Praxisbeispiel 1: Digitaler Zwilling - Möglichkeiten und Chancen in der Erhaltung von Bauwerken am Beispiel der Nibelungenbrücke zu Worms

MR Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn · Leiter des Referats StB 24 Ingenieurbauwerke – BMDV

Unter Mitwirkung von

Dipl.-Ing Andreas Jackmuth, Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx, TU Dresden

Chris Voigt, M. Eng., MKP GmbH

Beweggründe für den Bauwerkserhalt mit Digitalen Methoden

Brücken an Bundesfernstraßen

Anzahl:	40.160 Brücken
Teilbauwerke:	52.491
Gesamtlänge:	2.180 km
Gesamtfläche:	31,54 Mio. m²
Anlagevermögen:	≈ 100 Mrd. €

(Stand 01.03.2024}

Die Nibelungenbrücke

Baukulturelle Bedeutung der Rheinbrücke bei Worms

- **1900 bis 1945:** „Ernst-Ludwig-Brücke“ als erste feste Straßenbrücke über den Rhein bei Worms
- **1950/51:** Bau der ersten freivorgebauten Spannbetonbrücke der Welt über die Lahn in Balduinstein (Stützweite = ~ 62 m)
- **1952/1953:** Bau der Nibelungenbrücke Worms als erste freivorgebaute Spannbeton-großbrücke (max. Stützweite = ~ 114 m) und als erste Spannbetonbrücke über den Rhein

Nibelungenbrücke Worms**:** Pionierbauwerk des Spannbetonbrückenbaus

Ernst-Ludwig-Brücke

Lahnbrücke Balduinstein

Nibelungenbrücke

Quelle: LBM

Die Nibelungenbrücke als Entwicklungs- und Testfeld für Digitale Zwillinge

Die Nibelungenbrücke - Bestandsdaten

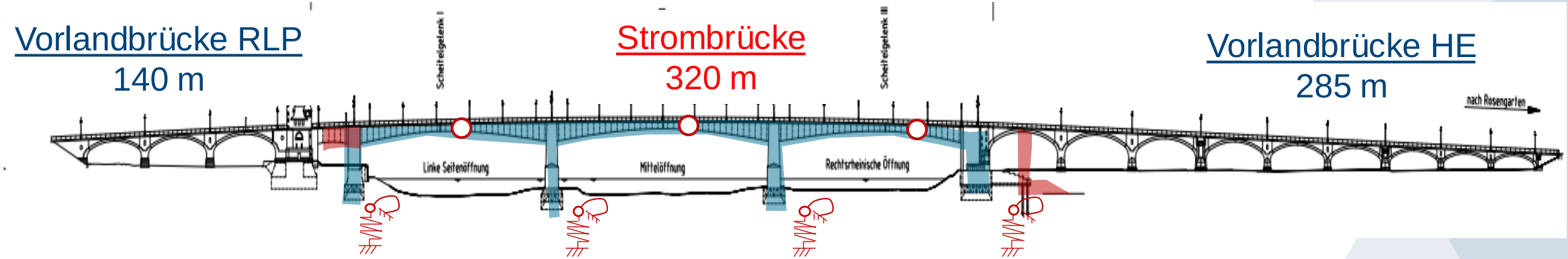
BAUZEIT 1951 - 1953

FREIVORBAU-SPANNBETONBRÜCKE

VORLANDBRÜCKEN AUS MAUERWERK UND STAMPFBETON

B47 FAHRTRICHTUNG WORMS

Statisches System der Nibelungenbrücke



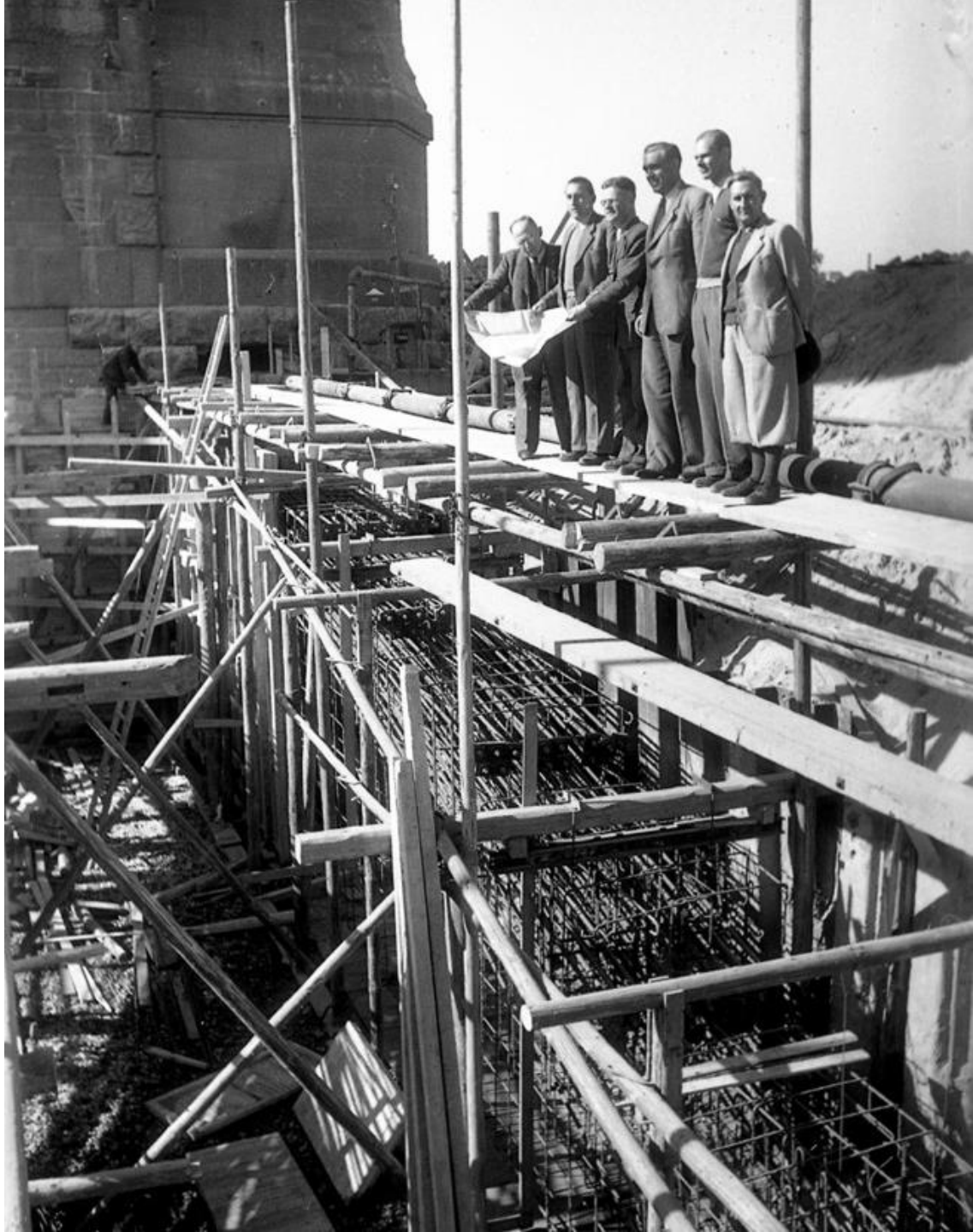
- Errichtung auf Caissongründung der „Ernst-Ludwig-Brücke“
  Stützweiten: 101,7 – 114,2 – 104,2 m
- Felder werden aus jeweils 2 Kragarmen gebildet, die in den Pfeiler eingespannt und über vorgespannte M-N-Gelenke miteinander verbunden sind; daher zwängungsfrei, keine ungleiche Durchbiegung
- Aufnahme des Kippmoments an den Brückenenden: Kragbalken mit Kontergewicht (RP), WL mit Auslegerbalken und Zuganker (HE)

Die Nibelungenbrücke

WAHRZEICHEN DER INGENIEUR-BAUKUNST SEIT 2022

Rechnerische Defizite

- HISTORISCHE NORMEN
- UNZUREICHENDE BIEGE- UND QUERKRAFTTRAGFÄHIGKEIT
- KEINE LASTBEDINGTEN SCHÄDEN
- NUR VERSTÄRKUNG BIEGETRAGFÄHIGKEIT MÖGLICH
- RESTNUTZUNGSDAUER??



Quelle: LBM

Bestandsbauwerk
Durchgeführte Erhaltungsmaßnahmen

- **1974:** Instandsetzung der Abdichtung/Fugen (erstmalig bituminöse Abdichtung)
- **1981:** weitere Nachbesserungen
- **2005/2006:** Nachrechnung
  ➔ Schubbew. erfüllt die normgemäßen Anforderungen bei Weitem nicht
- **2010 bis 2013:** angepasste Instandsetzung (Externe Vorspannung zur Erhöhung der Biegebruchsicherheit; kein Einbau von Spannstangen als Schubbewehrung)
- Restnutzungsdauer von 15 Jahren angepeilt

