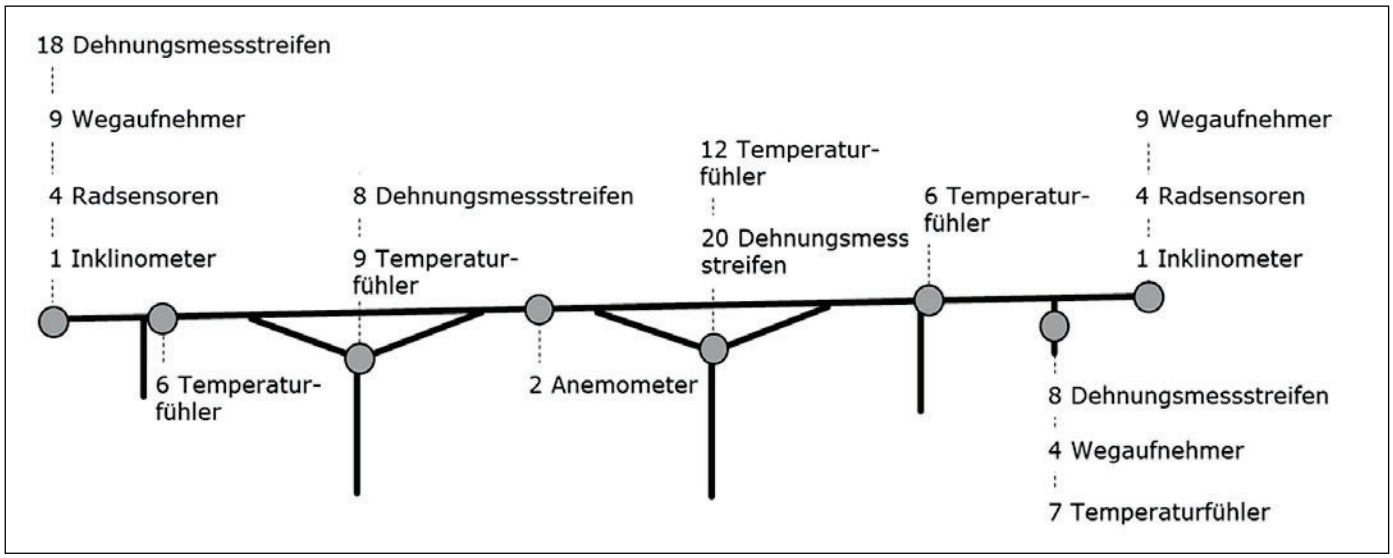

Abb. 3: Vereinfachtes Messlayout der Filstalbrücken

Beleg-E-Paper der Ausgabe EI 2/24; Veröffentlichung des eigenen Beitrags im unternehmenseigenen Inter- und Intranet sowie auf Social-Media-Plattformen unbefristet genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Zwilling gemeinsam mit Brückenprüfern und Statikern so zu entwickeln, dass er sich in das Bewertungskonzept des aktuellen Erhaltungsmanagements integriert und darüber hinaus Informationen nachhaltig und präzise verortet.

Geometrisches Brückenmodell

Für die genaue Lokalisierung der vielfältigen Informationen im Digitalen Zwilling ist ein geometrisches Modell der Brücken notwendig. Als Grundlage dient das BIM-Bauwerksmodell (BIM, Building Information Modeling) in Abb. 4, das bereits in der Planungs- und Herstellungsphase der Filstalbrücken verwendet wurde. Die Objekte im BIM-Modell wurden nach den geometrischen Abmessungen aus den Bauplänen und der vorgegebenen Brückenhierarchie des Datenstrukturmodells modelliert. Zusätzlich zum geometrischen Modell werden alle im Digitalen Zwilling enthaltenen Informationen, u.a. Messstellen und Zustände, als sogenannte Points of Interest (POI) modelliert. Jeder POI besitzt ein geometrisches Objekt mit einer dreidimensionalen Verortung und einer Verknüpfung zu einem Brückenelement.