Erneuerung: Kappen, Abdichtung & Beläge

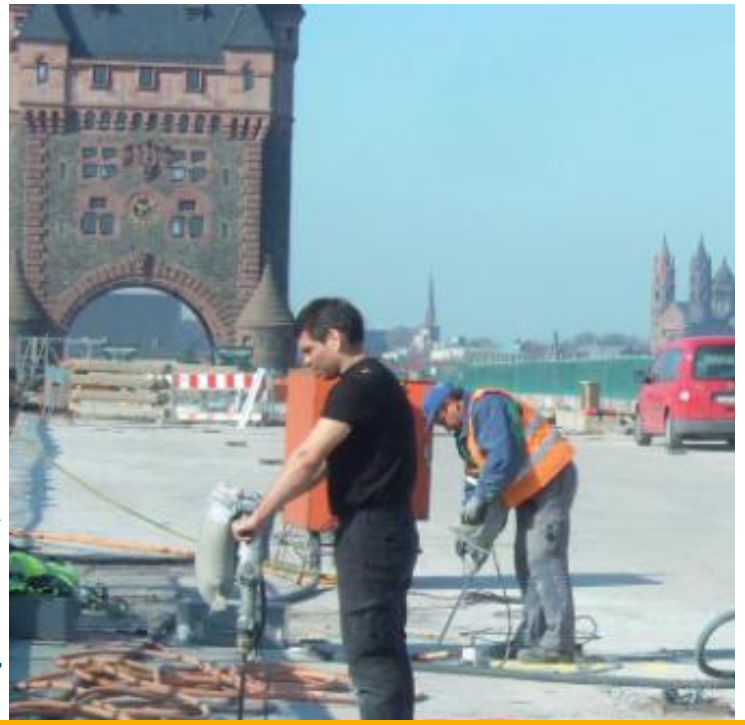
Betoninstandsetzung

Verstärkung mit externer Vorspannung

Quelle: LBM

Kenntnisse zum Bestandsbauwerk
Defizite in der Dauerhaftigkeit

ERKUNDUNGSBOHRUNGEN

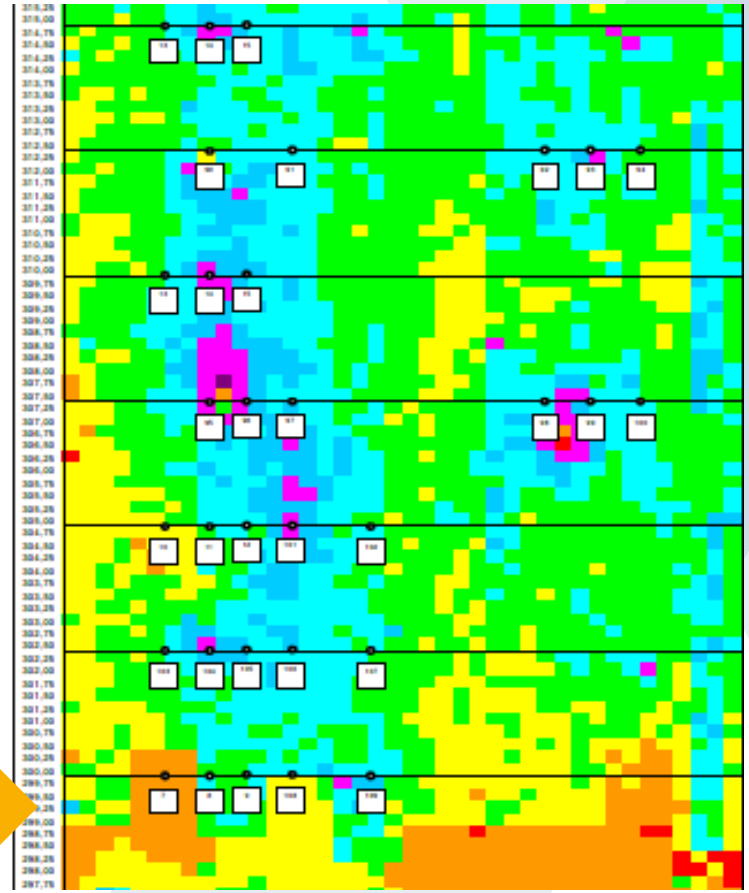


Quelle: E. Pelke; T. Zichner in Beton- und Stahlbetonbau 9/2015

KORROSION AM SPANNSTAHL

Quelle: KHP König und Heunisch Planungsgesellschaft mbH & Co.KG

POTENTIALFELDMESSUNGEN

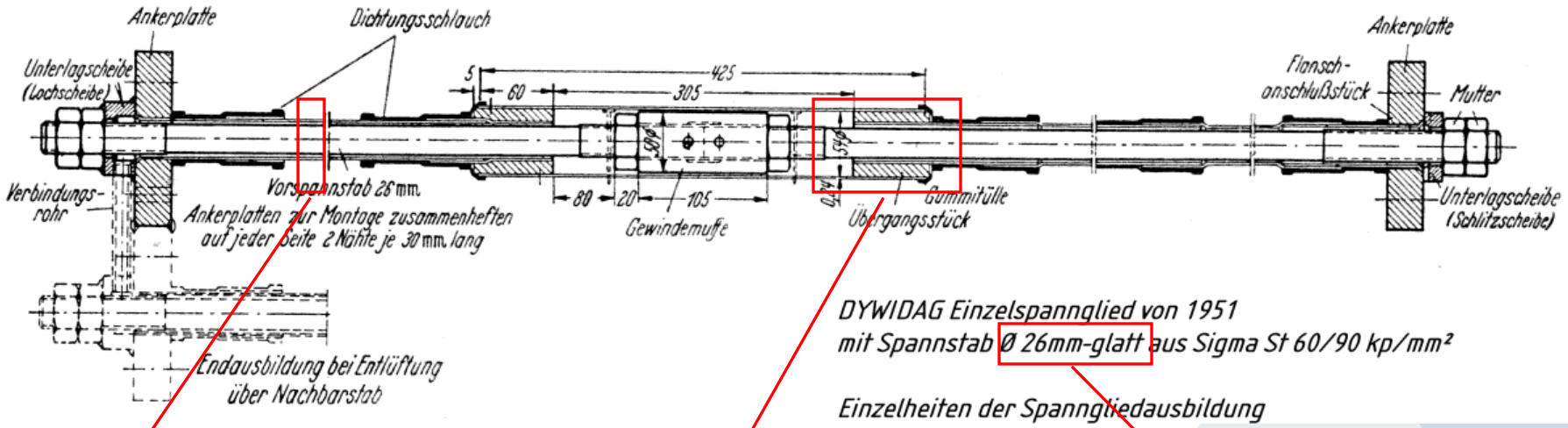


Quelle: Amt für Baustoff- und Bodenprüfung – AS Darmstadt

ERNEUERUNG ABDICHTUNG UND OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME NACH NORM

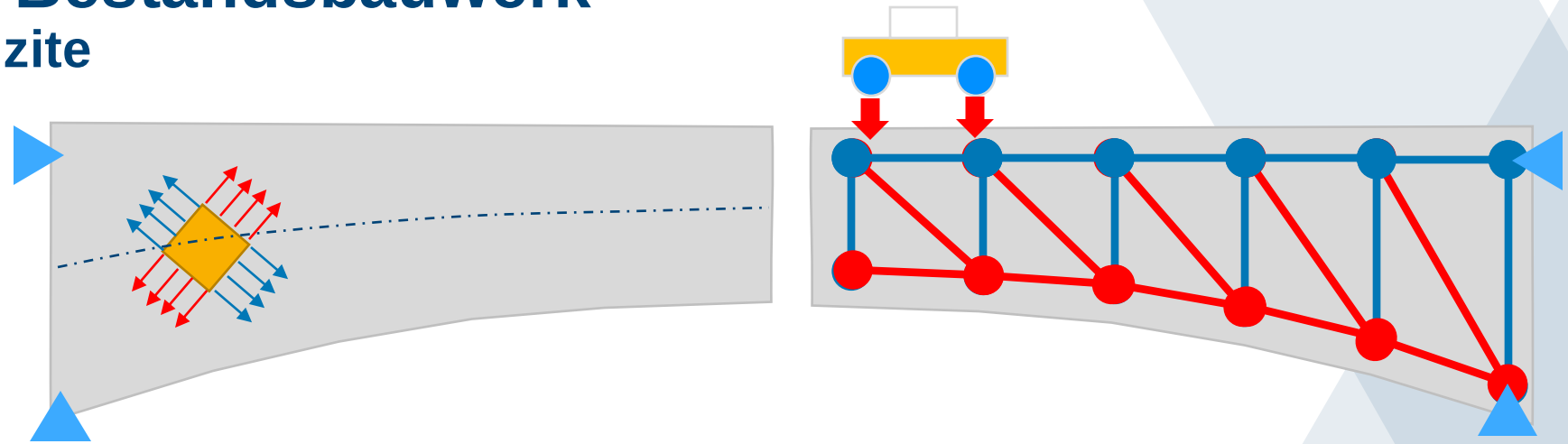
Kenntnisse zum Bestandsbauwerk
Bauzeitbedingte Defizite

Spannverfahren
DYWIDAG Ø26
St 60/90



Kenntnisse zum Bestandsbauwerk
Bauzeitbedingte Defizite

Schubtragfähigkeit (Nachrechnung 2005/2006)



früher: Schubsicherung erfolgte über den NW der Hauptzug-spannungen (DIN 4227, Ausg. 1951)

heute: Fachwerkmodell mit variabler Druckstrebenneigung

vorh a_s = 6,2 cm²/m << erf. a_s = 19,8 cm²/m

Schubnachweis mit dem Hauptspannungskriterium nach NRR 04/2015 gelingt ebenfalls nicht; Ankündigungsverhalten ist nachgewiesen (kein schlagartiges Bauwerksversagen)

LBM Rheinland-Pfalz
Zentrale
Zentrale Bauwerksprüfung

Teil-BW 6316873 B
Straße B 47
Bw-Amt LBM Worms
AM/SM SM Worms

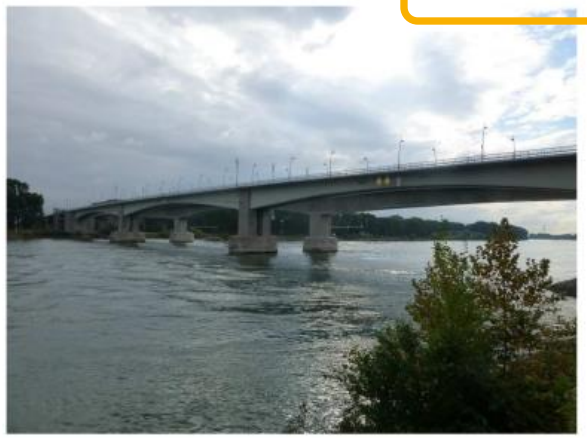
Prüfbericht 2021 E

nach DIN 1076

Bauwerksname NIBELUNGENBR. WORMS (B 47)
Teilbauwerksname Strombrücke
Kreis KFR. STADT WORMS
Ort 67547 Worms
Bauwerksrichtung Worms - Hessen

Bauwerksart Plattenbalkenbrücke, Trägerrostbrücke
Tragfähigkeit 60 nach DIN 1072
Baujahr Überbau 1953 Baujahr Unterbau 1953

Traglastindex IV



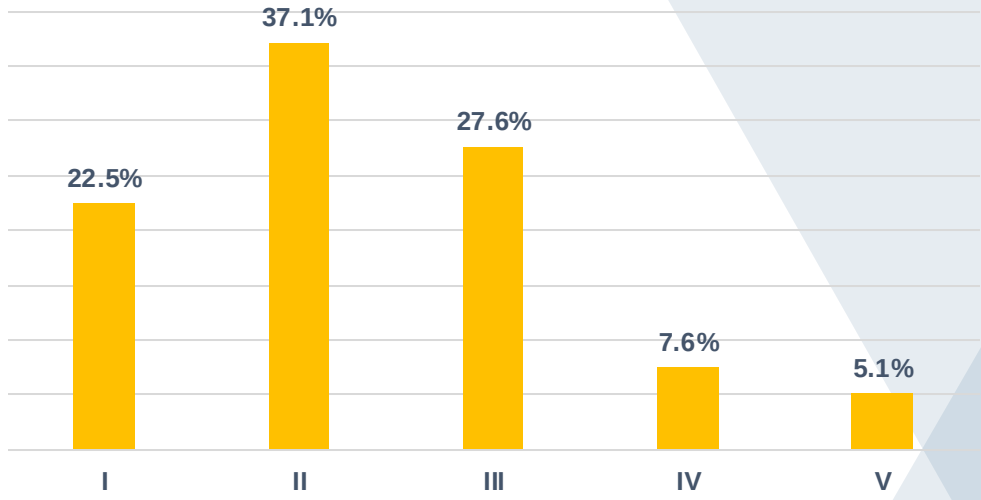
Prüfrichtung von Worms nach Bensheim(Hessen)
Prüfer Blomeier/Hergenröther
Prüfung vom 01.09.2021 bis 06.09.2021

Zustandsnote: 2,0

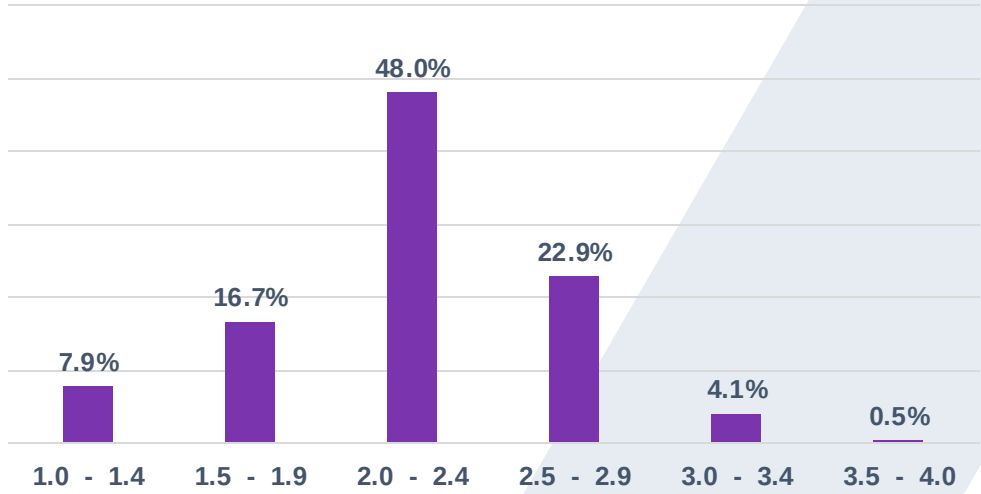
Straßen im Bauwerksbereich

Straße	Von Abschn.-nullpunkt	Nach Abschn.-nullpunkt	Netzkn.-abschnitt	Station Anfang	Station Mitte	Station Ende	Betriebs-KM Mitte	Lage	Baulast	Amt	AM/SM	UI	OD
B 47	6316034	6316018		--	4	--	0,000	oben	Bund	41	03		F

BRÜCKEN DER BUNDESFERNSTRAßEN
TRAGLASTINDEX NACH ANTEIL DER TEILBAUWERKE



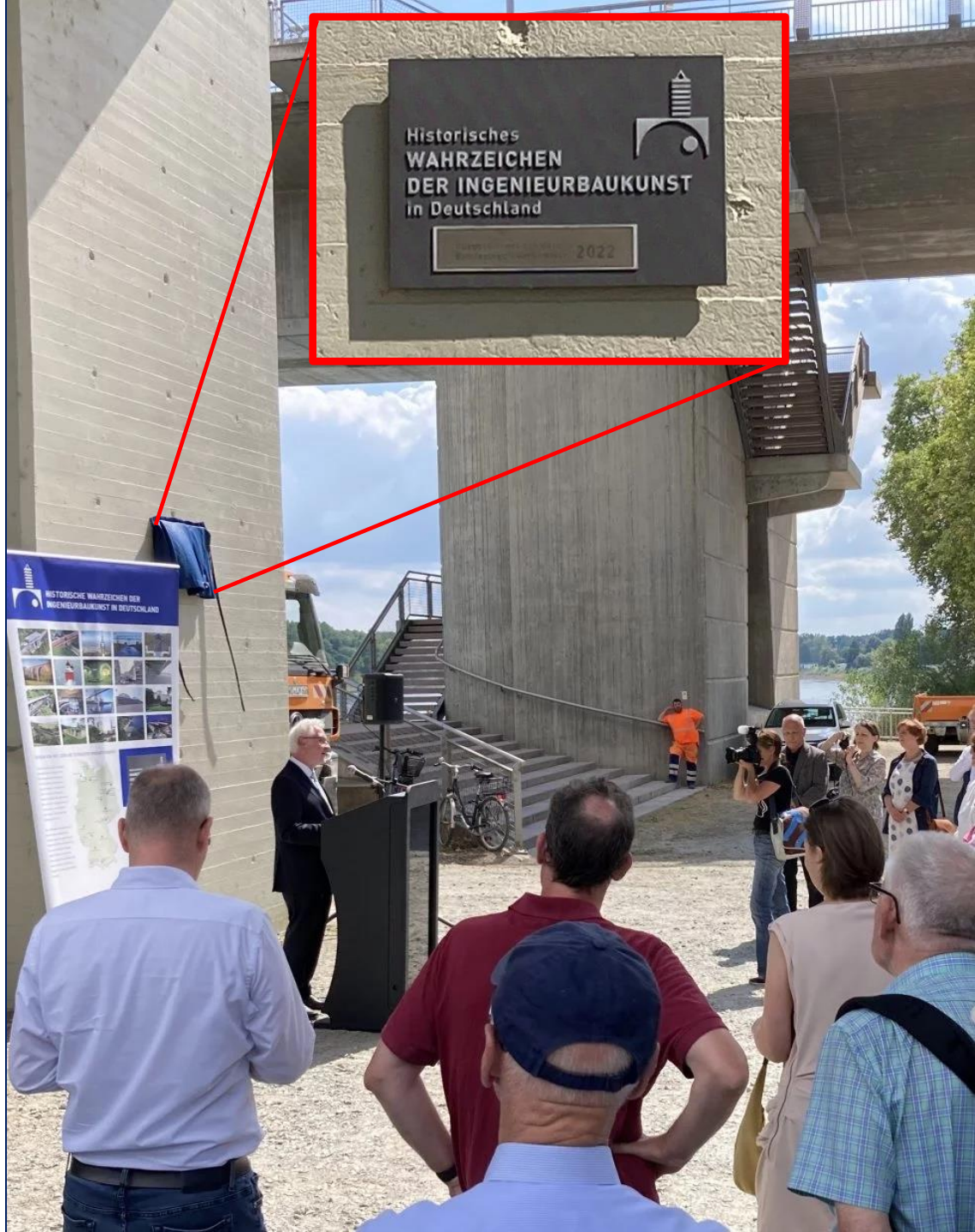
BRÜCKEN DER BUNDESFERNSTRAßEN
ZUSTANDSNOTEN NACH ANTEIL DER TEILBAUWERKE



Quelle: Brückenstatistik BASt, Stand 01.09.2023

Bestandsbauwerk
Neue Erhaltungsstrategie unter Nutzung digitaler Methoden

- **2007/2008:** Erfassung als Kulturdenkmal in Rheinland-Pfalz u. Hessen
- **2017:** BMDV und RP/HE beschließen Ersatzneubau ab 2028 wegen der Leistungsdefizite
- **2019:** öffentliche Ankündigung des Ersatzneubaus in einer PK des LBM Worms
- **2021:** Bundesingenieurkammer sieht Nibelungenbrücke für die Auszeichnung „Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst“ vor
- **2021:** Öffentliches Fachgespräch zum Erhalt der Nibelungenbrücke



Quelle: LBM

HUNDERT PLUS: VERLÄNGERUNG DER LEBENSDAUER KOMPLEXER BAUSTRUKTUREN DURCH INTELLIGENTE DIGITALISIERUNG

DIGITALE MODELLE

- Analyse der Bestandsdaten
- Methoden zur erweiterten digitalen Bestandserfassung
- Automatisierte Ableitung eines belastbaren BIM-Modells

DIGITALE VER-KNÜPFUNG

- Innovative Konzepte für Structural Health Monitoring
- Effiziente Datenanalyse: Smart Data statt Big Data
- Entwicklung einer IoT-Plattform unter Nutzung fest installierter oder mobiler Sensoren

ZUSTANDS-INDIKATOR

- Applikation von Messtechnik
- Nutzergerechte Visualisierung des IST-Zustandes
- Lebenszyklusanalyse / Prognosemodelle

gefördert durch die Deutsche Forschungs-gemeinschaft

Structural-Health-Monitoring im Pilotbereich

Ziel: Die Nutzbarkeit von Brücken durch intelligente Digitalisierung verlängern

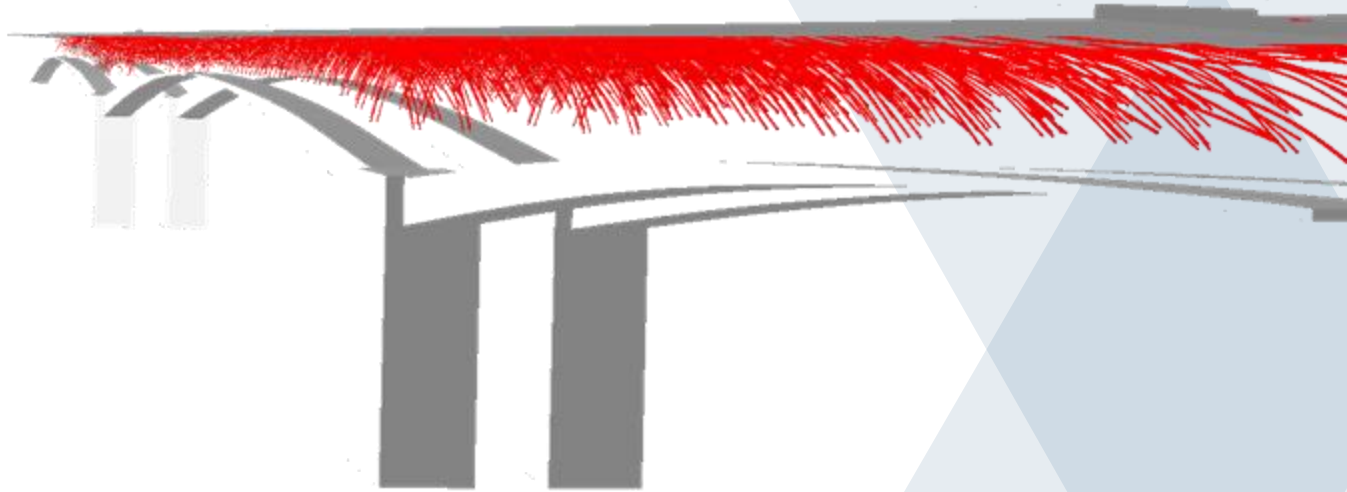
Nachrechnung nach Stufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie

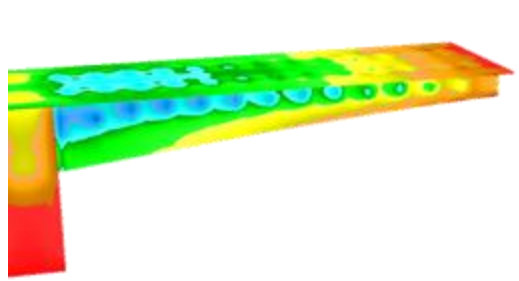
NORMATIVE NACHWEISFÜHRUNG

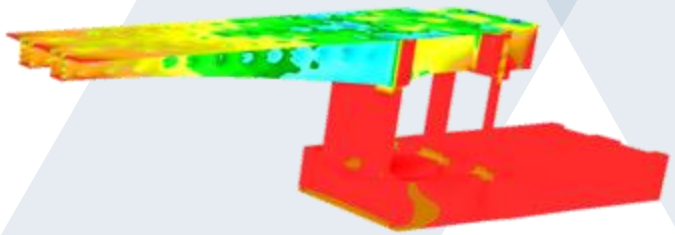
NICHTLINEARES FINITE-ELEMENTE-MODELL

HOHER DETAILLIERUNGSGRAD IN DER MODELLABLEITUNG

VERIFIZIERTE BESTANDSDATEN ALS DATENGRUNDLAGE





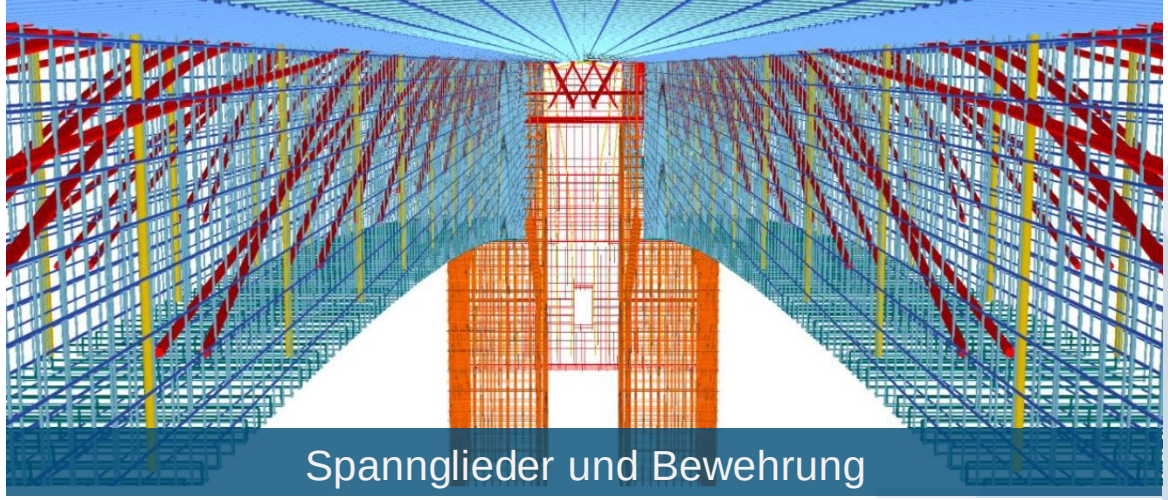


Quelle: Hegger + Partner

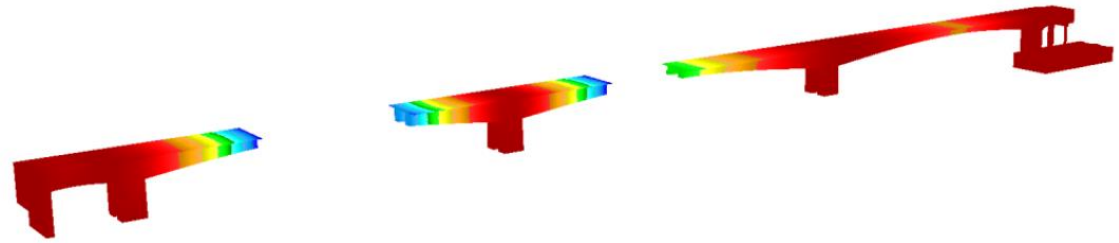
Nachrechnung nach Stufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie

- FE-Modellierung mit 3D-Volumen-Elementen auf Grundlage der Planunterlagen
- Berücksichtigung von Einzelspanngliedern und Bewehrung
- Realitätsnahe Kriech- und Schwindvorgänge sind berücksichtigt
- normative Lastfälle (Lastbild BK 60/30)

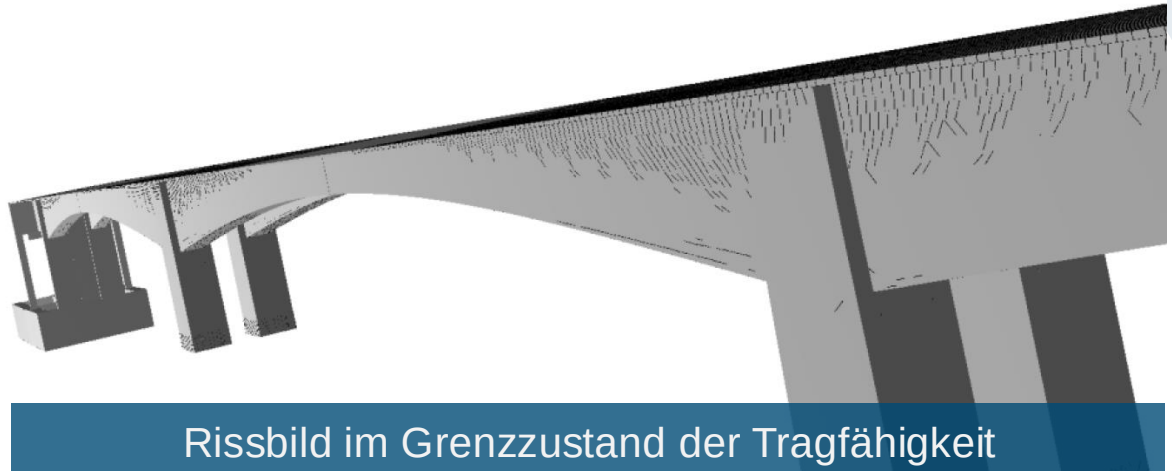
Derzeitiges Modell bildet Grundlage, um zukünftig realitätsnahe Bauwerks-informationen zu berücksichtigen.