Aufgrund der hohen Aktualisierungsrate einiger Informationen, insbesondere der des Monitorings, ist das BIM-Modell als alleinige Datengrundlage für den Digitalen Zwilling nicht geeignet. Durch den Aufbau einer zusätzlichen Datenbank wird ein Linked-Data-Ansatz verfolgt, bei dem das BIM-Modell zur Initialisierung der statischen Informationen, z.B. der Koordinaten der POI, verwendet wird. Dynamisch generierte Informationen wie beispielsweise die Zustandsinformationen aus der Überwachung der Führungslager werden in der Datenbank gespeichert und über das BIM-Modell geometrisch an den Bauwerken verortet. Das BIM-Modell bildet ebenfalls die Grundlage für die Visualisierung des Digitalen Zwillings.

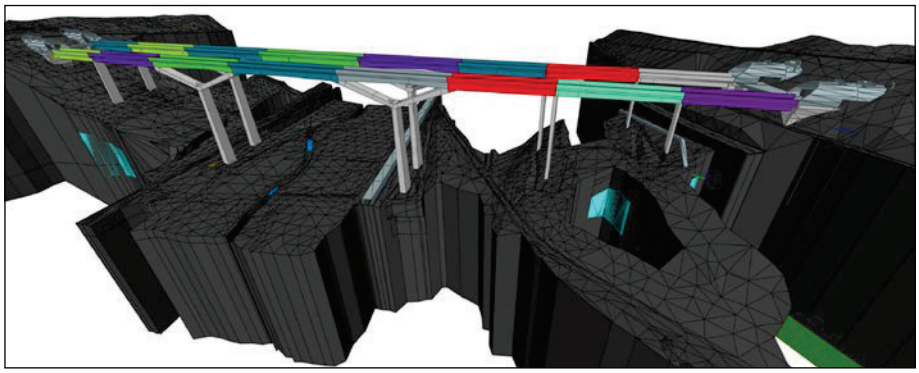

Abb. 4: Das 3D-Modell der Filstalbrücken *Quelle: DB Netz AG*

Struktur der Datenbank

In die Datenbank des Digitalen Zwillings der Filstalbrücken werden Informationen integriert, die einer unmittelbaren Bewertung dienen. Daten ohne Informationsgehalt, wie unverarbeitete Sensorrohdaten, werden in separaten Datenbanken gespeichert. Zur strukturierten Datenablage wurde zunächst ein Datenstrukturmodell entwickelt (Abb. 5). Die Struktur folgt der von der DB Netz AG festgelegten Bauwerkshierarchie (rot). Der Hierarchie werden die zuvor genannten POI zugewiesen (gelb), wobei sich diese wiederum in fünf Themenbereiche gliedern:

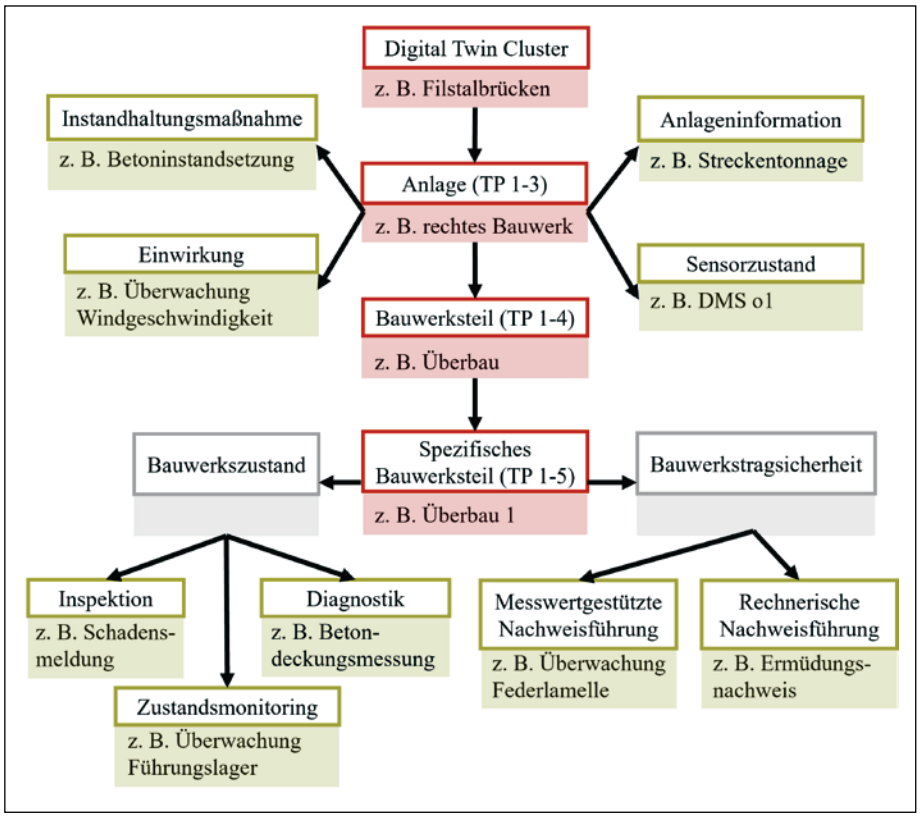

Abb. 5: Datenstruktur des Digitalen Zwillings

Brückenbestand

Allgemeine Bauwerksinformationen wie Abmessungen, Materialeigenschaften oder Streckeninformationen. Hier können auch die den Brückenbestand verändernden Instandhaltungsmaßnahmen verortet werden.

Bauwerkszustand

Schäden und Mängel aus regelmäßiger Sichtprüfung und ggf. diagnostischen Untersuchungen oder einem Monitoring. Diagnostische Untersuchungen können Aufschluss über strukturelle Schäden geben, die durch eine visuelle Inspektion nicht erkennbar sind. Ein Monitoring-Beispiel ist die Überwachung von Lagerbewegungen und damit möglichen Verschleißerscheinungen.

Bauwerkstragsicherheit

Rechnerische Nachweise geben Auskunft über die Tragsicherheit des Bauwerks. Über ein Monitoring können die Beanspruchungen realitätsnäher erfasst und in eine messwertgestützte Nachweisführung integriert werden.

Einwirkung

Überwachung der Einwirkungen, u.a. Windlasten und Gegenüberstellung der Bemessungsannahmen. Die Bewertung ist unabhängig von der Tragsicherheit des Bauwerkes, kann jedoch ein Indiz für eine erforderliche Nachrechnung geben.

Sensorzustand

Qualität der erzeugten Messdaten, einschließlich der Verfügbarkeit, Vollständigkeit und Vertrauenswürdigkeit der Daten.

Aggregationskonzept

Die Intelligenz des Digitalen Brückenzwillings liegt in seiner Fähigkeit, Brückeninformationen zu analysieren und zu bewerten. Erst durch die Bewertung kann ein Handlungsbedarf abgeleitet werden.

Der Brückenzustand wird mit einer Zustandskategorie nach Ril 804 [15] als ganzzahliger Wert von 1 bis 4 bewertet. Die Zustandska-

Beleg-E-Paper der Ausgabe EI 2/24; Veröffentlichung des eigenen Beitrags im unternehmenseigenen Inter- und Intranet sowie auf Social-Media-Plattformen unbefristet genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Abb. 6: Ansicht eines POI der Zustandsbewertung in Condition Control (exemplarische Bewertung)

tegorie wird für jedes Brückenelement auf Grundlage der Schäden und Mängel sowie ihrer Eigenschaften vergeben. Da es noch keine normativen Regelungen für die Bewertung von Informationen aus Diagnostik und Monitoring gibt, erfolgt zusätzlich zur Zustandskategorie die Bewertung mithilfe eines Handlungsbedarfes, der auf die Notwendigkeit einer Sonderprüfung aufmerksam macht. Je nach Kritikalität hat der Handlungsbedarf eine zweistufige Dringlichkeit.

Die Tragsicherheit des Bauwerks wird aus Informationen der rechnerischen und messwertgestützten Nachweise abgeleitet und durch einen eigenen Indikator dargestellt. Der Indikator ist ein Quotient, bestehend aus der rechnerisch (und messwertgestützt) ermittelten Streckenklasse und der zulässigen bzw. angestrebten Streckenklasse. Analog zum Bewertungskonzept des Brückenzustandes sind auch hier keine ausreichenden nor-