Spannglieder und Bewehrung



Berücksichtigung der Bauzustände, hier: Tag 328



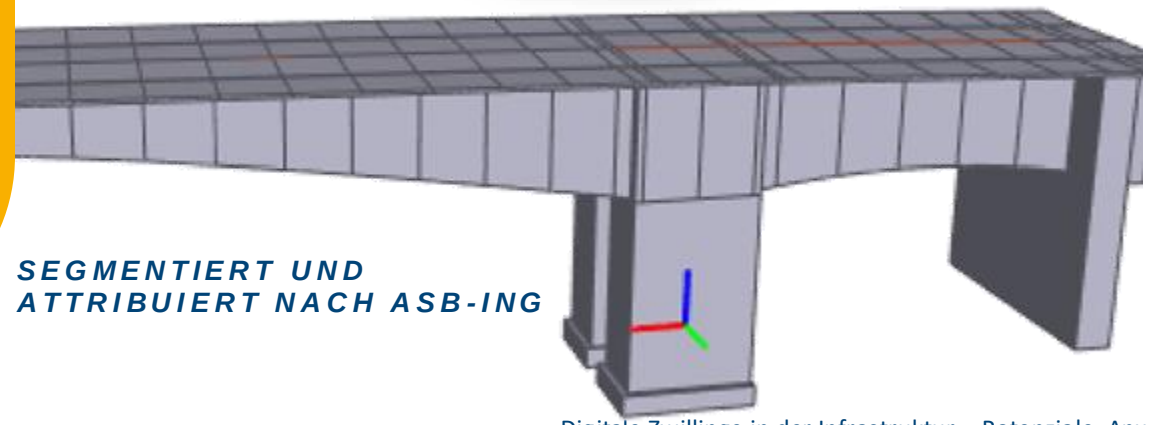
Rissbild im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Quelle: Hegger + Partner

BIM: 3D Geometriegrundlage

PUNKT-WOLKE

BIM-MODELL



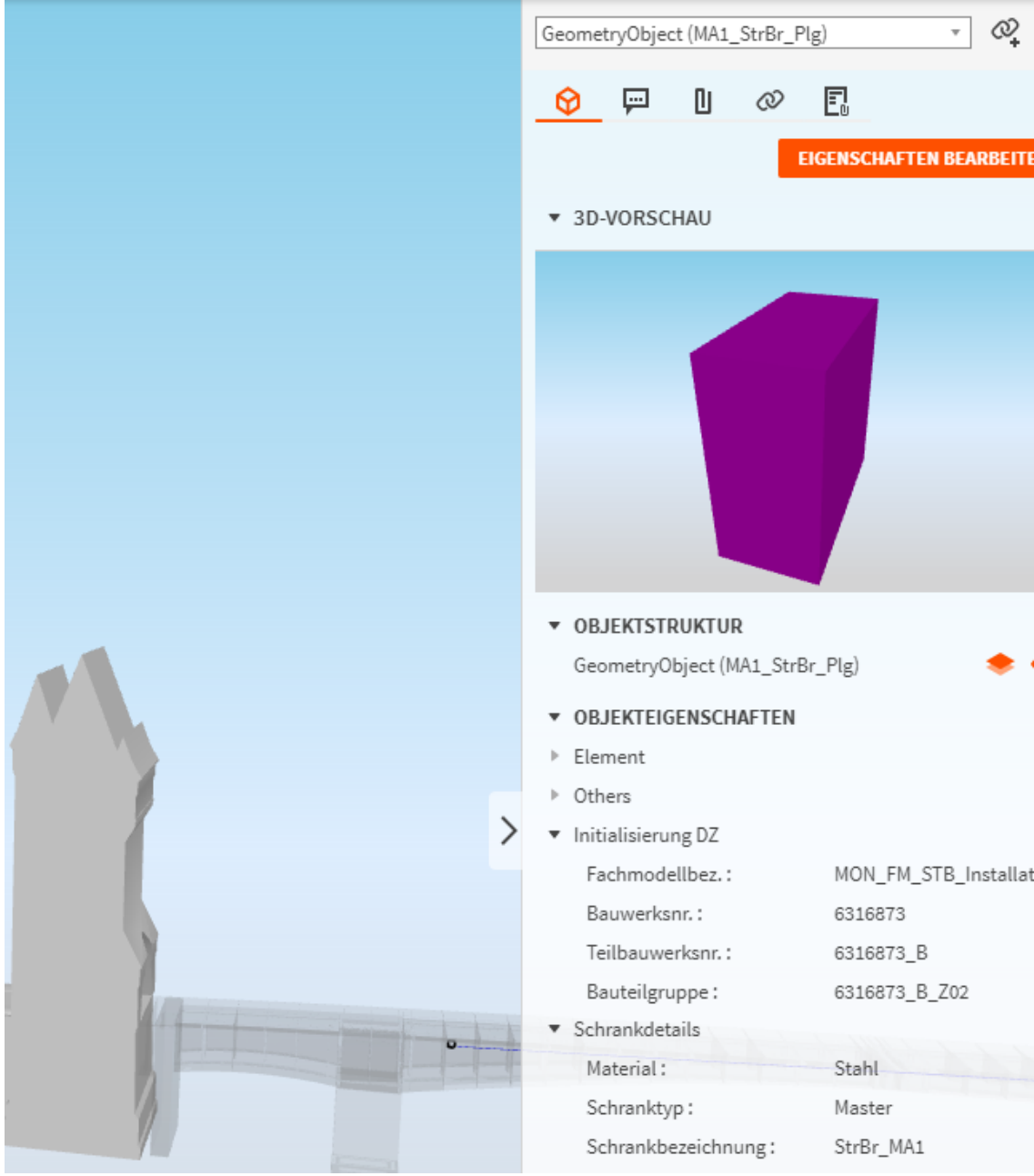
SEGMENTIERT UND ATTRIBUIERT NACH ASB-ING

Quelle: dhpi + TU Dresden

BIM: 3D Datengrundlage

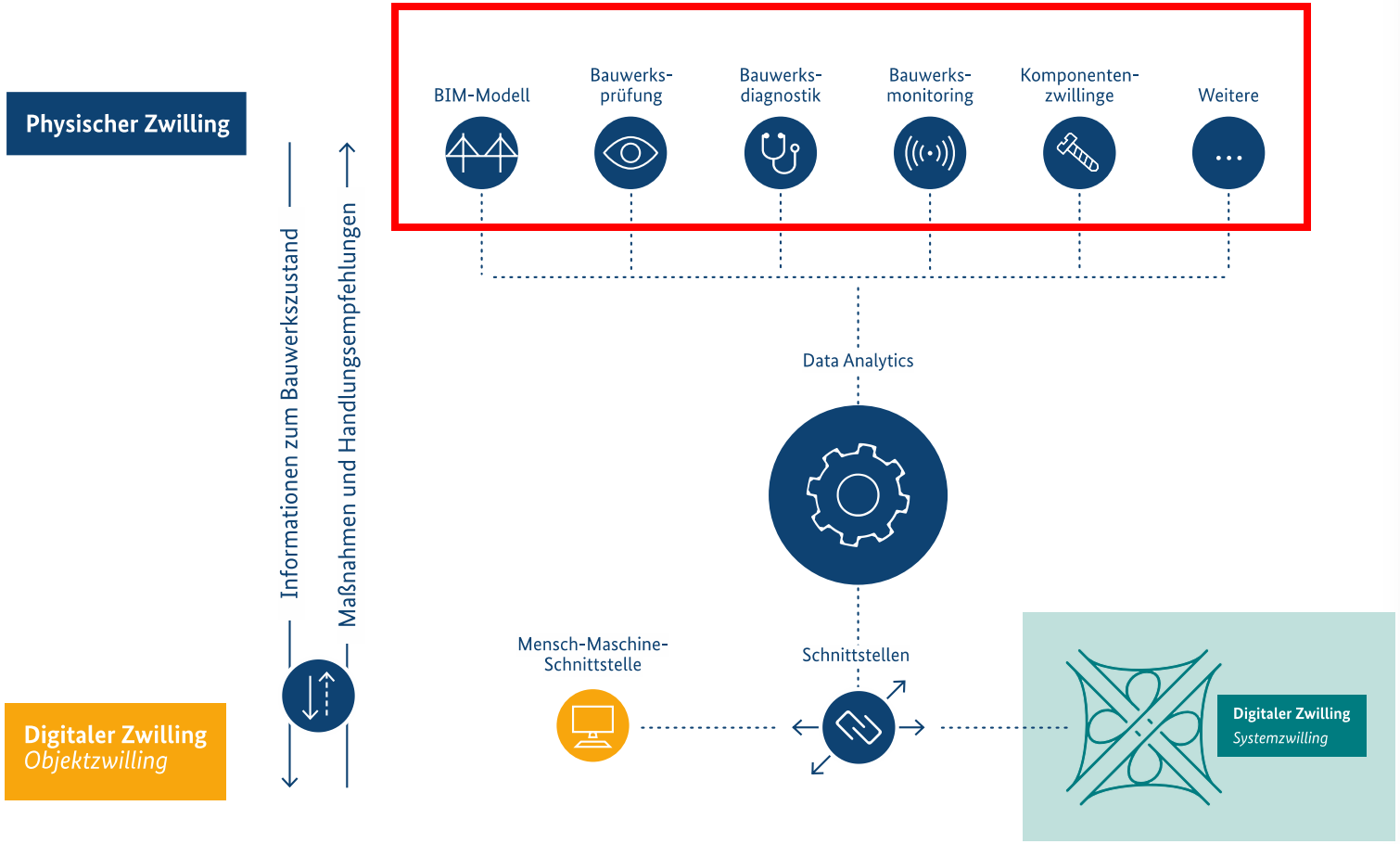
- Nutzung von **BIM** über Planungs- und Bauphasen hinaus
- Datengrundlage des Digitalen Zwilling sind **attribuierte BIM-Fachmodelle**
- **IFC-Format** dient zum Datenaustausch zwischen BIM und Digitalen Zwilling
- Verknüpfung zu anderen Datenquellen (bspw. Datenbanken) über Linked-Data-Ansatz