Beleg-E-Paper der Ausgabe EI 2/24; Veröffentlichung des eigenen Beitrags im unternehmenseigenen Inter- und Intranet sowie auf Social-Media-Plattformen unbefristet genehmigt / © DVV Media Group GmbH

mativen Regelungen für die automatisierte Bewertung von Messdaten vorhanden. Entsprechend erfolgt auch hier die Bewertung über einen Handlungsbedarf mit Dringlichkeitsabstufung, der auf die Notwendigkeit einer Nachrechnung aufmerksam macht.
Über die Messdatenqualität werden die Sensorzustände beobachtet und bewertet. Da Anomalien der Sensoren keinen direkten Einfluss auf das Bauwerk selbst haben, erfolgt die Bewertung getrennt von Brückenzustand und -tragsicherheit. Der Ansatz für die Einwirkungsüberwachung ist analog. Auch hier sind auffällige Belastungen nur indirekte Einflüsse und können nicht direkt in eine Bewertung von Brückenzustand und -tragsicherheit überführt werden. Sensorzustände und Einwirkungsüberwachungen werden über Handlungsbedarfe mit Dringlichkeitsabstufung bewertet.
Die Aggregation der Bewertungen erfolgt nach dem Datenstrukturmodell in Abb. 5 in den jeweiligen Brückenhierarchieebenen. Zustandsinformationen und Handlungsbedarfe werden automatisch von der untersten Brückenebene aufwärts übertragen. Die nächsthöhere Ebene zeigt dann die schlechteste Bewertung und den dringendsten Handlungsbedarf an. Dies geschieht bis zur Anlagenebene, sodass hier die schlechtesten Bewertungen thematisch geclustert zur Verfügung stehen.

Visualisierung und Navigation

Eine benutzerfreundliche und intuitive Informationsbereitstellung ist eine wesentliche Voraussetzung bei der Einbindung des Digitalen Zwillings in das aktuelle Instandhaltungsmanagement. Daher wurde die Plattform „Condition Control“ entwickelt, die im Folgenden kurz vorgestellt wird (Abb. 6).
Der Benutzer hat in der Seitenleiste Zugriff auf die Registerkarten „Allgemeine Bauwerksinformationen“, „Brückenzustand und -tragsicherheit“,„Sensorzustand“ und„Einwirkungsüberwachung“ und damit auf die fünf Themenbereiche der POI. Darüber hinaus gibt es die Registerkarte „Logbuch“, in der Änderungen der Plattform, u. a. Zustandsänderungen, protokolliert werden.

Beleg-E-Paper der Ausgabe EI 2/24; Veröffentlichung des eigenen Beitrags im unternehmenseigenen Inter- und Intranet sowie auf Social-Media-Plattformen unbefristet genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Die Ansicht in Abb. 6 zeigt die Auswahl eines POI in der Registerkarte „Brückenzustand und -tragsicherheit". Dieser beinhaltet die aggregierte Zustandsinformation aus der Überwachung der Lateralverschiebungen im Bereich der Führungslager. Durch die Verknüpfung zum BIM-Modell wurde bei der Auswahl des POI der relevante Bereich des Bauwerkes automatisch markiert und wurden alle weiteren ausgeblendet. Exemplarisch wurden für den POI Schwellenwertüberschreitungen generiert, um die Funktionsweise aufzuzeigen. Die Überschreitung erzeugt einen Handlungsbedarf und damit ein gelbes Ausrufezeichen sowie eine Meldung. Das gelbe Ausrufzeichen wird durch das Aggregationskonzept über alle Hierarchieebenen nach oben aggregiert und ist in der Statusanzeige neben der Zustandskategorie des Bauwerkes als Bedarf einer Sonderbegutachtung wiederzufinden.

Ausblick

In Zukunft wird der Digitale Zwilling sämtliche relevante Daten der Filstalbrücken auf einer benutzerfreundlichen Plattform in aggregierter Form bereitstellen. Dies ermöglicht Betreibern, einschließlich Anlagen- und Fachverantwortlichen, stets einen umfassenden und aktuellen Überblick über den Zustand und die Sicherheit der neuralgischen Bauwerksbereiche.

Bestehende sowie zukünftige Bauwerksdaten aus verschiedenen Quellen können mithilfe einer nachhaltigen Struktur in die Datenbank des Digitalen Zwillings integriert werden. Die Aggregationslogik reduziert dabei die Informationen auf wesentliche Parameter, die unmittelbar Handlungsbedarfe ableiten lassen. Die entwickelten Konzepte können in Zukunft weitreichend auf verschiedene Bauwerke und Verkehrsträger angewendet werden.