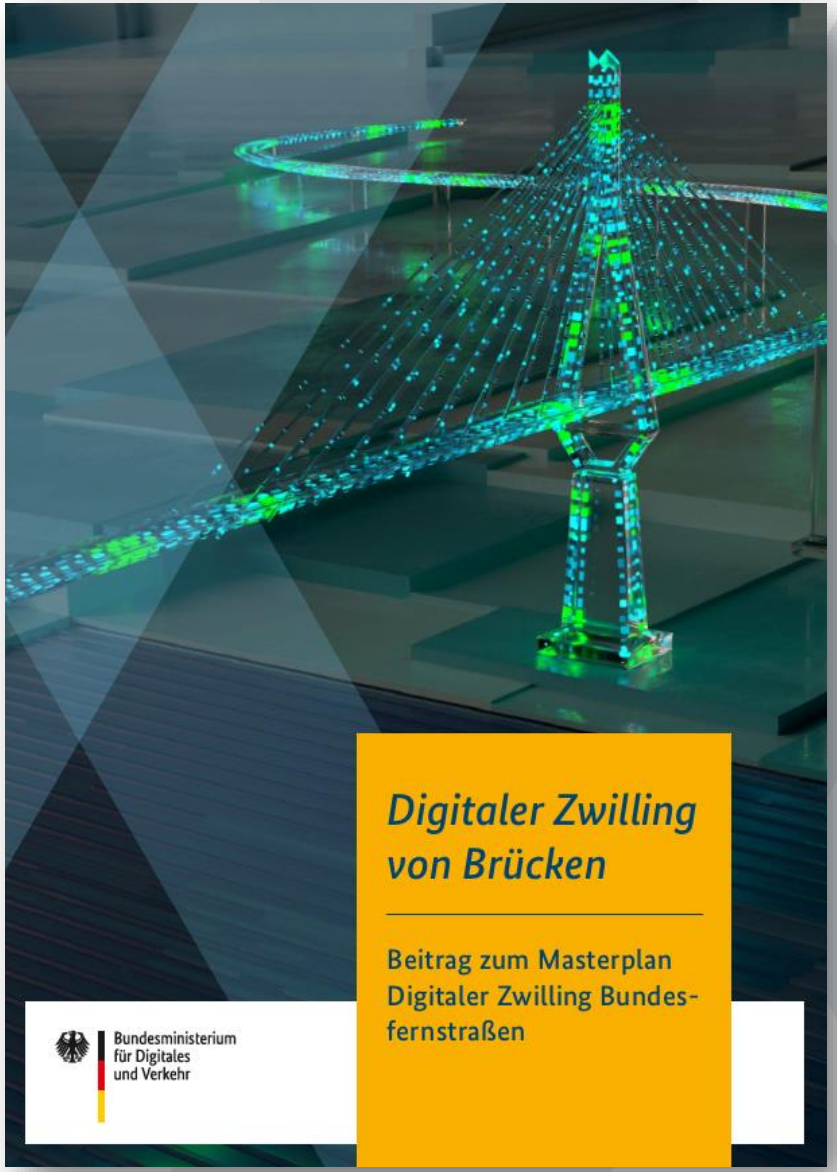
Die Digitale-Zwilling-Plattform ermöglicht den Zugang zu allen für die Erhaltung relevanten Datenquellen als **Single-Point-of-Access** (SPoA).



Quelle: MKP GmbH

Digitaler Zwilling: interaktives, digitales 3D-Objekt – virtuell und immersiv

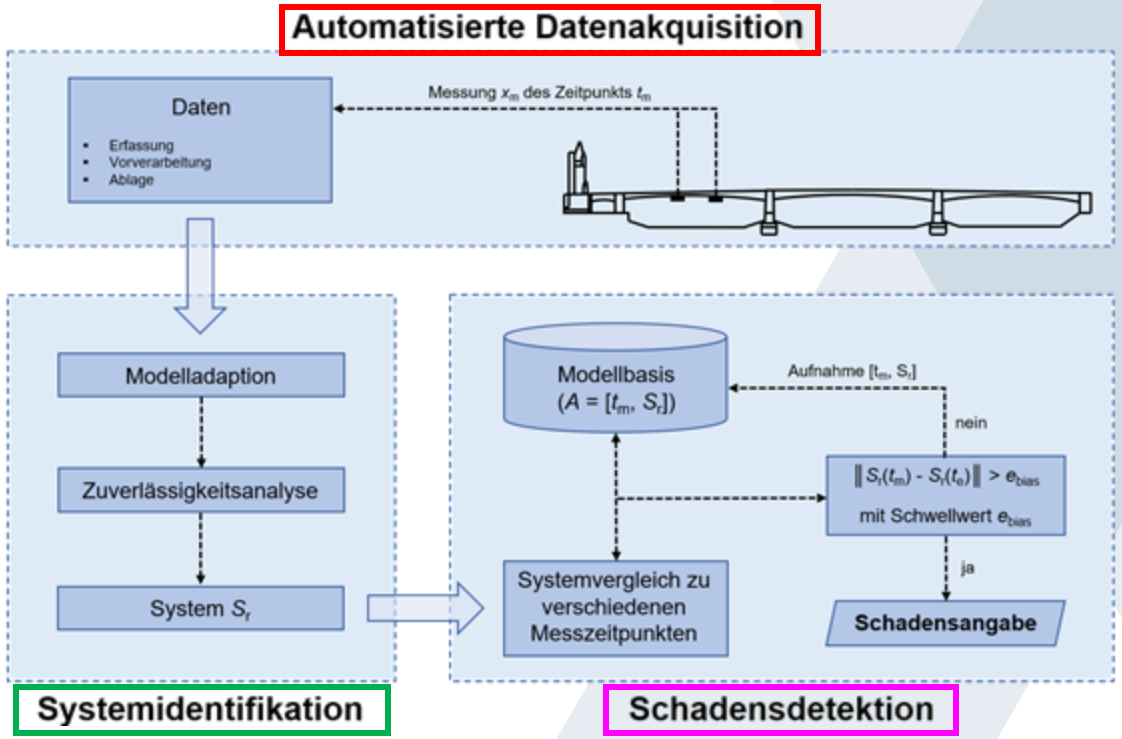




Die Nibelungenbrücke als Demonstrator

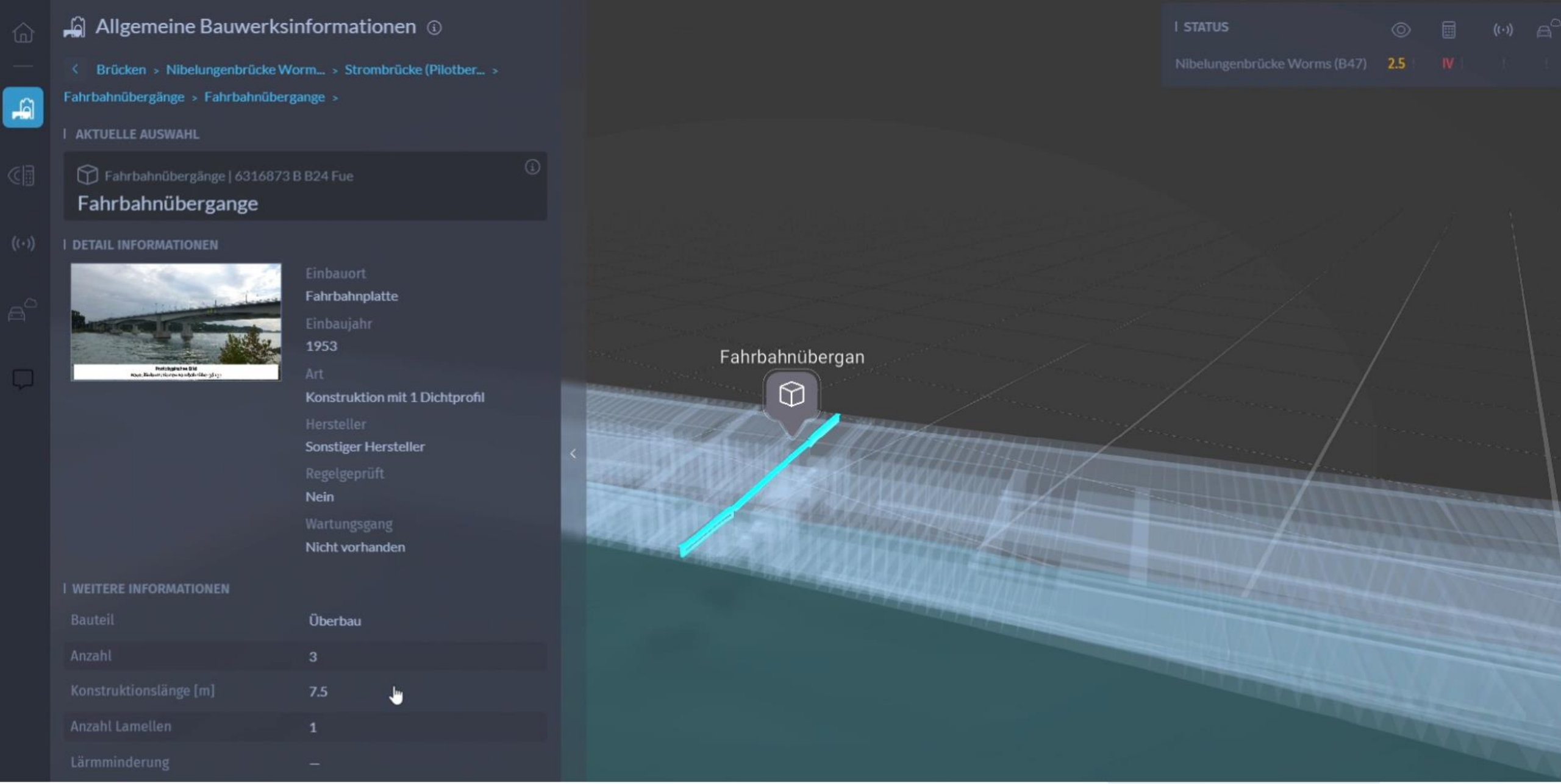
DIGITALER ZWILLING – SCHLÜSSEL FÜR DATEN, ANALYSE, VISUALISIERUNG, SIMULATION UND IMMERSION

SPP100+

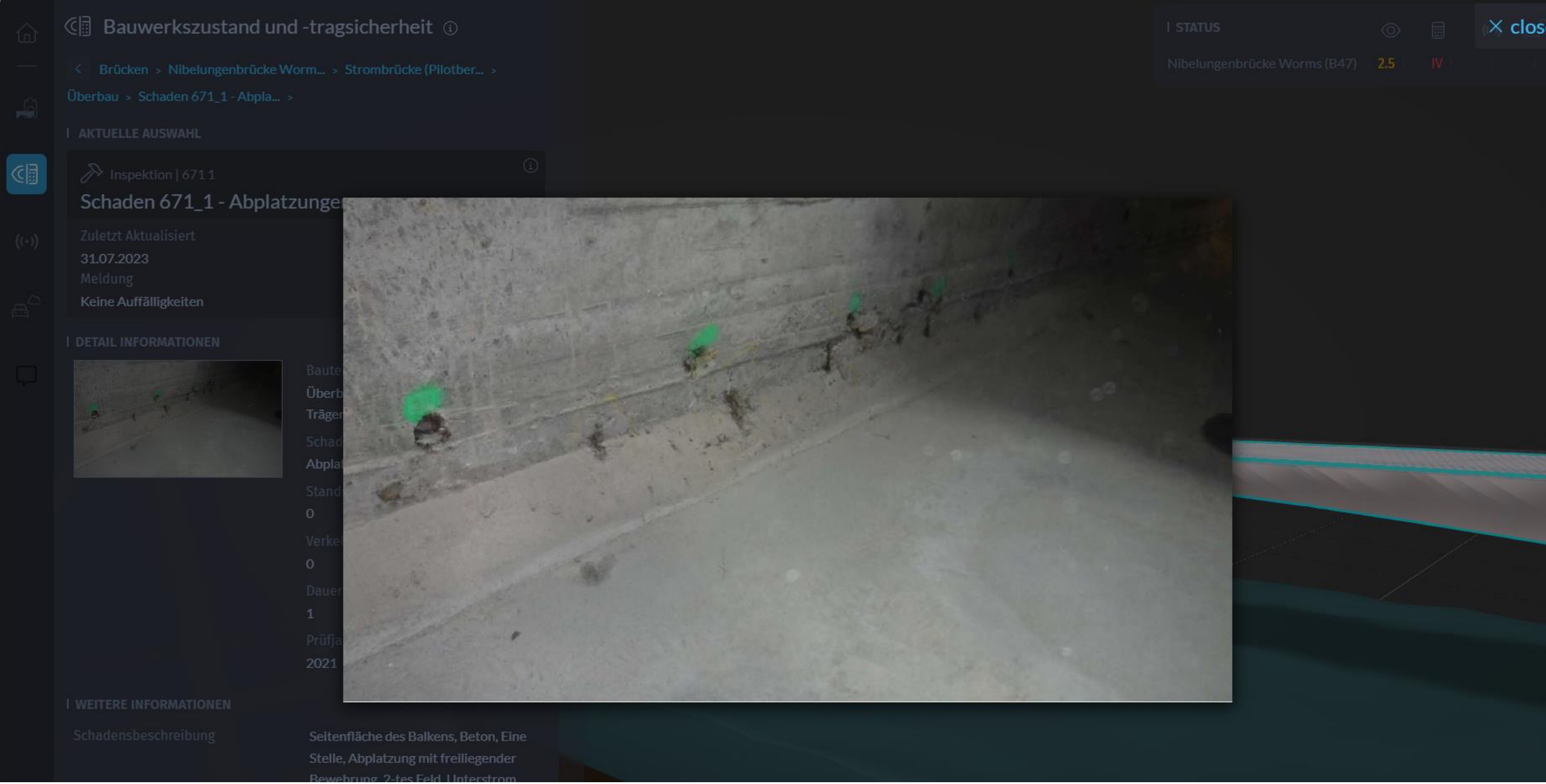


Quelle: SPP 100+; Universität Duisburg-Essen

Bauteilinformationen im Pilotbereich

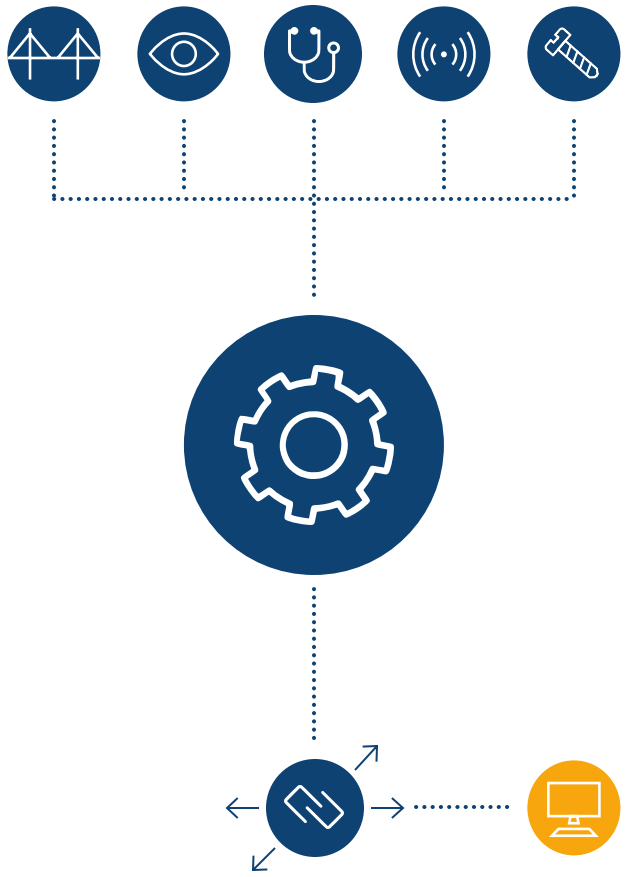

Allgemeine Bauwerksinformationen
Brücken › Nibelungenbrücke Worm... › Strombrücke (Pilotber... ›
Fahrbahnübergänge › Fahrbahnübergange ›
AKTUELLE AUSWAHL
Fahrbahnübergänge | 6316873 B B24 Fue
Fahrbahnübergange
DETAIL INFORMATIONEN
Einbauort
Fahrbahnplatte
Einbaujahr
1953
Art
Konstruktion mit 1 Dichtprofil
Hersteller
Sonstiger Hersteller
Regelgeprüft
Nein
Wartungsgang
Nicht vorhanden
WEITERE INFORMATIONEN
Bauteil Überbau
Anzahl 3
Konstruktionslänge [m] 7.5
Anzahl Lamellen 1
Lärmminderung –
STATUS
Nibelungenbrücke Worms (B47) 2.5 IV
Fahrbahnübergan

Informationen zu Mängeln und Schäden im Pilotbereich


Bauwerkszustand und -tragsicherheit
Brücken › Nibelungenbrücke Worm... › Strombrücke (Pilotber... ›
Überbau › Schaden 671_1 - Abpla... ›
AKTUELLE AUSWAHL
Inspektion | 671 1
Schaden 671_1 - Abplatzunge
Zuletzt Aktualisiert
31.07.2023
Meldung
Keine Auffälligkeiten
DETAIL INFORMATIONEN
Baute
Überb
Träger
Schad
Abpla
Stand
0
Verke
0
Dauer
1
Prüfja
2021
WEITERE INFORMATIONEN
Schadensbeschreibung
Seitenfläche des Balkens, Beton, Eine Stelle, Abplatzung mit freiliegender Bewehrung, 2-tes Feld, Unterstrom
STATUS
Nibelungenbrücke Worms (B47)
2.5
IV
clos

Entwicklung und Einsatz des Digitalen Zwillings zugunsten einer Verlängerung der Nutzungsdauer (Lebensdauerverlängerung der Brücke)