Die Definition von normativen Standards bildet die Grundlage für den zukünftigen Aufbau und Betrieb von Digitalen Zwillingen sowie die nahtlose Integration von Daten aus unterschiedlichen Quellen. Diese Standardisierung ist entscheidend, um die Vorteile des Digitalen Zwillings voll auszuschöpfen und eine effektive Unterstützung für den Betrieb der Infrastruktur sicherzustellen. Die Standardisierung erfordert eine systematische Zusammenstellung von Ideen und die Implementierung zahlreicher Digitaler Zwillinge, die sorgfältig im Rahmen von Pilotprojekten evaluiert werden müssen. Der Digitale Zwilling der Filstalbrücken leistet einen wichtigen Beitrag zu diesem Prozess. ■

QUELLEN

[1] United Nations (2022): The Sustainable Development Goals Report 2022, New York: United Nations Publications

[2] BMVI (2021) Masterplan BIM Bundesfernstraßen, Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

[3] Wenner et al. (2021): The Concept of Digital Twin to Revolutionise Infrastructure Maintenance: the Pilot Project smartBRIDGE Hamburg. 27th ITS World Congress, Hamburg, 11–15 October 2021, pp. 1–12

[4] Windmann, S. (2022): Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe B: Brücken und Ingenieurbau, Heft 178

[5] Hagen, A. (2022): Condition based monitoring and digital twins: Damage detection on a Norwegian bridge, in: Casas J. et al. (Ed.): Bridge Safety, Maintenance, Management, Lifecycle, Resilience and Sustainability, London: CRC Press, pp. 1724–1738

[6] Pregnolato, M. et al. (2022): Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure, Automation in Construction 141. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104421

[7] MEED (2021): Digital Evolution - The critical impact of digital twins on Middle East construction, Dubai: MEED

[8] Bolton, A. et al. (2018): The Gemini Principles: Guiding values for the national digital twin and information management framework, Centre for Digital Built Britain and Digital Framework Task Group

[9] Nieborowski, S. et al. (2023): Digitaler Zwilling Brücke im Betrieb – mögliche Anwendungsfälle, Bautechnik (100) 2023/2, pp. 86–93

[10] Zaidman, I. et al. (2022): Außergewöhnliche Eisenbahnbrücke über das Filstal – Entwurf, Planung und Ausführung des neuen Wahrzeichens von Baden-Württemberg. Bautechnik (99) 2022/4, pp. 262–271

[11] Grieves, M.; Vickers, J. (2017): Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in: Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., Alves, A. (Ed.): Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems – New Findings and Approaches, Springer Cham, pp. 85–113

[12] Kritzinger, W. et al. (2018): Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine 51 (11), pp. 1016–1022

[13] ARUP (2019): Digital Twin – Toward a meaningful framework. London: ARUP

[14] BuildingSMART (2022): Take BIM Process to the next level with Digital Twins [online]. BuildingSMART. https://www.buildingsmart.org/take-bim-processes-to-the-next-level-with-digital-twins, 26.10.2023

[15] Richtlinie 804 (2020): Richtlinie 804.8001 Inspektion von Ingenieurbauwerken – Allgemeine Grundsätze, DB Netz AG

Alex Lazoglu, M.Sc.
Fachteamleiter Digitaler Zwilling
MKP GmbH, Hannover
alex.lazoglu@marxkrontal.com

Frederik Wedel, M.Sc.
Bereichsleiter Analytics
MKP GmbH, Hannover
frederik.wedel@marxkrontal.com

Dipl.-Ing. Jens Müller
Leiter
Bauartverantwortung Ingenieurbau
DB InfraGO AG, Frankfurt a.M.
jens.za.mueller@deutschebahn.com

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
DB Netz AG – Stiftungsprofessur für Ingenieurbau
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden, Dresden
steffen.marx1@tu-dresden.de

Beleg-E-Paper der Ausgabe EI 2/24; Veröffentlichung des eigenen Beitrags im unternehmenseigenen Inter- und Intranet sowie auf Social-Media-Plattformen unbefristet genehmigt / © DVV Media Group GmbH