Verbindung von Digitalem Zwilling und realer Infrastruktur

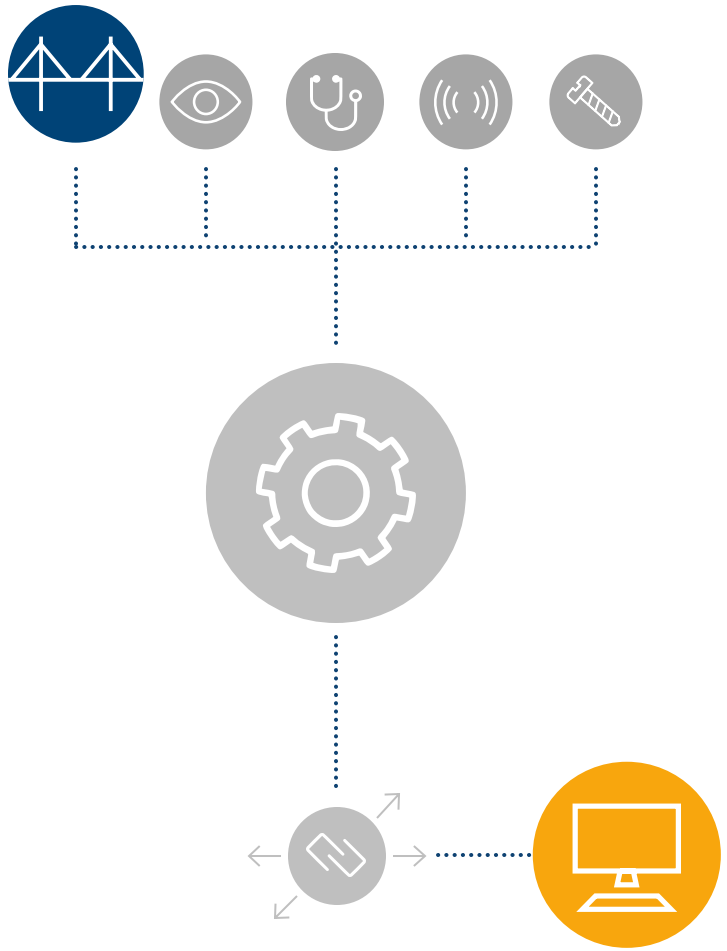


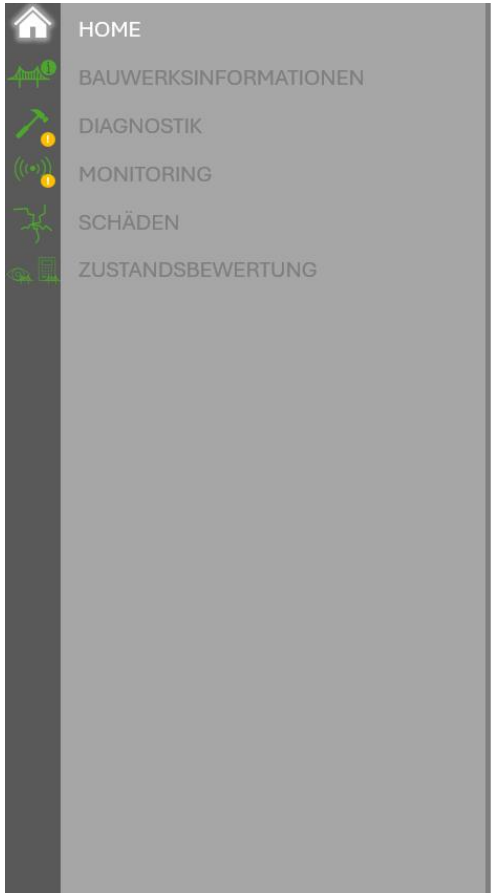
RESSOURCENEFFIZIENZ IN DER VERWALTUNG

VERLÄNGERUNG DER LEBENSDAUER ERREICHEN

Quelle: TU Dresden

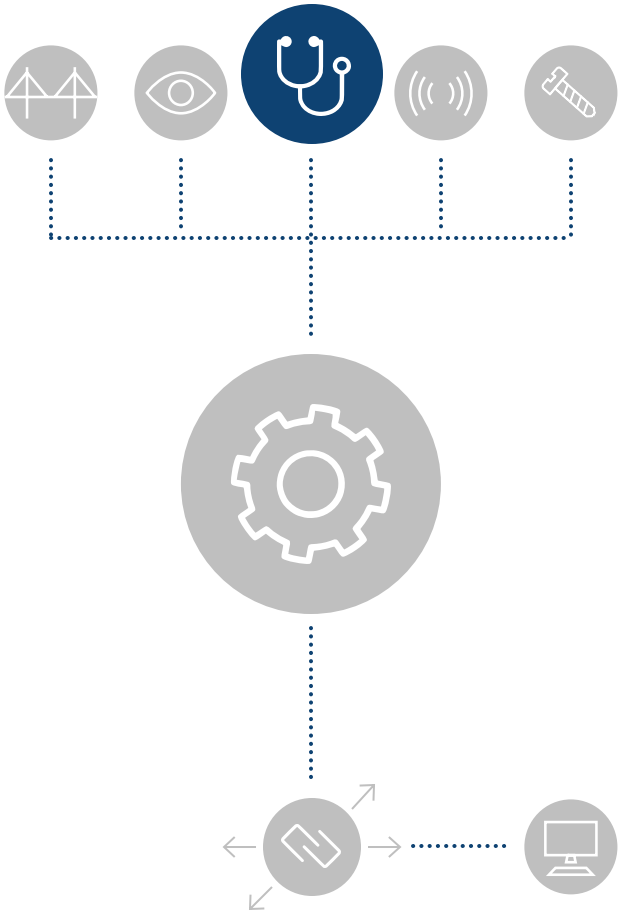
Räumliche Erweiterung des BIM-Modells





Quelle: MKP GmbH

Diagnostische Untersuchungen

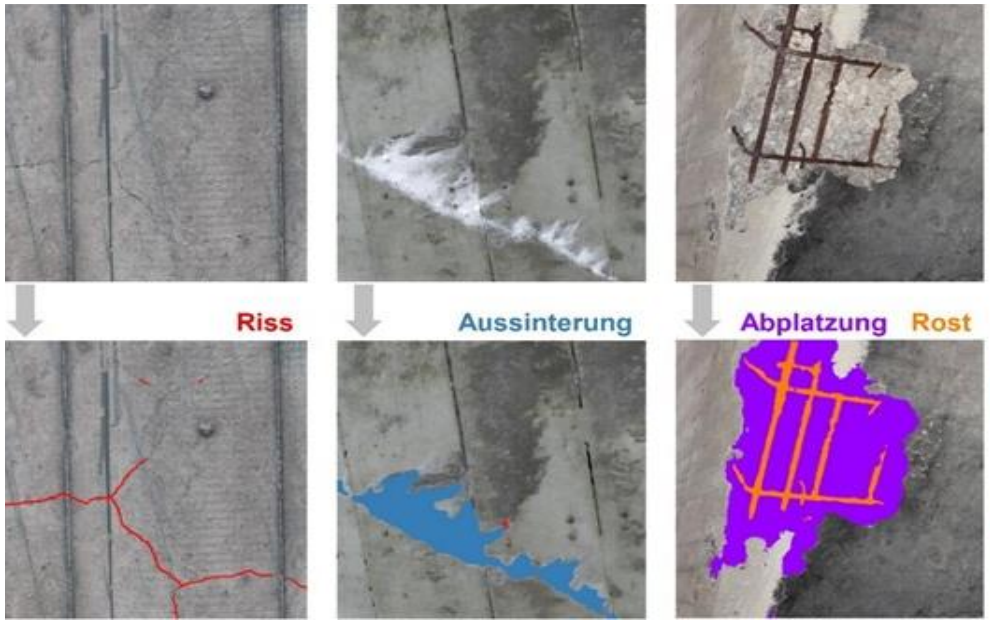


BILDBASIERTE SCHADENSERFASSUNG

RISSDOKUMENTATION

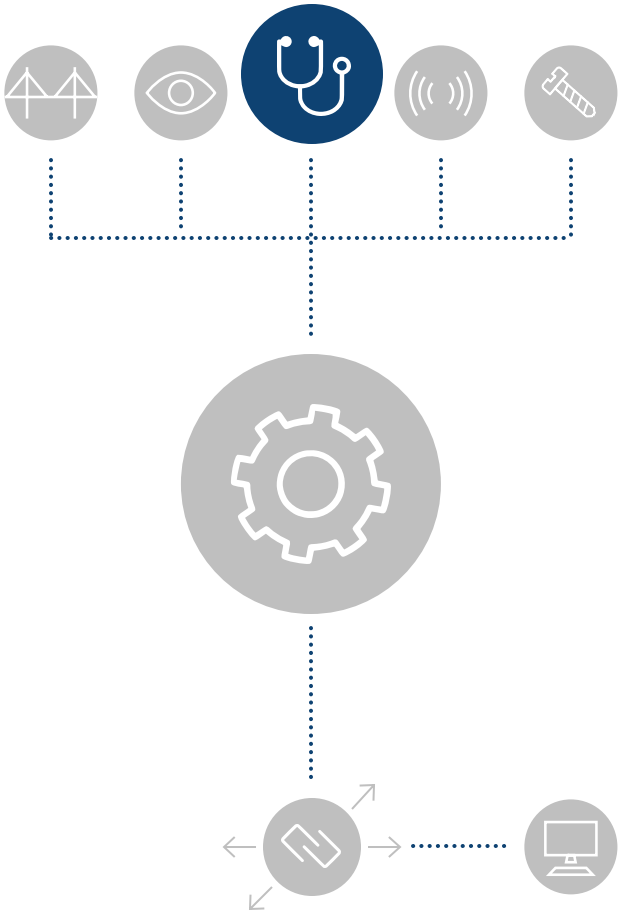
KI-AUSWERTUNG

OBJEKTIVER BAUWERKSZUSTAND



Quelle: (oben) lizenzfrei, (unten) INFRALYTICA GmbH

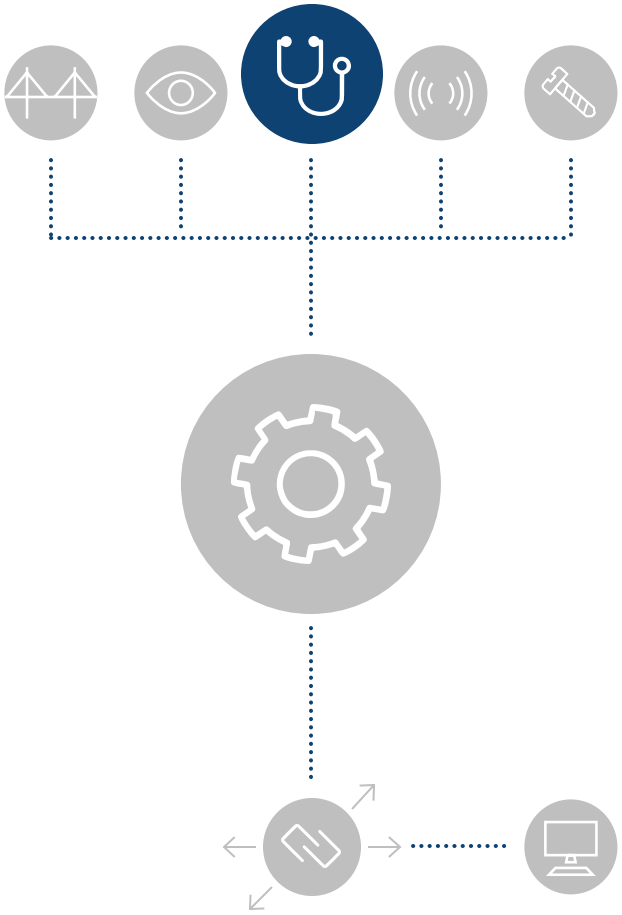
Diagnostische Untersuchungen



- ZUSTAND DER SPANNGLIEDER
- BETONDRUCKFESTIGKEIT
- BETONGEFÜGE
- VORSPANNKRAFT

Quelle: MKP GmbH

Diagnostische Untersuchungen



ZUSTAND DER SPANNGLIEDER

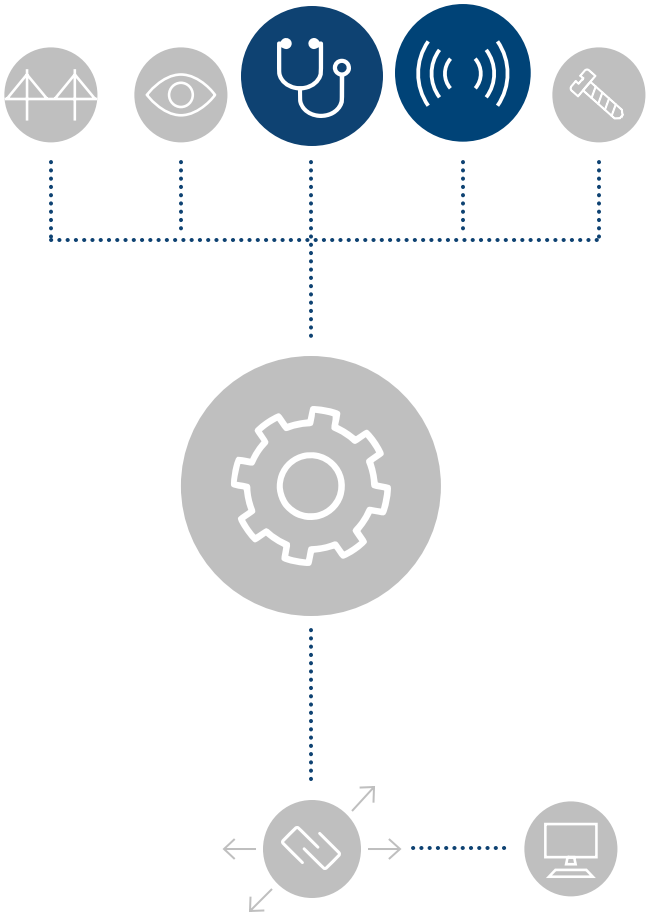
BETONDRUCKFESTIGKEIT

VORPSANNKRAFT

Quelle: MKP GmbH

UNTERSUCHUNG LAHNBRÜCKE BALDUINSTEIN ÜBERTRAGUNG AUF NIBELUNGENBRÜCKE

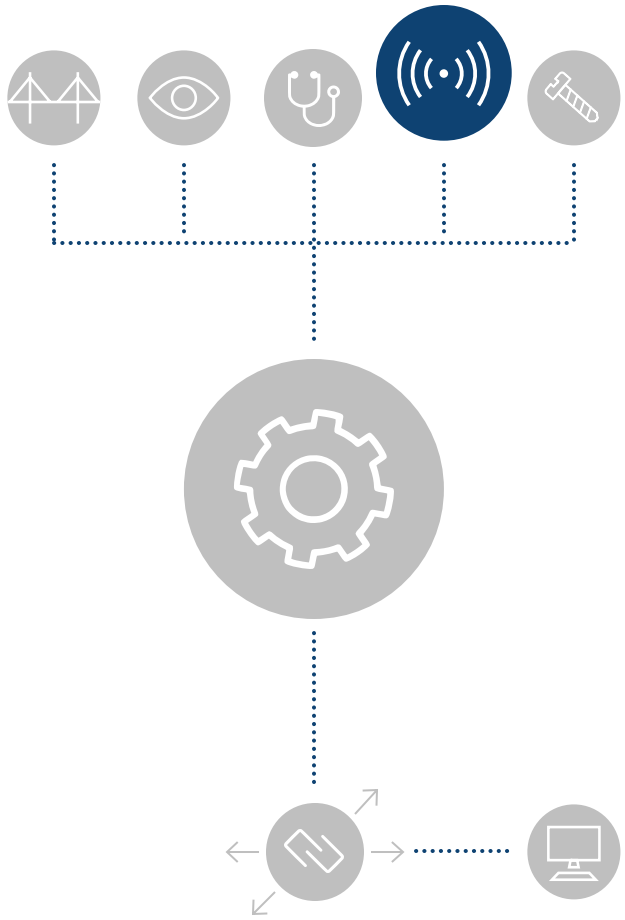
Diagnostische Untersuchungen



- BELASTUNGSFAHRTEN ZUR MODELLVALIDIERUNG
- DYNAMISCHE ANREGUNG
- KURZZEITMONITORING
- TATSÄCHLICHE BAUWERKSREAKTIONEN

Quelle: MKP GmbH

Bauwerksmonitoring 24/7



FASEROPTISCHE SENSOREN

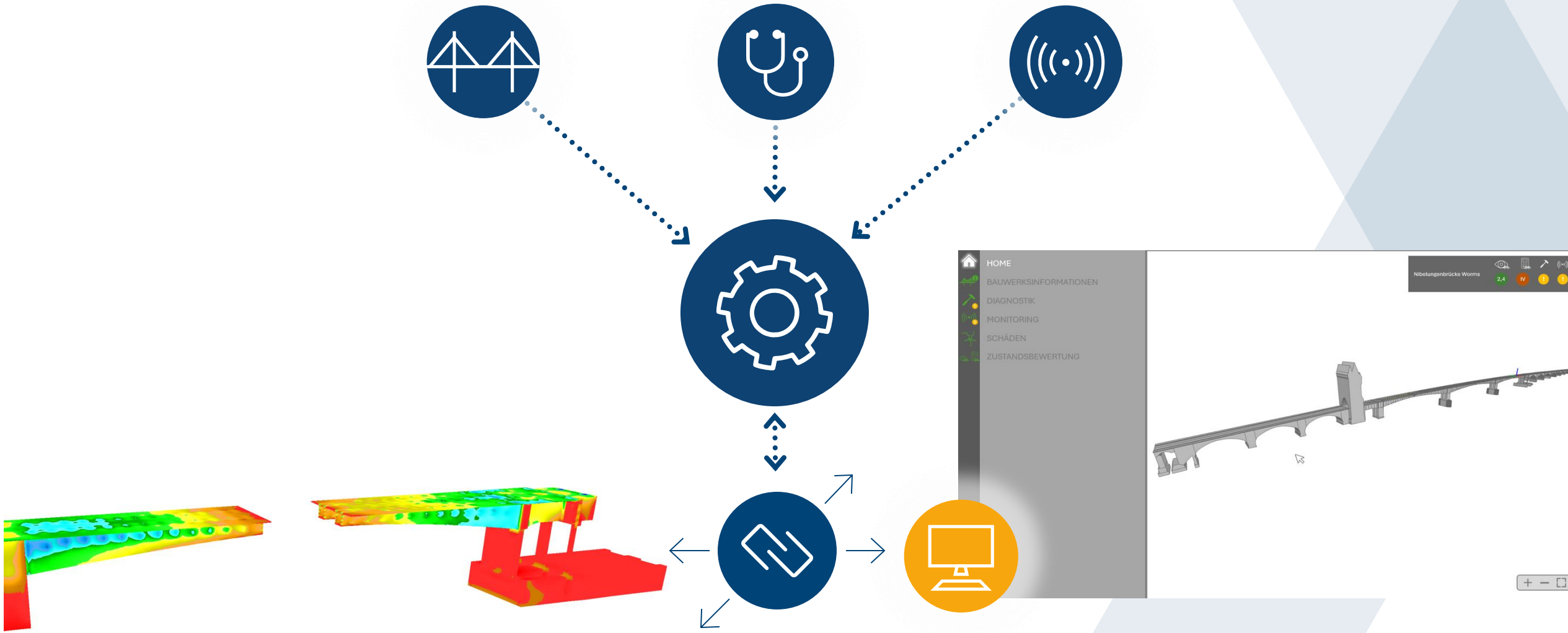
RISSERKENNUNG

DEHNUNGSÄNDERUNGEN

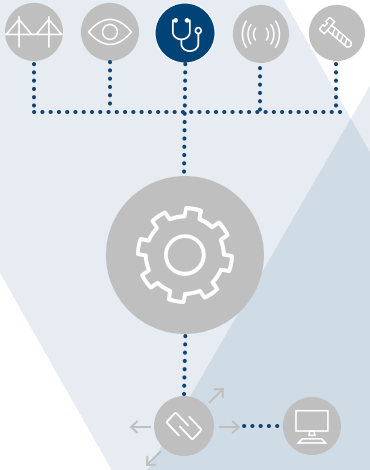
ZUSTANDSÄNDERUNGEN

Quelle: FOLAB GmbH, MKP GmbH

Tragfähigkeitsbewertung in Echtzeit



Dauerhaftigkeitsbewertung in Echtzeit



HOHE CHLORIDBELASTUNG

HOHE KORROSIONSWAHRSCHEINLICHKEIT, WENN FEUCHTE VORHANDEN IST

KONDENSWASSER ALS MÖGLICHE FEUCHTEQUELLE IM INNEREN

DAUERHAFTIGKEITSMONITORING MACHT „VERBORGENE“ PROZESSE SICHTBAR

Ermittlung Tauwasser

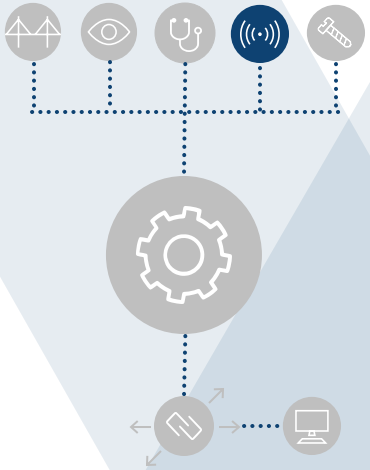
LUFTTEMPERATUR IM HOHLKASTEN

TAUPUNKT-TEMPERATUR

LUFTFEUCHTE IM HOHLKASTEN

BAUTEILTEMPERATUR IM HOHLKASTEN

BAUTEIL-TEMPERATUR



Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Ermittlung Tauwasser

LUFTTEMPERATUR IM HOHLKASTEN

LUFTFEUCHTE IM HOHLKASTEN

BAUTEILTEMPERATUR IM HOHLKASTEN

TAUPUNKT-TEMPERATUR

BAUTEIL-TEMPERATUR

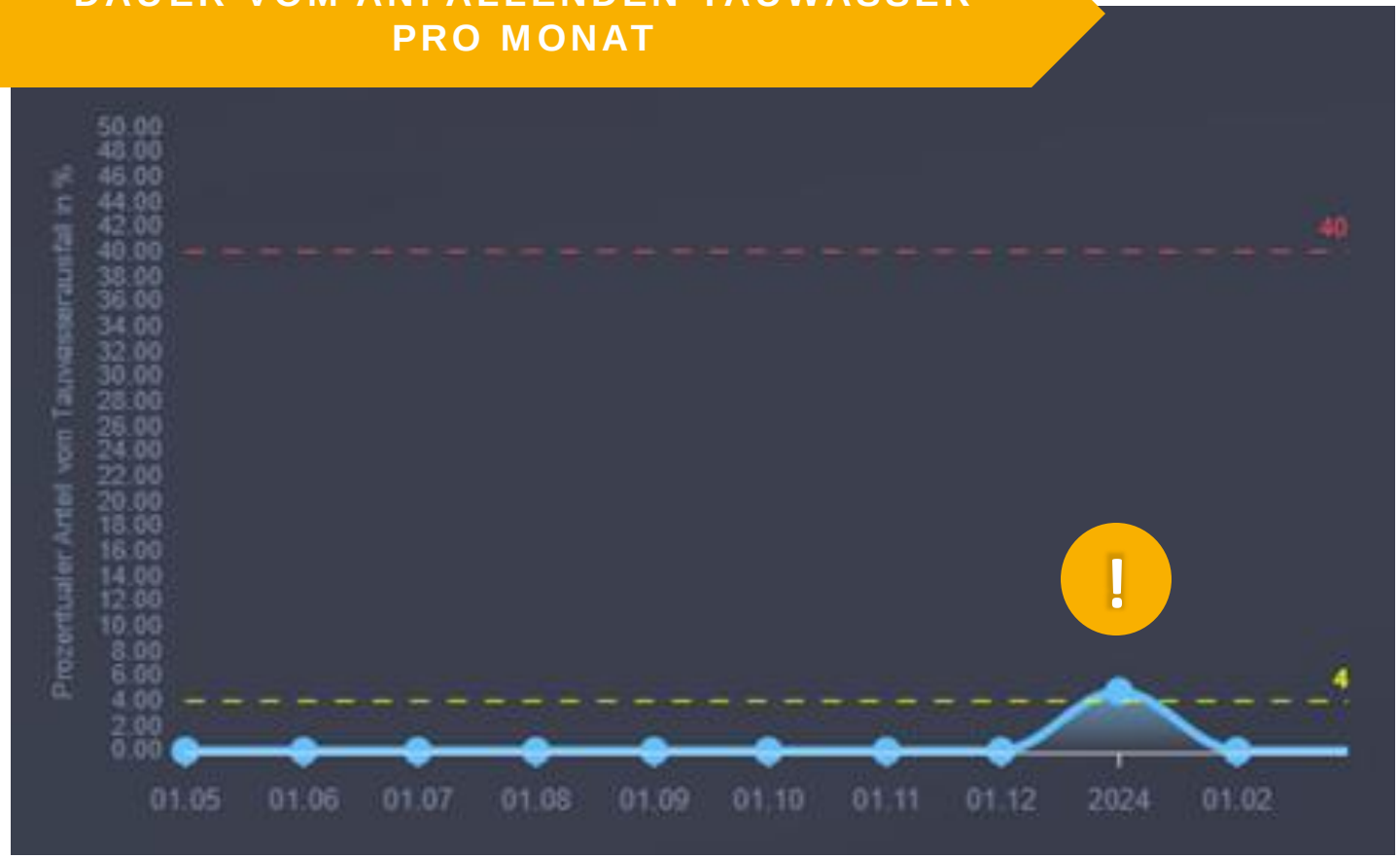
DIFFERENZ

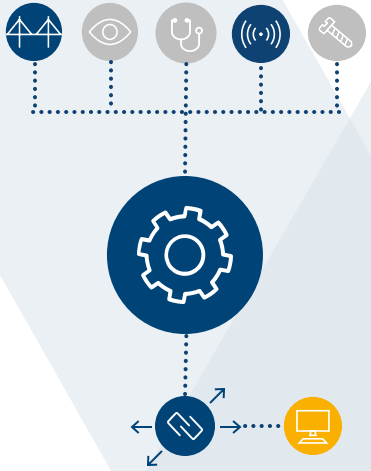
UNTERSCHREITUNG → TAUWASSERBILDUNG

Bundesministerium für Digitales und Verkehr

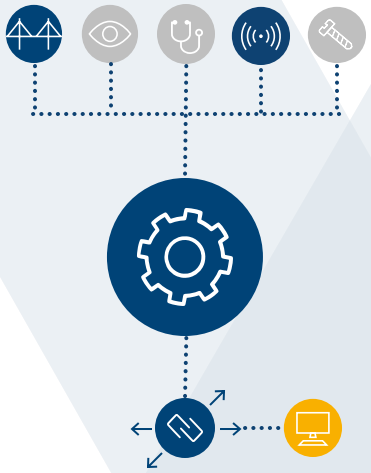
Darstellung CI-Korrosion durch Tauwasser

DAUER VOM ANFALLENDEN TAUWASSER PRO MONAT





Darstellung CI-Korrosion durch Tauwasser



Effekte beim Erhalt der Nibelungenbrücke

Bei einer Restnutzungsdauerverlängerung von 30 Jahren:

- CO_2-Einsparung: Mehrere tausend Tonnen CO_2-Äquivalent*
- Restnutzungsdauerverlängerung durch Digitalen Zwilling ist nach kurzer Zeit (hier 9 Jahren) wirtschaftlicher als ein Ersatzneubau*
- Schätzungsweise bis zu 12.000 to Bauschutt werden kurzfristig eingespart
- Schätzungsweise Einsparung von ca. 6.000 Ingenieurstunden in der Planung und Genehmigung eines Ersatzneubaus.

* Quelle: LBM

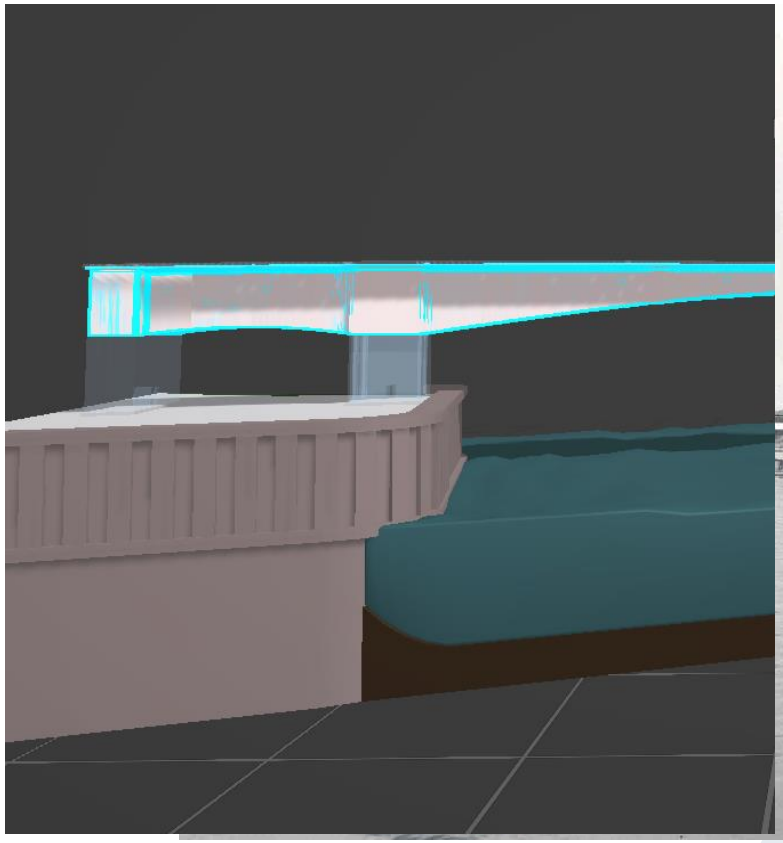
Fazit

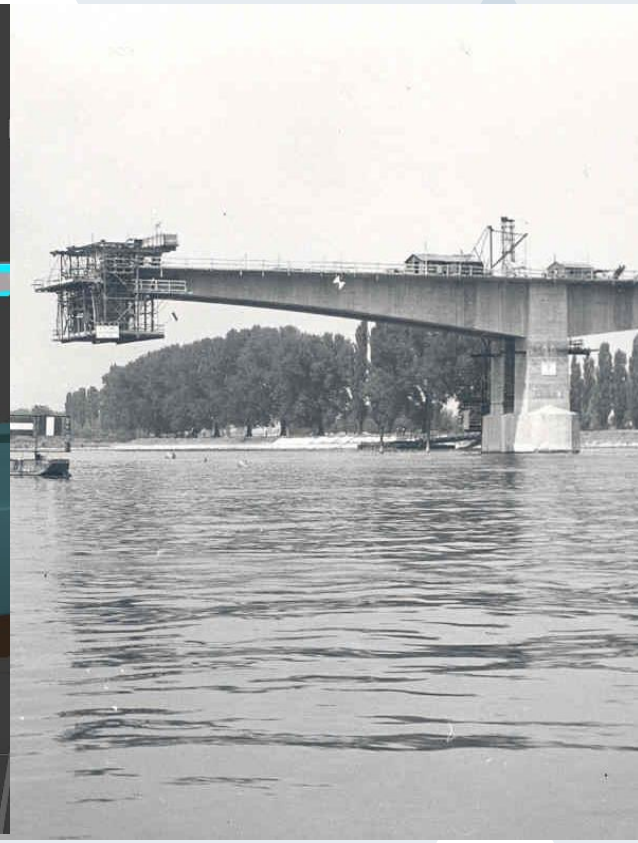
DIGITALE ERHALTUNG

SENSORIK UND LEBENSDAUERANALYSE

KOMPENSATION VON DEFIZITEN

NUTZUNGSDAUERVERLÄNGERUNG





Stadtarchiv Worms

NIBELUNGENBRÜCKE WORMS: PIONIERBAUWERK DER DIGITALEN ERHALTUNG?!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit