
Anhang

Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke

Dokumentation 2021

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 197

Beispielsammlung
„Monitoring für Brückenbauwerke“

Vorwort zur Beispielsammlung

Im Jahr 2020 wurde auf Veranlassung des BMVI im Rahmen der Bund/Länder-Arbeitsgruppe „Strategie des Monitorings in der Bauwerkserhaltung“ eine Abfrage bei den Straßenbauverwaltungen der Länder zu den Erfahrungen beim Einsatz von Monitoring bei Straßenbrücken durchgeführt. Aus den von den Straßenbauverwaltungen gemeldeten Monitoring-Anwendungen wurden relevante Beispiele für die Veröffentlichung in der Beispielsammlung gewählt. Ergänzend zu den Informationen aus der Länderabfrage wurde eine detaillierte Befragung der Straßenbauverwaltungen und Ingenieurbüros zu den gewählten Monitoringmaßnahmen vorgenommen.

Die in der Erfahrungssammlung vorgestellten Beispiele unterschiedlicher Monitoringmaßnahmen werden wie folgt gruppiert:

- 1 Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung
- 2 Temperaturmessung
- 3 Feuchtigkeitsmessung
- 4 Korrosionsmessung
- 5 Überwachung der Tragwerksverformung
- 6 Messung von Verschiebungen
- 7 Messung von Neigungsänderungen
- 8 Messung des Schwingverhaltens
- 9 Messung der tatsächlichen Schwingbreite
- 10 Rissmonitoring
- 11 Dehnungsmessung Stahl
- 12 Schallemissionsanalyse

Zu einigen Monitoringmaßnahmen liegen mehrere Messsysteme mit unterschiedlichem Messziel vor. Diese Maßnahmen wurden entsprechend des Messziels in einzelne Monitoringkapitel aufgeteilt. In den Kapiteln wird auf die jeweilige Gesamtmaßnahme verwiesen. Es werden alle Sensoren der Gesamtmaßnahme in den Einzelkapiteln mit jeweiligem Kapitelverweis aufgeführt.

Die ausgewiesenen Monitoringkosten beziehen sich auf die Gesamtmaßnahme (brutto), sofern nicht anders angegeben.

Monitoringanwendungen mit Messsystemen nach dem Stand der Wissenschaft wurden in der Beispielsammlung nicht erfasst, da im Entwicklungsstand noch keine Vergleichbarkeit der Ausführung, der Kosten und des Aufwands gegeben ist.

Jeder Anwendungsfall enthält allgemeine Angaben zur Konstruktion des Brückenbauwerks und Angaben zu den für das Monitoring bedeutsamen Bauwerks- und Bauteilmerkmalen. Auf eine namentliche Nennung der Bauwerke wurde aus Datenschutzgründen verzichtet.

Hinter den Bauwerksdaten folgen stichpunktartig Angaben zur Art des Monitorings. Diese umfassen Angaben zur Messtechnik, Grund des Monitorings, messtechnischer Umfang und die Kosten und Zuständigkeiten der Monitoringmaßnahme.

Die messtechnischen Angaben werden mit Details zum Informationsgewinn und Datenmanagement ergänzt. Die Angaben umfassen Details zur Abstrakte, Frequenz der Datenaufzeichnung und Datenauswertung und Informationen über das Datenmanagement. Die Daten zum Informationsgewinn umfassen außerdem Angaben zum Alarmierungsplan des Monitorings und den Zuständigkeiten im Alarmfall.

Zur Dokumentation der Erfahrungen mit den ausgeführten Monitoringsystemen erfolgt eine Beschreibung des Monitorings, in welchem auf die Notwendigkeit, die Aufgabenstellung, die Umsetzung und sonstige Beschreibungen des Monitoringsystems eingegangen wird.

Das Ergebnis der jeweiligen Monitoringanwendungen wird im Abschnitt Folgerungen beschrieben. Es werden weitere Vorgehen resultierend aus den Erkenntnissen der Messungen, Detektion von Schäden oder die Erläuterung eines ergänzenden Beitrags zur Bauwerkprüfung beschrieben.

Die Monitoringanwendungen werden durch Bilder des Messsystems, der Messstellen, der Installationsweise und exemplarischen Messwertgraphen ergänzt.

Die fachliche Bearbeitung der Erfahrungssammlung wurde durch das Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universi-

tät Stuttgart unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing Balthasar Novák mit fachlicher Unterstützung der Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH und Messtechnik Beratung Koster im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur durchgeführt. Besonderer Dank geht an die Straßenbauverwaltungen, Ingenieurbüros und Messtechnikdienstleister, welche die Erfahrungswerte zu den Monitoringmaßnahmen und ergänzende Informationen zur Verfügung gestellt haben.

Inhalt

1. Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung

Monitoring 1.1	Unterstützung der Nachrechnung durch Ermittlung eines messbasierten Verkehrslastmodells.....	1
Monitoring 1.2	Ermittlung eines modifizierten Ermüdungslastmodells LM4 für den Ermüdungsnachweis nach Nachrechnungsrichtlinie	11
Monitoring 1.3	Erfassung der Fahrzeugüberfahrten mit Magnetfeldsensoren zum Plausibilisieren ermüdungsrelevanter Dehnmessereignisse	18

2. Temperaturmessung

Monitoring 2.1	Erfassung der Änderung der Grundbeanspruchung aus Temperatur zur messtechnisch gestützten Beurteilung der Ermüdungsgefährdung	25
----------------	---	----

3. Feuchtigkeitsmessung

Monitoring 3.1	Feuchtigkeitsmessung zur Überprüfung einer Pilotkonstruktion von Wildbrücken in Holzbauweise	30
Monitoring 3.2	Feuchtigkeitsmessung zur Überprüfung der Holzfeuchte und Funktionstüchtigkeit der Bauwerksabdichtung	37

4. Korrosionsmessung

Monitoring 4.1	Korrosionsmonitoring eines Pilotbauwerks in Segmentbauweise mittels Anodenleiter	46
Monitoring 4.2	Korrosionsmonitoring eines Pilotbauwerks für die Anwendungsprüfung von korrosionsarmen Betonstahl	52

5. Überwachung der Tragwerksverformungen

Monitoring 5.1	Überwachung von Verformungen der Hauptträger infolge Steifigkeitsänderungen mittels digitaler Schlauchwaage.....	59
Monitoring 5.2	Tachymetrische Überwachungsmessung der Überbauverformungen zur Schadensdetektion bei Spannungsrisskorrosionsgefahr.....	65
Monitoring 5.3	Tachymetrische Überwachungsmessung der Überbauverformungen zur Schadensdetektion bei Spannungsrisskorrosionsgefahr.....	71
Monitoring 5.4	Dynamische Laserdistanzmessung zur Überwachung der Überbauverformungen bei Defiziten im rechnerischen Ankündigungsverhalten	76
Monitoring 5.5	Verformungsüberwachung mittels Präzisions Schlauchwaage bei Spannungsrisskorrosionsgefahr	85
Monitoring 5.6	Überwachung der Kragarmverformungen während einer 4+0 Verkehrsführung mittels Laserdistanzmessung.....	93
Monitoring 5.7	Temperaturkompensierte Dehnungsmessung zur Überwachung von Verformungszunahmen infolge Spannungsrisskorrosion	100

6. Messung von Verschiebungen

Monitoring 6.1	Überwachung der Verschiebungen der Endverankerungsblöcke der externen Vorspannung mit Wegaufnehmern	106
Monitoring 6.2	Überwachung der Verschiebungen der Endverankerungsblöcke der externen Vorspannung mit Wegaufnehmern	112

Monitoring 6.3	Überwachung der vertikalen Verschiebungen an den Federelementen einer Notunterstützung mit Wegaufnehmern	118
7.	Messung von Neigungsänderungen	
Monitoring 7.1	Neigungsmessung zur Überwachung von Änderungen im Tragverhalten...	125
Monitoring 7.2	Neigungsmessung zur Überwachung von Änderungen im Tragverhalten...	130
8.	Messung des Schwingverhaltens	
Monitoring 8.1	Modellverifizierung mittels Eigenfrequenzvergleich über die Messung des Schwingverhaltens mit Beschleunigungssensoren	139
Monitoring 8.2	Erfassung der dynamischen Tragwerksantwort einer Spannbetonbrücke bei Schwerlastüberfahrten zur Zustandsüberwachung	145
9.	Messung der tatsächlichen Schwingbreite	
Monitoring 9.1	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit mittels einer messbasierten Überprüfung des Spannungsspiels in den Koppelfugen.....	152
Monitoring 9.2	Messung der tatsächlichen Schwingbreite für den messbasierten Nachweis der Ermüdung.....	159
10.	Rissbreitenmessung	
Monitoring 10.1	Koppelfugenmonitoring mit Wegaufnehmern bei Defiziten der rechnerischen Restnutzungsdauer	166
Monitoring 10.2	Koppelfugenmonitoring mit Wegaufnehmern bei Defiziten der rechnerischen Restnutzungsdauer	173
Monitoring 10.3	Rissmonitoring und integrale Dehnungsmessung mit Wegaufnehmern als Schadensüberwachung.....	180
Monitoring 10.4	Koppelfugenmonitoring mit Wegaufnehmern bei plötzlich auftretender Rissbildung.....	190
Monitoring 10.5	Schadensmonitoring zweier markanter Risse mit Wegaufnehmern	196
Monitoring 10.6	Schadensmonitoring kritischer Rissentwicklungen bei rechnerischen Defiziten und Überprüfung der Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme	202
Monitoring 10.7	Koppelfugenmonitoring als Kompensationsmaßnahme bei rechnerischen Defiziten	209
11.	Dehnungsmessung Stahl	
Monitoring 11.1	Überwachung der Querspannstäbe der Endverankerungsblöcke der externen Vorspannung	215
Monitoring 11.2	Messung der Stahldehnung zur Überwachung von Änderungen im Tragverhalten	221
Monitoring 11.3	Messung der Stahldehnung zur Ermittlung der tatsächlichen Ermüdungsbeanspruchung	227
Monitoring 11.4	Erfassung der tatsächlichen Ermüdungsbeanspruchung und Überprüfung der Verbundwirkung zwischen Fahrbahnplatte und Haupttragsystem	235
12.	Schallemissionsanalyse	
Monitoring 12.1	Überwachung von Rissentwicklungen an Schweißnähten.....	242
Monitoring 12.2	Detektion von Spanndrahtbrüchen infolge Spannungsrisskorrosion	247

Monitoring 12.3 Detektion von Spannstabbrüchen infolge Spannungsrissskorrosion.....	253
Monitoring 12.4 Bauwerksüberwachung zur Feststellung von Spannstahlbrüchen.....	260

1. Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung

Monitoring 1.1 **Unterstützung der Nachrechnung durch Ermittlung eines messbasierten Verkehrslastmodells**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1	Einzel- und Gesamtstützweiten:	79,1 – 54,39 – 119,27 – 18,18	m
1.2	Zahl der Felder:	4	
1.3	Brückenfläche:	5399	m ²
1.4	Bauwerkswinkel:	68.5	gon
1.5	Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6	Baujahr:	1974	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1	Hauptbaustoff:	Stahl
2.2	Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3	Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken / Trägerrost (mit Querverteilung)
2.4	System der Lagerung:	Pfeiler: Rollenlager, Gleitlager ohne Kippvorrichtung, Gleitlager allseits beweglich; Widerlager: Spezielles Zug- oder Zug-Druck-Lager, Führungslager, Gleitlager einachsrig beweglich, Kippteil Kalottenlager
2.5	Pfeiler / Stützen:	Rundstütze
2.6	Widerlager:	Kastenwiderlager
2.7	Gründung:	Flachgründung
2.8	Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtete Oberfläche

3. Baustoffe

3.1	Überbau:	Stahl: St52–3, St27–2 für untergeordnete Bauteile
3.2	Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B450
3.3	Widerlager:	Stahlbeton: B450

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Rechnerische Defizite gemäß Stufe 1 und 2 der Nachrechnungsrichtlinie
- Nachweisführung ab Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie

Monitoringmaßnahme:	1. Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung	Lfd. Nr.:	1.1	Blatt:	2
---------------------	--	-----------	-----	--------	---

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Dehnmessstreifen
 - Messbereich Sensortechnik: ± 5 mV/V
 - Erwartete Messunsicherheit: 1,0 %
 - Temperaturkompensation: Oberflächentemperaturmessung an den Trägern
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Modulares Mess- und Steuerungssystem, Stromversorgung, Auswerterechner
2. **Grund des Monitorings:** Ermittlung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung, Entwicklung eines objektbezogenen Verkehrslastmodells, Unterstützung der Nachrechnung ab Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 13 Dehnungsmessstreifen, 3 Temperatursensoren, 2 Beschleunigungssensoren
4. **Messort am Bauwerk:** Beschleunigung: Feldmitte in den Feldern 2 und 4; Dehnung: Feldbereiche der Felder 2 und 4, Stützbereiche der Felder 1 und 3
5. **Installationsbereich:** Dehnung: Stahloberfläche der Hauptträger, Querträger, orthotrope Platte; Beschleunigung: Querträger, Trägerunterkante
6. **Installationsart:** Geklebt
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 185.100,00 €
 - Planungskosten: 19.200,00 €
 - Installationskosten: 40.200,00 €
 - Betriebskosten: 6.700,00 €
 - Kosten Datenmanagement: 119.000,00 €
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 5 Werktage
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, 14 Monate zwischen Dezember 2019 und Januar 2021
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: -
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro, Tragwerksplaner)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Messdienstleister Schwerpunkt DMS-Applikation*), Fachplaner Monitoring (Universität**)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Datenaufbereitung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (**)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (**)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | | |
|---------------------------------------|---|--|------|
| 1. Ziel der Messung: | Identifikation und Bewertung der tatsächlichen Einwirkungen | | |
| 2. Messgrößen: | | | |
| - Dehnungsmessung: | ± 5 (Spannung) | | mV/V |
| - Beschleunigung: | ± 10 | | g |
| - Temperaturmessung: | -20 bis +50 | | °C |
| 3. Abtastrate: | | | |
| - Dehnungsmessung: | 500 | | Hz |
| - Beschleunigung: | 500 | | Hz |
| - Temperaturmessung: | 500 | | Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | | | |
| - Dehnungsmessung: | 500 | | Hz |
| - Beschleunigung: | 500 | | Hz |
| - Temperaturmessung: | 500 | | Hz |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Intervall von 3 Monaten | | |
| 6. Daten: | | | |
| - Dehnungsmessung: | Momentanwert, Datenreduzierung auf 10-minütige Minimal- und Maximalwerte | | |
| - Beschleunigung: | Momentanwert | | |
| - Temperaturmessung: | Momentanwert | | |
| 7. Datenformat: | *.dxd | | |
| 8. Datenerfassung: | Modulares Ethernet Mess- und Steuerungssystem, Speichern vor Ort | | |
| 9. Datenübertragung: | Übertragung per Hard Drive | | |
| 10. Datenmanagementsystem: | Eigenentwicklung Verwaltungsschale Bbox (Bild 9) (Dehnung, Temperatur); Lokale Datenbank (Beschleunigung) | | |
| 11. Datenauswertung: | | | |
| - Prozess: | Dehnung:
1. Auswertung des Frequenzspektrums (FFT) und Festlegung der maßgebenden Frequenzbereiche;
2. Filterung der Rohdaten in Abhängigkeit des maßgebenden Frequenzbereichs (Hoch-, Tief- oder Bandpassfilter);
3. Herausfiltern des Temperaturanteils durch eine Mittelwertkorrektur (gleitendes Mittel);
4. Ermittlung des Absolutwertes der Spannungen, die den Schwerverkehrsanteil bilden;
5. Stochastische Extremwertauswertung der Messdaten des Schwerverkehrsanteils mittels einer Gumbelverteilung; | | |

Monitoringmaßnahme:	1. Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung	Lfd. Nr.:	1.1	Blatt:	4
----------------------------	---	------------------	------------	---------------	----------

Beschleunigung:

1. Auswertung des Frequenzspektrums (FFT) und Festlegung der maßgebenden Frequenzbereiche;
2. Filterung der Rohdaten in Abhängigkeit des maßgebenden Frequenzbereichs (Hoch-, Tief- oder Bandpassfilter)

- Ausgabe:

Ermittlung von Anpassungsbeiwerte für das Lastmodell LM 1 sowie die der Betriebslastfaktor für das Lastmodell LM 3;

Mustererkennung der Sensordaten im Rahmen von wissenschaftlichen Untersuchungen

12. Datenverwendung:

Messbasierte Ergänzung der Nachrechnung, Übertragung von Messgrößen auf Berechnungsgrößen in der Nachweisführung, Testobjekt für die Weiterentwicklung des Digitalen Zwillings

13. Alarmierungsplan:

Nicht erforderlich

- Grenzwert:

-

- Alarmierungskette:

-

- Zuständigkeit im Alarmfall:

-

Beschreibung des Monitorings

Die Brücke des Bundesfernstraßennetzes wurde in Stahlbauweise mit orthotroper Fahrbahnplatte erstellt (Bild 1). Für die Brücke konnten die Tragfähigkeits- und Dauerhaftigkeitsnachweise gemäß Stufe 1 und 2 der Nachrechnungsrichtlinie nicht vollständig in allen bemessungsrelevanten Bereichen erbracht werden. In Abstimmung mit der Straßenbauverwaltung wurde eine Nachrechnung unter Berücksichtigung der am Bauwerk ermittelten Messergebnisse ab Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie durchgeführt. Durch die messtechnische Unterstützung soll das tatsächliche Tragverhalten unter Gebrauchslast erfasst und ein objektbezogenes Verkehrslastmodell mit probabilistischen Methoden entwickelt werden. Zur Erfassung der Dehnungen, Temperaturverteilungen und Eigenfrequenzen des Bauwerks wurden Dehnungsmessstreifen, Temperatursensoren und Beschleunigungssensoren am Bauwerk installiert (Bild 2).

Die Dehnungsmessstreifen wurden an Messstellen im Feld und Stützbereich angebracht, an denen gemäß Stufe 1 und 2 der Nachrechnung rechnerische Spannungsüberschreitungen ausgewiesen wurden (Bilder 3 und 4). Zur Temperaturkompensation der Dehnungsmessung wurde die Oberflä-

chentemperatur am Querträger in Feldmitte und an zwei Punkten an den Stegblechen erfasst.

Die Beschleunigungssensoren wurden im Rahmen von wissenschaftlichen Untersuchungen in Hinblick auf die Identifikation verkehrsbedingter Antwortreaktionsmuster des Bauwerks in den Feldbereichen angebracht. Insgesamt wurden zwei Sensoren in den Feldmitten der Felder 2 und 4 an der Unterseite eines Querträgers installiert (Bild 5).

Vor der Langzeitmessung erfolge im Oktober 2019 eine Kalibrierfahrt mit einem zuvor gewogenen Kalibrierfahrzeug (3-achsiger Muldenkipper). Das FE-Modell wurde anhand der Messergebnisse der definierten Überfahrten kalibriert. Die Beanspruchung der Restflächen wurde im Vergleich zur Norm nicht abgemindert. Die umgerechneten (FVT) Messergebnisse der Beschleunigungsmessung wurden zur Überprüfung der Steifigkeitsannahmen im FE-Modell über einen Vergleich der modalen Parameter bzw. des Frequenzgangs herangezogen. Über die Auswertung bzw. Kalibrierung der Dehnungsmessung bei definierter Lastüberfahrt konnten die Achslasten der Überfahrten während der Langzeitmessung abgeschätzt werden (exemplarische Messwertgraphen siehe Bilder 6 und 7).

Das Ziel der Langzeitmessung über mehr als 1 Jahr ist die Ermittlung eines Anpassungsfaktors für das Lastmodell LM1. Zur Ermittlung des Anpassungsfaktors ist eine stochastische Extremwertauswertung (99,9 % Fraktilwert für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren) der aufbereiteten Messdaten erforderlich. Dabei steht der auftretende Schwerverkehr im Fokus, für den unter Berücksichtigung des steigenden Verkehrsaufkommens ein Zuwachs von 20% angenommen wurde. Auf Basis der Messdaten wurde unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten eine charakteristische zukunftsichere Beanspruchung ermittelt. Die Beanspruchung wurde mit den nicht abgeminderten Spannungen aus der FE-Berechnung verglichen, um damit einen messbasierten Anpassungsbeiwert für das Lastmodell LM1 (Gleichlast und Doppelachse) zu bestimmen.

Zur Ermittlung des Betriebslastfaktors für die Ermüdungslasten wurden die im Messzeitraum aufgetretenen Spannungsspiele sowie die dazugehörigen Auftretenshäufigkeiten mittels eines Rain-

flow-Zählverfahrens bestimmt (Bild 8). Hierbei wurden nur Fahrzeuge mit einem Mindestgewicht von ca. 100 kN berücksichtigt. Zur Ermittlung des Betriebslastfaktors wird das gemessene mehrstufige Spannungskollektiv in ein Einstufen-Ersatzkollektiv mit einer schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite umgewandelt und anschließend mit der Spannungsschwingbreite der FE-Berechnung verglichen. Für die Ermittlung der Anpassungsfaktoren bzw. des Betriebslastfaktors wurden die Messdaten der gesamten Messperiode von Dezember 2019 bis Januar 2021 herangezogen.

Die Messanlage ist für einen Betrieb von 12 Monaten ausgelegt. Die Datenspeicherung und Verwaltung erfolgte mit kommerziell erhältlichen Systemen für die graphische (Echt-Zeit-) Auswertung von Sensormessdaten inklusive der Anzeige von Fehlermeldungen. Für die Auswertung der Rohdaten und die Ermittlung der Anpassungsbeiwerte bzw. Betriebslastfaktoren wurde vom Fachplaner Monitoring (Universität) eine eigene Routine in der Programmiersprache Python entwickelt.

Folgerung

Aus den Messungen über mehr als eine Jahresperiode konnte für die Nachrechnung ein messbasiertes Verkehrslastmodell (Anpassung des Lastmodells LM1) nach Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie aufgestellt werden. Während der gesamten Messdauer traten keine Spannungsüberschreitungen auf. Die Anzahl der potentiell zu verstärkenden Bereichen konnte daraus folgend deutlich reduziert werden.

Die Sensordaten werden derzeit als Testdaten für die Weiterentwicklung des Digitalen Zwilling von Brückenbauwerken zur Abbildung des Lebenszyklus bzw. des digitalen Erhaltungsmanagements weiterverwendet (Bild 9).

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

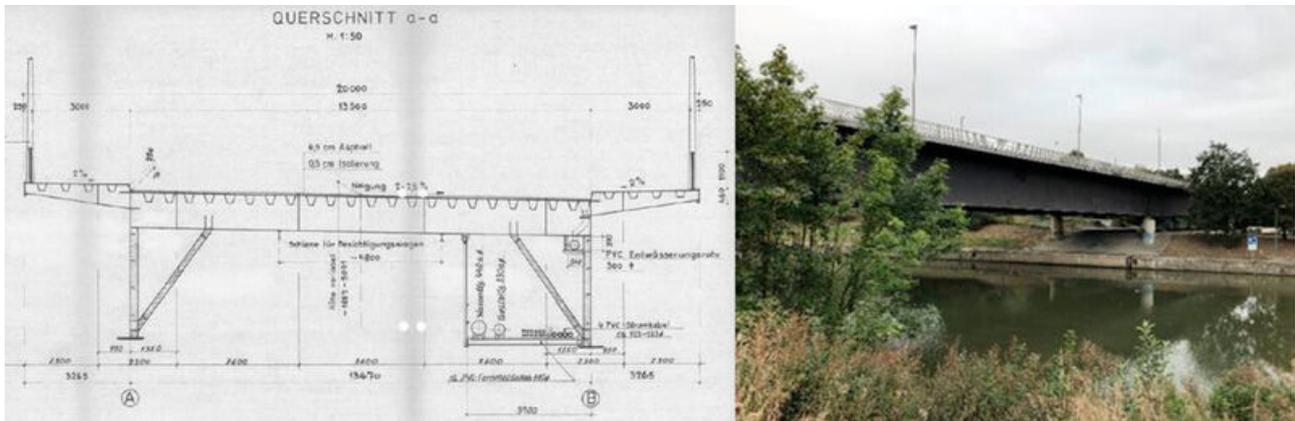


Bild 1: Regelquerschnitt (links) und Ansicht (rechts), Quelle: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München

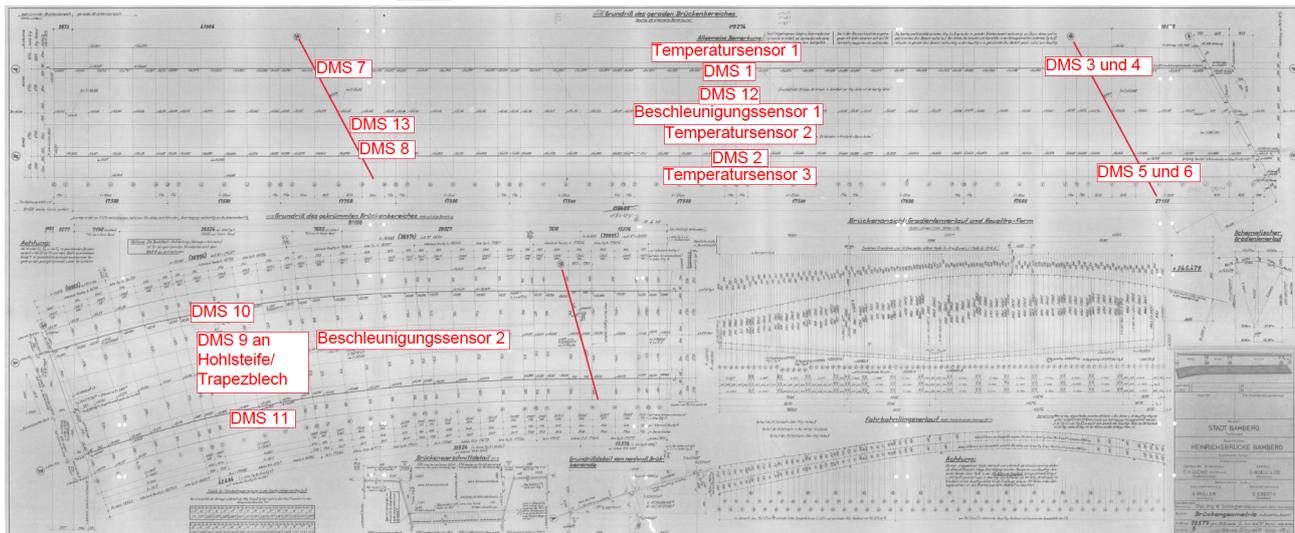
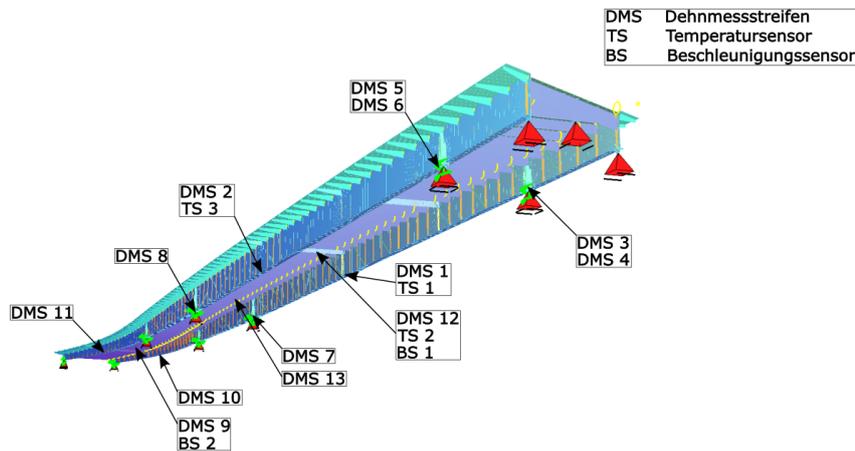


Bild 2: Übersicht der Messstellen, Quelle: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München



Bild 3: Anbringung der Dehnungsmessstreifen, Quelle: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München; IXIST Measurement GmbH



Bild 4: Anbringung der Temperatursensoren, Quelle: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München; IXIST Measurement GmbH



Bild 5: Installation Beschleunigungssensoren, Quelle: IXIST Measurement GmbH

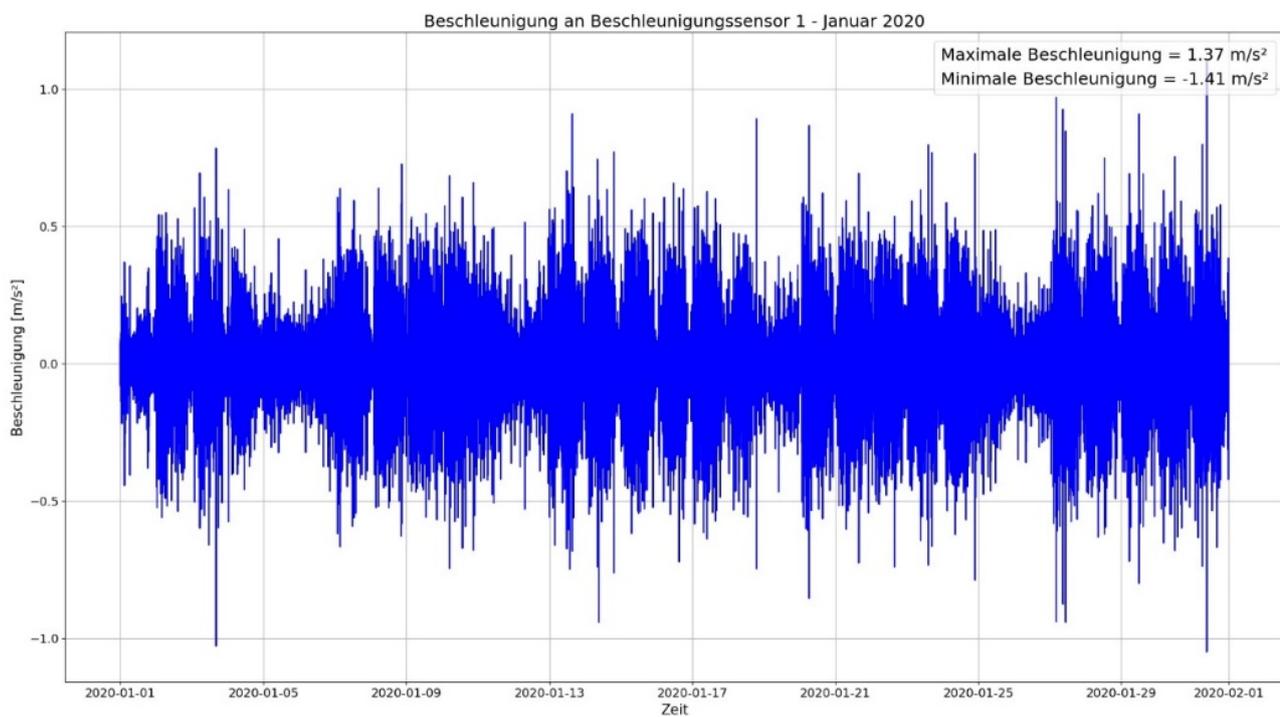


Bild 6: Exemplarischer Messwertgraph der Beschleunigungsmessung, Quelle: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München

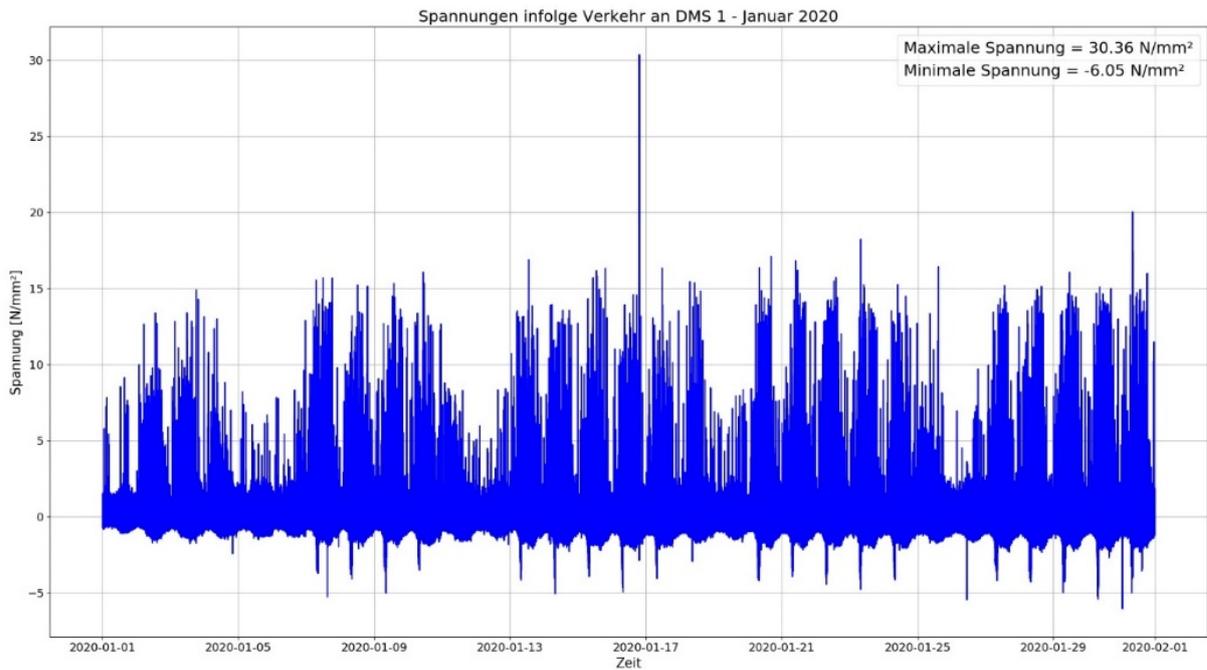


Bild 7: Exemplarischer Messwertgraph der Spannungsmessung, Quelle: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München

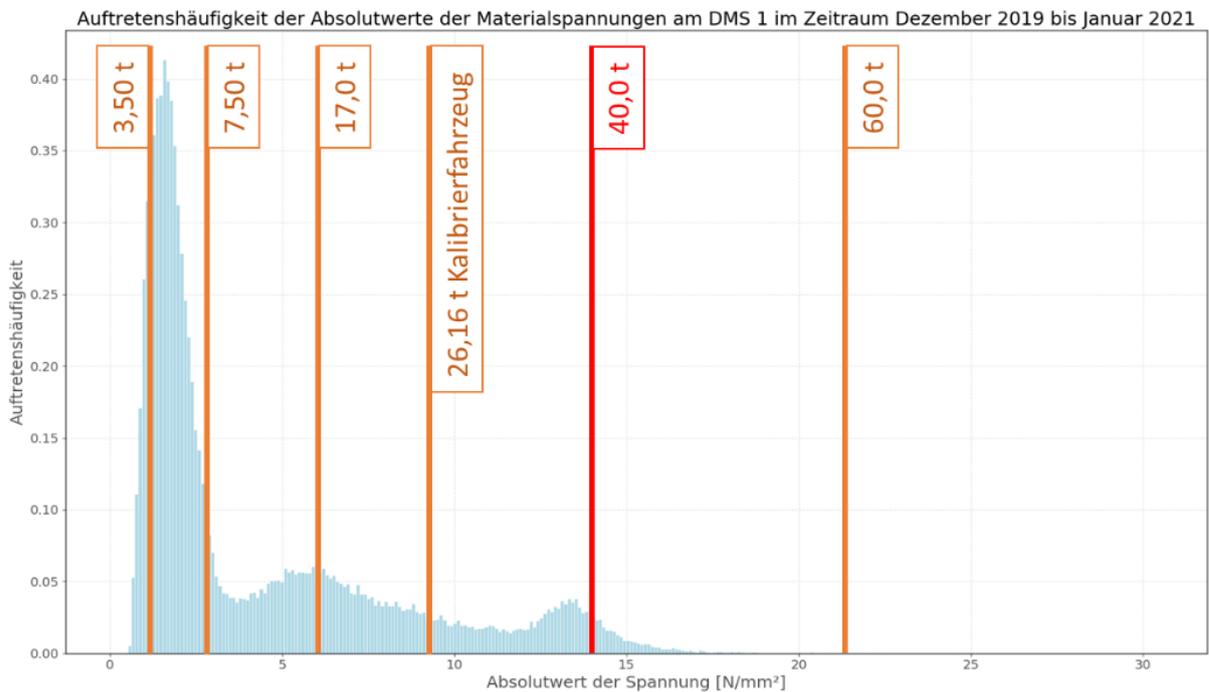


Bild 8: Auftretenshäufigkeit der Absolutwerte der Materialspannungen am DMS 1 / Zeitraum 14 Monate / Einteilung des Verkehrsaufkommens in Fahrzeugkategorien, Quelle: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München

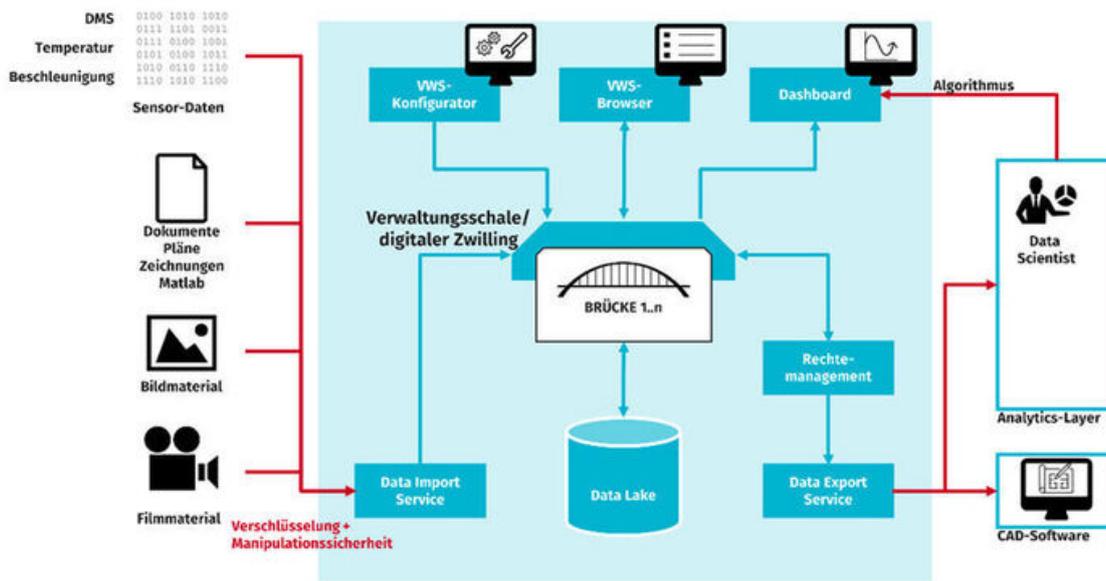


Bild 9: Konzept für die Umsetzung des digitalen Zwillings für Bauwerke der Infrastruktur – Verwaltungsschale Bbox, Quelle: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München

Monitoring 1.2

Ermittlung eines modifizierten Ermüdungslastmodells LM4 für den Ermüdungsnachweis nach Nachrechnungsrichtlinie

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	42,40 – 30,00 – 30,00 – 30,00 – 30,00 – 30,00 – 30,00 – 30,00 – 35,00 – 49,00 – m 40,40 m	
1.2 Zahl der Felder:	11	
1.3 Brückenfläche:	3928	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1968	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Durchlaufträger
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Zweistegiger Plattenbalken
2.4 System der Lagerung:	Rollenlager, Punktkipplager, Topfgleitlager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Stützenreihe, massiv
2.6 Widerlager:	Massiv, begehbar
2.7 Gründung:	Stützengründung als Tiefgründung (Ramppfähle), Widerlager auf Streifenfundamenten (Flachgründung)
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton B450 nach DIN 1045: C30/37 (Zuordnung gemäß NRR, Tab. 11.1), Spannstahl St125/140
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton B450 nach DIN 1045: C30/37 (Zuordnung gemäß NRR, Tab. 11.1)
3.3 Widerlager:	Stahlbeton B300 nach DIN 1045: C20/25 (Zuordnung gemäß NRR, Tab. 11.1)

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Defizite im normativen Ermüdungsnachweis

Angaben zur Art des Monitorings

1. Messtechnik:

- Sensortechnik: Dehnungssensor: iNDTact µeps iXS
- Messbereich Sensortechnik: ± 1385 ppm
- Erwartete Messunsicherheit: Objektspezifische Betrachtung der Unsicherheit in der Auswertung der Ermüdungslastermittlung:
* Achslast: 0,362 Tonnen pro Achse
* Zählung: False positives 9.23 %, False negatives 3.13 %
- Temperaturkompensation: Messung der Außenlufttemperatur
- Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Wetterstation, Kameras, Auswerteeinheit, LTE-Router

2. Grund des Monitorings:

Unterstützung der Nachrechnung, Ermittlung eines objektspezifischen Ermüdungslastmodells

3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:

20 Dehnungssensoren
1 Wetterstation
2 Kameras (1 je Fahrtrichtung)
Feld 8, Stützbereich

4. Messort am Bauwerk:

Unterseite Fahrbahnplatte

5. Installationsbereich:

Unterseite Fahrbahnplatte

6. Installationsart:

Geklebt

7. Kosten der Monitoringmaßnahme:

- Gesamtkosten: 85.000,00 €
- Planungskosten: *In Gesamtkosten enthalten* €
- Installationskosten: *In Gesamtkosten enthalten* €
- Betriebskosten: *In Gesamtkosten enthalten* €
- Kosten Datenmanagement: *In Gesamtkosten enthalten* €

8. Zeitraum/ Dauer der Installation:

4 Tage, Juli 2019

9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:

Kurzzeitmonitoring, August bis September 2019

10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:

- Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
- Erstellung Monitoringkonzept: Spezialdienstleister für Zustandsüberwachung/ Sensorhersteller
- Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Zustandsüberwachung/ Sensorhersteller
- Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Zustandsüberwachung/ Sensorhersteller
- Datenaufbereitung: Spezialdienstleister für Zustandsüberwachung/ Sensorhersteller
- Auswertung der Messergebnisse: Spezialdienstleister für Zustandsüberwachung/ Sensorhersteller
- Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | | |
|---------------------------------------|--|--|-----|
| 1. Ziel der Messung: | Unterstützung der Nachrechnung, Erfassung der Einwirkungen | | |
| 2. Messgrößen: | | | |
| - Dehnung: | ± 1385 | | ppm |
| - Temperatur: | -30 bis +70 | | °C |
| 3. Abtastrate: | | | |
| - Dehnung: | 5200 | | Hz |
| - Temperatur: | 1 | | Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | | | |
| - Dehnung: | Kontinuierlich | | |
| - Temperatur: | 10 | | min |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Einmalig nach einem Monat | | |
| 5. Daten: | | | |
| - Dehnung: | Echtzeitsignal | | |
| - Temperatur: | Min-, Max-, Mittelwert | | |
| 6. Datenformat: | Dehnungsmessung: *.tdms
Umweltdaten: *.csv | | |
| 7. Datenerfassung: | Edge-Gateway, Weiterleitung zur Cloud | | |
| 8. Datenübertragung: | Edge-Gateway, LTE-Router | | |
| 9. Datenmanagementsystem: | Cloud-Plattform | | |
| 10. Datenauswertung: | | | |
| - Prozess: | Firmeneigene Algorithmen, Cloud-Computing | | |
| - Ausgabe: | Grafische Auswertung abrufbar über die Cloud | | |
| 11. Datenverwendung: | Messtechnische Ergänzung der Nachrechnung | | |
| 12. Alarmierungsplan: | Nicht erforderlich | | |
| - Grenzwert: | - | | |
| - Alarmierungskette: | - | | |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | - | | |

Monitoringmaßnahme:	1. Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung	Lfd. Nr.:	1.2	Blatt:	4
---------------------	--	-----------	-----	--------	---

Beschreibung des Monitorings

Das Spannbetragwerk soll durch einen Ersatzneubau ersetzt werden. Im Zuge einer Nachrechnung wurde die Restnutzungsdauer des Bauwerks geprüft. Die Nachrechnung mit normativem (modifizierten) Ermüdungslastmodell führte zu einer unzureichenden Restnutzungsdauer vor dem Hintergrund des geplanten Baubeginns des Ersatzneubaus. Infolgedessen wurde die Ermittlung eines objektspezifischen Lastmodells zur Ermüdungsberechnung angestrebt, da die tatsächliche Verkehrszusammensetzung insbesondere des Schwerverkehrs und deren Masseverteilung nicht bekannt war. Gesucht war die Verteilung der fünf Standardlastkraftwagen – inkl. der Masseverteilung innerhalb der Gruppen – entsprechend des modifizierten LM 4 für Ermüdungsberechnungen analog DIN EN 1991-2 unter Berücksichtigung der Messungen am Objekt (vgl. NRR. 10.1.4 (2b)) für die Ermüdungsberechnung.

Die Zielstellung des Monitorings wurde von der Straßenbauverwaltung gestellt. Seitens des Spezialdienstleisters Monitoring erfolgte die technische

Machbarkeitsprüfung und Konzeptionierung zur Ermittlung der Messgrößen.

Zur Ermittlung des tatsächlichen Lastenprofils wurde die Fahrzeugkategorie, Anzahl und die Achslast mit Hilfe einer speziellen Verformungsmessung während des Beobachtungszeitraums bestimmt. Die Sensorik wurde auf der Unterseite des Überbaus angebracht (Bilder 1 und 2). Das Monitoringsystem wurde vor Beginn des Beobachtungszeitraums durch gezielte Überfahrten von Fahrzeugen mit bekannter Achslast und Geschwindigkeit kalibriert. Zur Verifizierung der Messereignisse wurde je Fahrtrichtung eine Kamera zur Abschätzung der Fahrzeugklasse aufgestellt (Bild 3).

Insgesamt wurden Messdaten von vier Wochen erfasst und für das Ermüdungslastmodell ausgewertet. Die Datenübergabe erfolgte als Abschlussbericht an die Straßenbauverwaltung.

Folgerung

Auf Basis der Ergebnisse konnten die Lastansätze für den Ermüdungsnachweis objektspezifisch angepasst werden (Bild 5). Der Betrieb kann unter Ansatz des angepassten Lastansatzes über die rechnerische Restnutzungsdauer hinaus aufrechterhalten werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

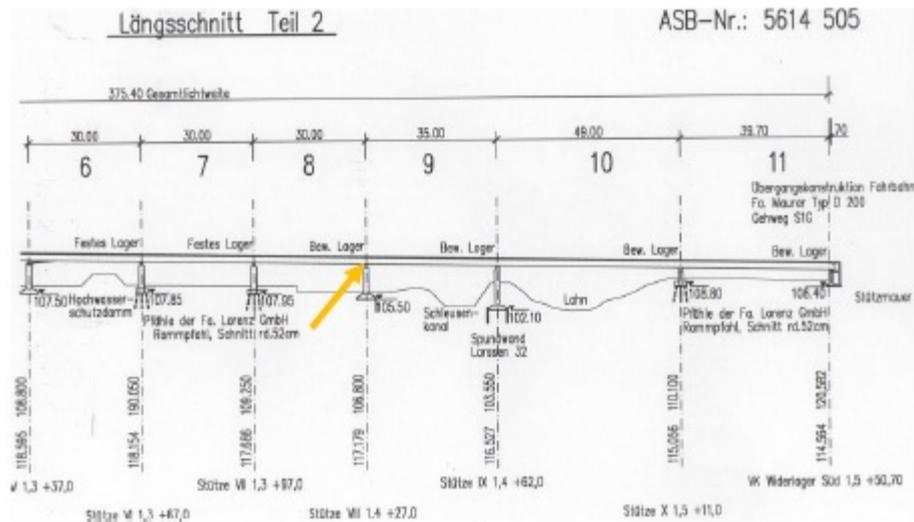


Bild 1: Skizze der Sensorpositionen in der Ansicht, Quelle: iNDTact GmbH



Bild 2: Sensorinstallation an der Unterkante, Quelle: iNDTact GmbH



Bild 3: Wetterstation (li) und Kamera (re), Quelle: iNDTact GmbH

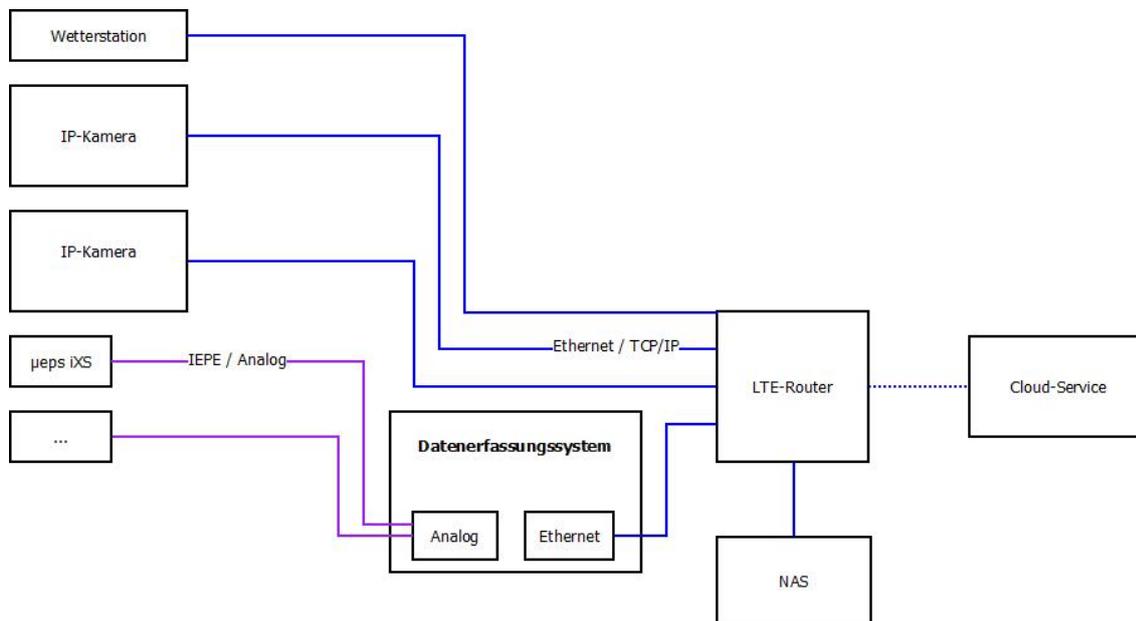


Bild 4: Messsystemarchitektur, Quelle: iNDTact GmbH

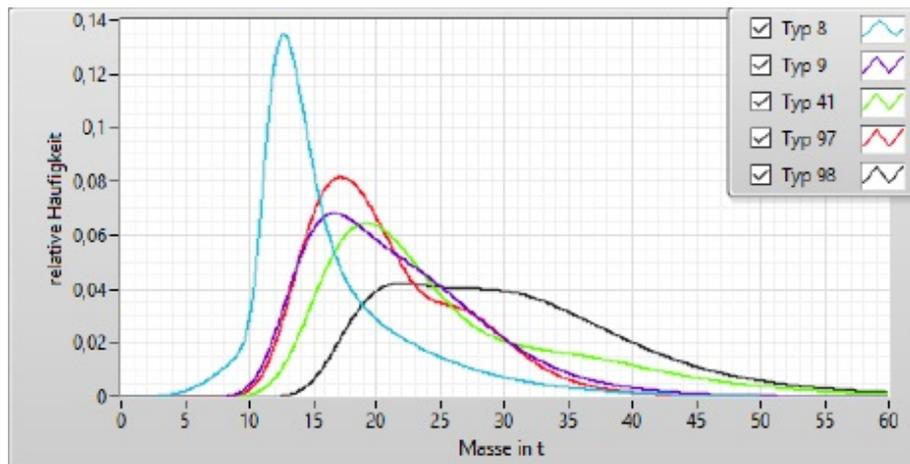


Bild 5: Bimodale Gumbelverteilung der objektspezifischen Ermüdungslastmodelle, Quelle: iNDTact GmbH

Monitoringmaßnahme:	1. Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung	Lfd. Nr.:	1.3	Blatt:	1
---------------------	--	-----------	-----	--------	---

Monitoring 1.3 **Erfassung der Fahrzeugüberfahrten mit Magnetfeldsensoren zum Plausibilisieren ermüdungsrelevanter Dehnmessereignisse**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1	Einzel- und Gesamtstützweiten:	55,00 – 57,60 – 29,60	m
1.2	Zahl der Felder:	3	
1.3	Brückenfläche:	1348	m ²
1.4	Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5	Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6	Baujahr:	1979	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1	Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2	Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3	Bauwerkssystem in Querrichtung:	Torsionssteifer Balken
2.4	System der Lagerung:	Verformungslager
2.5	Pfeiler / Stützen:	Rundstütze
2.6	Widerlager:	Widerlager mit Flügelwänden
2.7	Gründung:	Flachgründung
2.8	Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Feuerverzinkte Oberfläche

3. Baustoffe

3.1	Überbau:	Spannbeton: Spannstahl St1570/1770, Beton B 450 nach DIN 1045 bis 1972, Betonstahl BSt 42/50 RU (III U) nach DIN 488 Ausgabe 1972 und früher
3.2	Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: Bn 250 bzw. B 25 nach DIN 1045 ab 1972
3.3	Widerlager:	Stahlbeton: Bn 250 bzw. B 25 nach DIN 1045 ab 1972

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Spannbetonbauwerk mit rechnerischen Ermüdungsdefiziten

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: AMR-Magnetfeldsensoren
 - Messbereich Sensortechnik: ± 400 A/m
 - Erwartete Messunsicherheit: 2 nT
 - Temperaturkompensation: -
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, dezentrale Messverstärker, Auswerterechner, Speicher (NAS), Kommunikationsmodule
Stromversorgung und Sicherungskasten
Unterstützung der Nachrechnung
- 2. Grund des Monitorings:**
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 4 Magnetfeldsensoren,
2 einaxiale Beschleunigungssensoren (Monitoring 8.1),
2 dreiaxiale faseroptische Beschleunigungssensoren,
10 DMS (elektrisch) (Monitoring 9.2),
18 Fiber Bragg Gitter
- 4. Messort am Bauwerk:** Überbau Ost, südliches Feld
- 5. Installationsbereich:** Unterhalb der Fahrbahnplatte
- 6. Installationsart:** In Schutzbox geschraubt
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:** *Gesamtkosten der in Monitoring 1.2, Monitoring 8.1 und Monitoring 9.2 beschriebenen Maßnahmen.*
 - Gesamtkosten: 186.000,00 €
 - Planungskosten: 94.000,00 €
 - Installationskosten: 91.000,00 €
 - Betriebskosten: 1.000,00 €
 - Kosten Datenmanagement: *In Planungskosten enthalten* €
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 3 Wochen
(Installationszeitraum der Gesamtmaßnahme)
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Kurzzeitmonitoring, 3 Monate in 2020
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro, Fachgebiet Strukturmechanik*)
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | |
|-----|------------------------------------|---|
| 1. | Ziel der Messung: | Erfassung Fahrzeugüberfahrten |
| 2. | Messgrößen: | |
| | - Magnetfeldmessung: | ± 400 A/m |
| 3. | Abtaste: | |
| | - Magnetfeldmessung: | Ereignisbedingt (Messaufnahme bei Störung des Magnetfeldes durch Fahrzeugüberfahrt) |
| 4. | Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| | - Magnetfeldmessung: | Ereignisbedingt |
| 5. | Frequenz Datenauswertung: | Echtzeit Online-Ausgabe,
Gesamtauswertung nach 3 Monaten |
| 6. | Daten: | |
| | - Magnetfeldmessung: | Überfahrtenzählung, ereignisbedingt |
| 7. | Datenformat: | Binär, *.csv |
| 8. | Datenerfassung: | Eigenentwicklung, Gantner Testcommander |
| 9. | Datenübertragung: | Kabel |
| 10. | Datenmanagementsystem: | Eigenentwicklung Fachplaner |
| 11. | Datenauswertung: | |
| | - Prozess: | Eigenentwicklung Fachplaner Monitoring,
Octave, Matlab, Excel |
| | - Ausgabe: | Messbericht und Ergebnispräsentation an Prüfer
und Straßenbauverwaltung |
| 12. | Datenverwendung: | Ermüdungsnachweis gem. Stufe 3, |
| 13. | Alarmierungsplan: | Nicht erforderlich |
| | - Grenzwert: | - |
| | - Alarmierungskette: | - |
| | - Zuständigkeit im Alarmfall: | - |

Beschreibung des Monitorings

Das Bauwerk besteht aus einer schlaff bewehrten Stahlbetonrampe und zwei längs- und quer vorge-spannten Überbauten. In der Nachrechnung nach Stufe 1 und 2 der Nachrechnungsrichtlinie konnten rechnerische Spannungsüberschreitungen im Ermüdungsnachweis ausgewiesen werden. Zur Überprüfung der tatsächlich auftretenden Schwingbreite in der Längs- und Bügelbewehrung wurden eine messtechnische Ergänzung der Nachrechnung nach Stufe 3 und 4 der Nachrechnungsrichtlinie angestrebt. Die Ausschreibung des Monitoringsystems erfolgte als funktionale Ausschreibung und definierte die folgende Aufgabenstellung:

1. Messung der Beton- und Betonstahldehnungen an Längs- und Bügelbewehrung (Monitoring 9.2) sowie Beschleunigungen (Monitoring 8.1) unter laufendem Verkehr
2. Kalibrierüberfahrten zur Verifizierung der Berechnungsmodelle
3. Datenerfassung, Speicherung und Auswertung

Die Messungen wurden als Kurzzeitmonitoring über einen Zeitraum von 3 Monaten durchgeführt.

Das Messsystem wurde so ausgelegt, dass der Einsatz für ein Langzeit- bzw. Dauermonitoring möglich ist

Zur Plausibilisierung der verkehrsbedingten Dehnungs- und Beschleunigungsereignisse wurden Magnetfeldsensoren zur präzisen Erfassung der Fahrzeugüberfahrten vorgesehen. Die Magnetfeldsensoren wurden je Fahrtrichtung unterhalb der Übergangskonstruktion installiert (Bilder 1 bis 4). Die Sensoren erfassen den exakten Zeitpunkt der Auffahrt und des Verlassens eines Fahrzeugs auf dem Bauwerk. Aus den Messergebnissen lässt sich ein genauer Zeitstempel der Überfahrt für den Abgleich mit den Dehnungs- und Beschleunigungsmessungen generieren (Bild 5). Aus der Überfahrtdauer lässt sich die mittlere Geschwindigkeit des Fahrzeugs rückrechnen. Die Fahrzeugüberfahrten werden zusätzlich über Bildaufnahmen einer Kamera mit hinterlegtem Algorithmus zur automatisierten Objekterkennung dokumentiert.

Folgerung

Über die Erfassung der Verkehrsüberfahrten konnte eine Verifizierung der ereignisbedingten Dehnungs- und Beschleunigungsmessungen bzw. der Bauwerksreaktion erfolgen.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

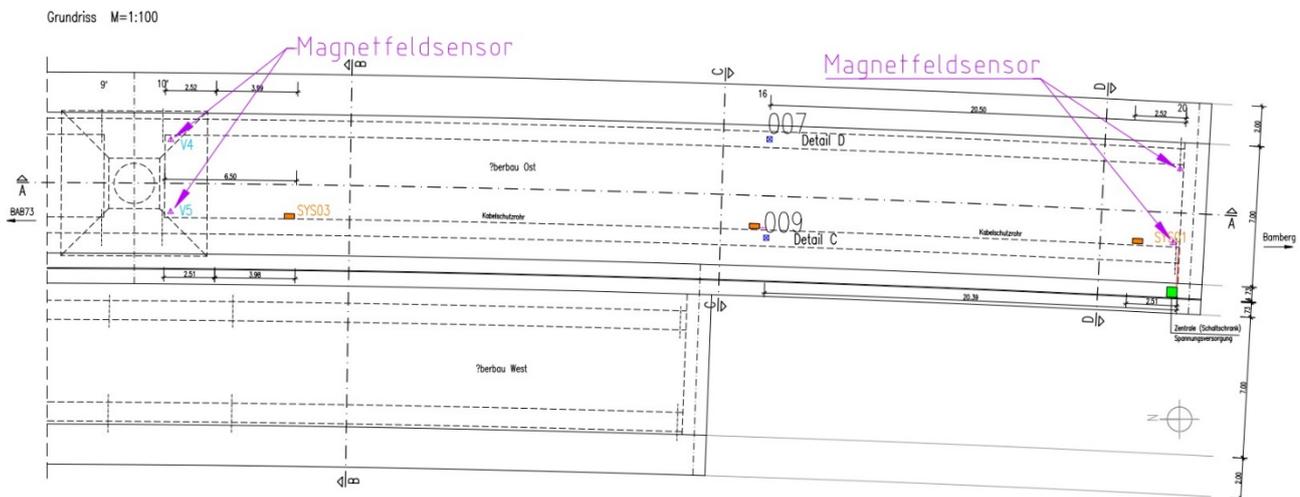


Bild 1: Lage der Magnetfeldsensoren in der Draufsicht; Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

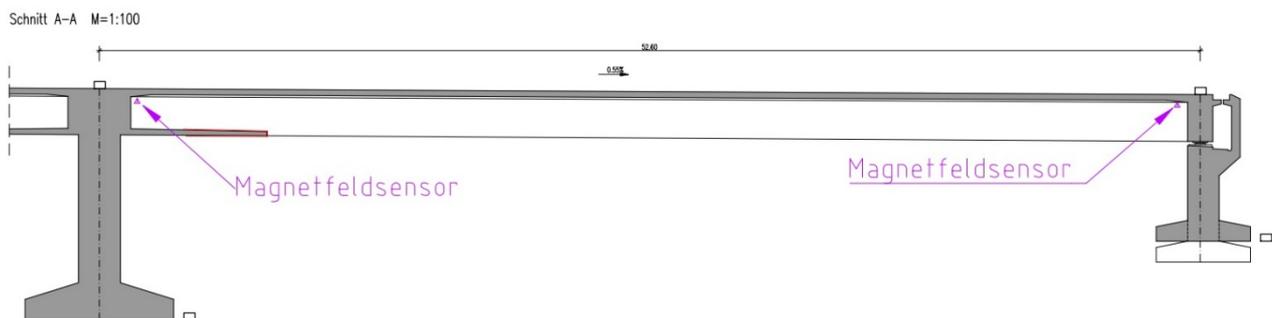


Bild 2: Lage der Magnetfeldsensoren in der Ansicht; Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

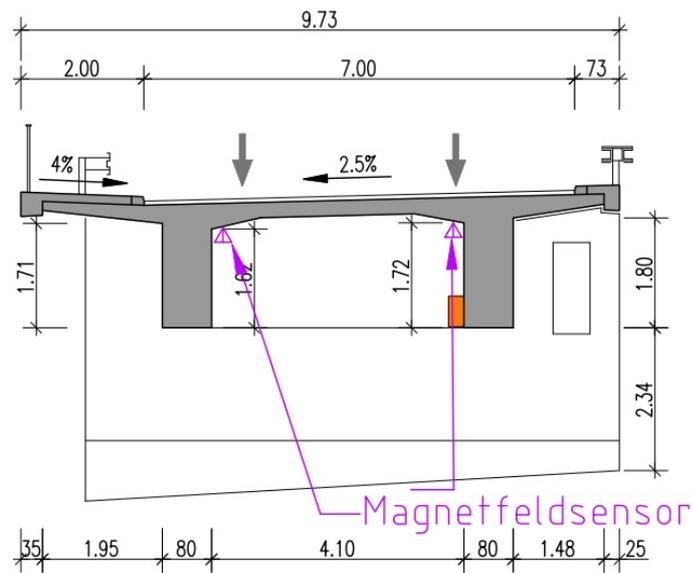


Bild 3: Lage der Magnetfeldsensoren im Querschnitt; Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

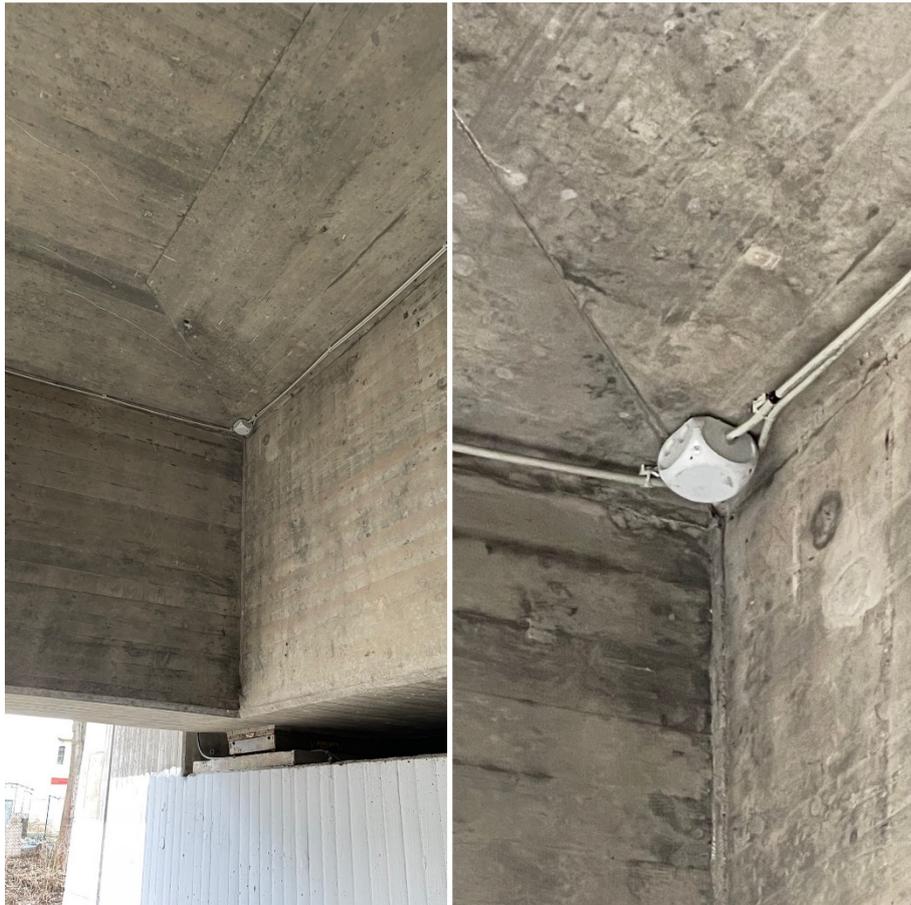


Bild 4: Magnetfeldsensor im installierten Zustand, Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

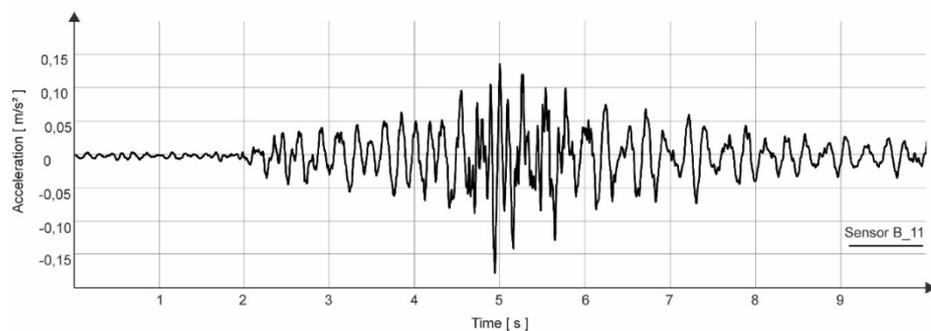
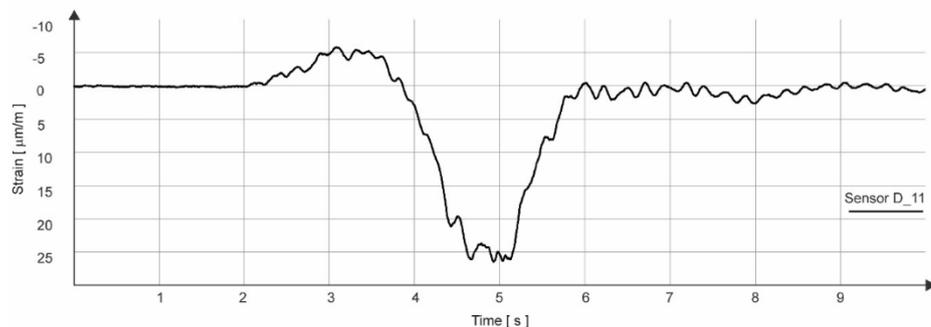
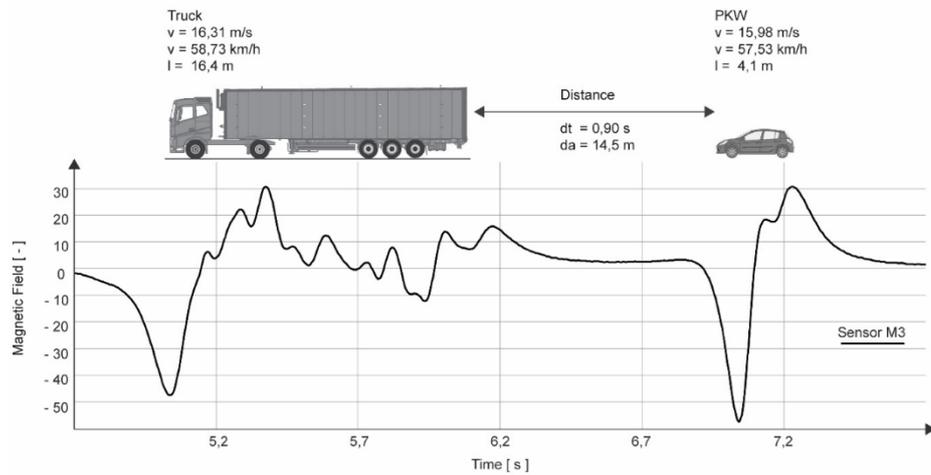
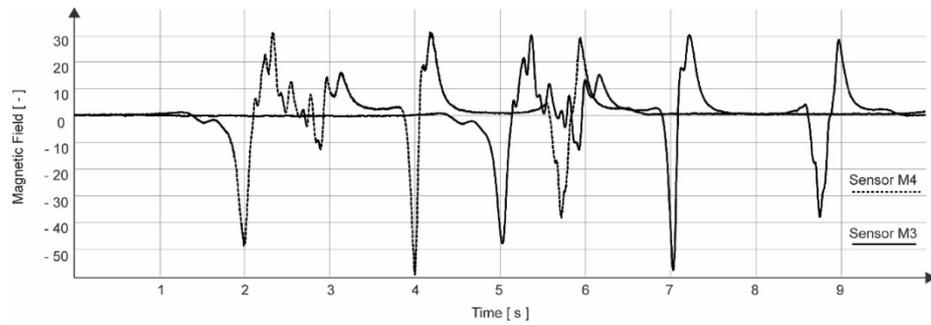


Bild 5: Magnetfeld- Fahrzeugklassifizierung im exemplarischen Vergleich zum erfassten Dehnungsereignis (Monitoring 8.1) und Beschleunigungsereignis (Monitoring 9.2), Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

2. Temperaturmessung

Monitoring 2.1 **Erfassung der Änderung der Grundbeanspruchung aus Temperatur zur messtechnisch gestützten Beurteilung der Ermüdungsgefährdung**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1	Einzel- und Gesamtstützweiten:	29,10 – 38,06 – 21,15 – 21,15 – 17,71	m
1.2	Zahl der Felder:	5	
1.3	Brückenfläche:	2411	m ²
1.4	Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5	Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6	Baujahr:	1980	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1	Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2	Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3	Bauwerkssystem in Querrichtung:	Zweizelliger Betonhohlkasten
2.4	System der Lagerung:	Elastomerlager, Kalottenlager
2.5	Pfeiler / Stützen:	Rundstützen
2.6	Widerlager:	Widerlager mit Flügelwand
2.7	Gründung:	Tiefgründung, Flachgründung mit Bodenersatz
2.8	Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtet

3. Baustoffe

3.1	Überbau:	Spannbeton
3.2	Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton
3.3	Widerlager:	Stahlbeton

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Rechnerische Defizite im Ermüdungsnachweis der Koppelfugen für BK 60 trotz Verstärkung durch externe Längsvorspannung
- Rissentwicklung detektiert durch gerissene Gips-Markierungen
- vollgestoßene Spannglieder (100% Stoß)
- Lagerverschiebung durch schlechten Untergrund

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Bauteiltemperaturmessung
 - Messbereich Sensortechnik: -20 bis +80 °C
 - Erwartete Messunsicherheit: -
 - Temperaturkompensation: -
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren inkl. Messverstärker, Datenlogger
2. **Grund des Monitorings:** Messbasiertes Nachweisverfahren gemäß Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 18 Induktive Wegaufnehmer (siehe Monitoring 9.1)
26 Widerstandsthermometer (Bauteiltemperatur)
1 Außenlufttemperaturfühler
4. **Messort am Bauwerk:** Koppelfugen
5. **Installationsbereich:** Gleichmäßig verteilt im Hohlkastenquerschnitt
6. **Installationsart:** In Bohrlöcher eingebracht
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:** *Gesamtkosten der in Monitoring 2.1 und Monitoring 9.1 beschriebenen Maßnahmen*
 - Gesamtkosten: 142.000,00 €
 - Planungskosten: 18.000,00 €
 - Installationskosten: 49.000,00 €
 - Betriebskosten: 75.000,00 €
 - Kosten Datenmanagement: *In Gesamtkosten enthalten* €
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 3 Tage
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, 1 Jahr
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Fachplaner Monitoring (Tragwerksplaner*)
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Erfassung der Bauteiltemperatur zur Abschätzung der Änderung des ermüdungsrelevanten Grundmoments aus Temperatur |
| 2. Messgrößen: | |
| - Temperatur: | -20 bis +80 °C |
| 3. Abtastrate: | |
| - Temperatur: | 0,001 Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Temperatur: | 15 min |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Monatlich |
| 5. Daten: | |
| - Temperatur: | Momentanwert |
| 6. Datenformat: | *.xcl |
| 7. Datenerfassung: | Server |
| 8. Datenübertragung: | Ethernet Schnittstelle, automatischer E-Mail Versand |
| 9. Datenmanagementsystem: | - |
| 10. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | - |
| - Ausgabe: | Grafische und tabellarische Ausgabe in Form von Monats- und Jahresauswertungen, Bericht |
| 11. Datenverwendung: | Bewertung der Einflussparameter der Ermüdungsbeanspruchung |
| 12. Alarmierungsplan: | Nicht erforderlich |
| - Grenzwert: | - |
| - Alarmierungskette: | - |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | - |

Beschreibung des Monitorings

Für das Bauwerk (Bild 1) konnte für einige Koppelfugen der rechnerische Ermüdungsnachweis nicht vollständig erbracht werden. Zur Erfassung der tatsächlichen ermüdungsrelevanten Schwingbreite wurden die Koppelfugen mit Wegaufnehmern (siehe Monitoring 9.1) und Temperatursensoren über einen Jahreszyklus überwacht.

Für das Bauwerk konnte aufgrund des Bauwerksalters von ca. 40 Jahren von einer abgeschlossenen zeitabhängigen Schnittgrößenumlagerung ausgegangen werden. Die Schwankungen der ermüdungsrelevanten Grundbeanspruchung werden unter dieser Annahme allein durch die Temperaturbeanspruchung hervorgerufen. Geht der Querschnitt bei Anstieg der Grundbeanspruchung in den gerissenen Zustand über, kann dies zu einem überproportionalen Anstieg der Schwingbreite führen.

Die Schwingungsamplitude wird in diesem Fall ermüdungsrelevant. Die messtechnische Erfassung der Änderung des Grundmoments aus Temperatur über einen längeren Zeitraum kann nach NRR für die Bewertung der Ermüdungsgefährdung aussagekräftig sein.

Zur Erfassung des tatsächlichen Temperaturgradienten und Abschätzung einer realen Temperaturbeanspruchung wurden je 13 Temperatursensoren über den Querschnitt an der Holkasteninnenseite an 2 Messstellen angeordnet (Bild 2). Die Sensoren wurden zur Bauteiltemperaturmessung in Bohrlöcher eingelassen und verschlossen. Zusätzlich wurde ein Außentemperaturfühler zur Plausibilitätskontrolle installiert. Die Temperaturmessungen wurden in einem Viertelstundetak durchgeführt.

Folgerung

Mittels der über den Querschnitt verteilten Temperaturmessungen konnte eine messbasierte statistische Abschätzung des linear veränderlichen Temperaturanteils über einen Jahreszyklus an zwei Querschnittsstellen ausgewertet werden. Bild 3 zeigt die Gegenüberstellung der ermittelten realen Temperaturdifferenz über einen Jahreszyklus im Vergleich zu den Auftretenswahrscheinlichkeiten der Temperaturbeanspruchungen nach NRR. Der Bereich der rechnerischen Temperaturbeanspruchung gemäß NRR wurde vollständig abgedeckt.

Bilder, Installationskizzen und Messwertgraphen

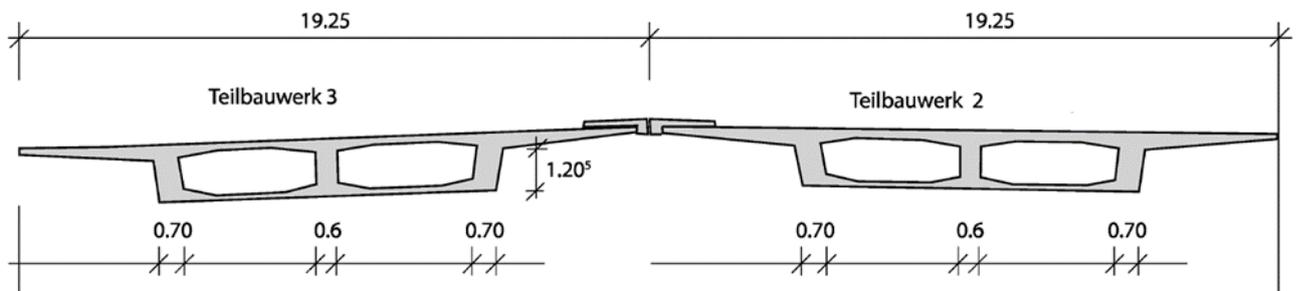


Bild 1: Querschnitt, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Rheinland

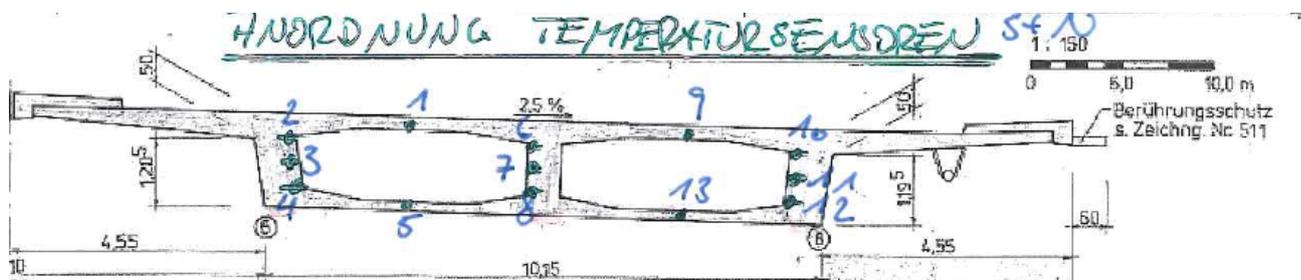


Bild 2: Anordnung der Wegaufnehmer und Temperatursensoren, Quelle: EHS beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH

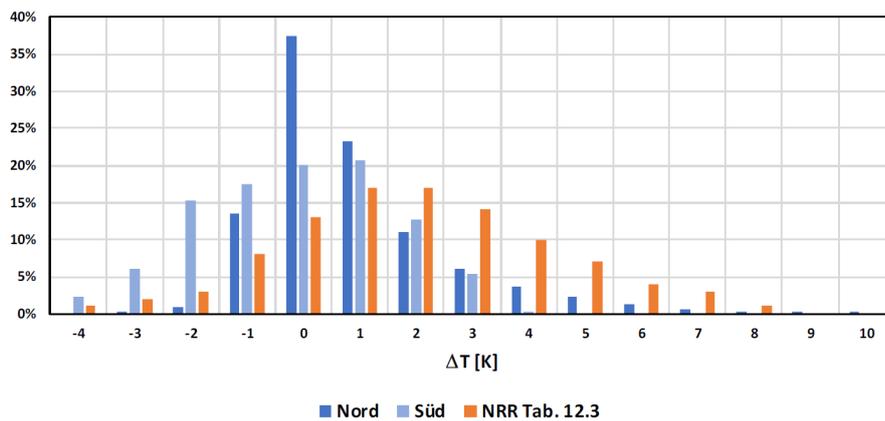


Bild 3: Auftretenswahrscheinlichkeiten des Temperaturgradienten gemäß Nachrechnungsrichtlinie, Quelle: EHS beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH

Monitoringmaßnahme:	3. Feuchtigkeitsmessung	Lfd. Nr.:	3.1	Blatt:	1
---------------------	-------------------------	-----------	-----	--------	---

3. Feuchtigkeitsmessung

Monitoring 3.1 **Feuchtigkeitsmessung zur Überprüfung einer Pilotkonstruktion von Wildbrücken in Holzbauweise**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1	Einzel- und Gesamtstützweiten:	27,6	m
1.2	Zahl der Felder:	1	
1.3	Brückenfläche:	2312	m ²
1.4	Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5	Brückenklasse:	Wildbrücke p=0,5 kN/m ² + SLW30 in Alleinüberfahrt	
1.6	Baujahr:	2004	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1	Hauptbaustoff:	Holz	
2.2	Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Einfeldträger, Bogen	
2.3	Bauwerkssystem in Querrichtung:	Balkenartige und plattenartige Tragwerke	
2.4	System der Lagerung:	Bolzengelenke (Zylinder-Zapfenlager)	
2.5	Pfeiler / Stützen:	-	
2.6	Widerlager:	Kämpfer, Massivwand	
2.7	Gründung:	Flachgründung	
2.8	Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-	

3. Baustoffe

3.1	Überbau:	Lärchen-Brettschichtholz	
3.2	Pfeiler/ Stützen:	-	
3.3	Widerlager:	Stahlbeton: B25 / B25 LP, BSt 500 S	

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Pilotbauwerk von Wildbrücken in Holzbauweise

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Holzfeuchteelektroden
 - Messbereich Sensortechnik: 6 bis 90 M.-%
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,1 (Messauflösung) M.-%
 - Temperaturkompensation: Bauteil- und Außenlufttemperaturmessung
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, 2 Datenlogger
- 2. Grund des Monitorings:** Bestimmung der Holzfeuchte in Abhängigkeit vom Umgebungsklima
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 3 Elektrodenpaare (Messstellen Handmessung)
4 Elektrodenpaare (Messstellen Dauermessung)
1 Temperatursensor (Bauteiltemperatur)
1 Klimasensor (Luftfeuchte und Lufttemperatur)
- 4. Messort am Bauwerk:** Kämpfer, Halbbogen und First in 2 Achsen (Einfahrt, Brückenmitte) für Handmessung; Messstellen für Dauermessung in der Brückenmitte
- 5. Installationsbereich:** Seitenfläche Binder
- 6. Installationsart:** Verlegung der Kabel im Schutzrohr
Verschraubung der Elektroden im Holz
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 49.800,00 €
 - Planungskosten: 2.500,00 €
 - Installationskosten: 21.600,00 €
 - Betriebskosten: 6.200,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *in Betriebskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 12 Werktage, 2007
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, 2007 bis 2016
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Wissenschaftliche Einrichtung für Baustoff- und Bauteiluntersuchungen*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung

Informationsgewinn und Datenmanagement

1. **Ziel der Messung:** Überwachung der Holzfeuchten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen
2. **Messgrößen:**
 - Bauteilfeuchtemessung: 7 bis 30 M.-%
 - Bauteiltemperaturmessung: -30 bis 120 °C
 - Klimamessung: 0 bis 100 %rF
-20 bis 70 °C
3. **Abtastrate:** Periodische Handmessung 2007-2016; Elektronische Messung 2014-2016:
 - Bauteilfeuchtemessung: 2 h
 - Bauteiltemperaturmessung: 2 h
 - Klimamessung: 2 h
4. **Frequenz Datenaufzeichnung:** Periodische Handmessung 2007-2016; Elektronische Messung 2014-2016:
 - Bauteilfeuchtemessung: 2 h
 - Bauteiltemperaturmessung: 2 h
 - Klimamessung: 2 h
5. **Frequenz Datenauswertung:** 2 h
6. **Daten:**
 - Bauteilfeuchtemessung: Momentanwert
 - Bauteiltemperaturmessung: Momentanwert
 - Klimamessung: Momentanwert
7. **Datenformat:** *.tf2 (Scantronik), *.xls
8. **Datenerfassung:** GANN-Hydromette (Handmessung); Scantronik-Datenlogger (Dauermessung)
9. **Datenübertragung:** Auslesen der Daten vor Ort
10. **Datenmanagementsystem:** Dateiablage
11. **Datenauswertung:**
 - Prozess: Softfox (Scantronik)
 - Ausgabe: Berichterstattung mit grafischen Darstellungen, Jahresmessprotokolle
12. **Datenverwendung:** Überprüfung der Funktionstüchtigkeit des Abdichtungssystems und Dauerhaftigkeit der Pilotkonstruktion
13. **Alarmierungsplan:** Nicht erforderlich
 - Grenzwert: > 20 M.-%
 - Alarmierungskette: -
 - Zuständigkeit im Alarmfall: Sachverständiger für Holz

Beschreibung des Monitorings

2004 wurde die erste Grünbrücke in reiner Holzbauweise entwickelt und gebaut. Die Wildbrücke wurde als Gewölbebrücke mit Erdüberschüttung ausgeführt (Bild 1). Die tragenden Elemente der Brücke sind Dreigelenkbögen aus Lärchen-Brett-schichtholz mit einer Brettsperrholz-Bep-lankung. Zum Schutz vor Feuchtigkeit wurde auf der Brett-schichtholz-Schale ein Abdichtungssonderaufbau, ein Entwässerungssystem zur Vermeidung von Stauwasser im Lagerbereich und ein Durchwurzelungsschutz angebracht. Zur Kontrolle der Feuchtigkeit in der Holzkonstruktion der Pilotbauweise wurde mit Inbetriebnahme ein manuelles (händi-sches) und ab 2014 ein kontinuierliches Feuchte-monitoringsystem zur Überwachung möglicher Schadensfälle durch Undichtigkeiten installiert. Das Monitoringsystem besteht aus Elektroden-paaren für die händische und kontinuierliche Messung der Holzfeuchte, sowie Temperatursensoren zur Bestimmung der Bauteiltemperatur im Holz (Bilder

3 bis 5). Die Elektroden zur händischen Messung wurden im Bereich der Kämpfer, der Halbbögen und im First im Bereich der Einfahrt und Brückenmitte installiert. Die kontinuierlichen Elektroden der Dauermessung wurden in Brückenmitte angebracht (Bild 2). Zur Verifizierung der Holzfeuchte in Abhängigkeit der Umgebungsbedingung wurde zudem ein Klimasensor zur Erfassung der relativen Luftfeuchte und der Außenlufttemperatur am Halb-bogen des Binders in Brückenmitte installiert. Die gesamten Kabel der Messanlage wurden in Schutzrohren verlegt.

Das Auslesen der Messdaten erfolgte in regelmä-ßigen Abständen vor Ort. Die Messergebnisse wurden dem Auftraggeber in Jahresberichten auf-gearbeitet.

Folgerung

Mit dem Monitoring konnte nachgewiesen werden, dass zu keinem Zeitpunkt die für einen Schädlings-befall kritische Grenze der Holzfeuchte von >20 % in den untersuchten Bauwerksbereichen der Holz-konstruktion erreicht wurde (Bild 6). Seit Beginn des Monitorings wurden über einen Nutzungszeit-raum von Oktober 2004 bis Oktober 2016 die sich bei diesem Außenklima einstellenden Holz aus-gleichsfeuchten von <20% gemessen. Anomalien in der Holzfeuchtemessung wurden nicht festge-stellt. Durch die Überwachung der Holzfeuchte konnte das Monitoringsystem einen ergänzenden Beitrag zur Bauwerksprüfung liefern. Durch ein aktives Monitoring mit einem positiven Befund besteht die Möglichkeit, die Restnutzungsdauer auch über den veranschlagten Zeitraum hinaus zu verlängern. Überschreiten die Messwerte die

zulässige Holzfeuchte (z. B. über einen sehr lan-gen Zeitraum) und die Überschreitungen sind nicht auf Fehlermeldungen der Messtechnik zurückzu-führen, ist eine objektbezogene Bauwerksprüfung durch Sachverständige für Holz durchzuführen.

Bei Überprüfungen der Holzfeuchte im Oktober 2011 konnte eine Holzfeuchte in 4 cm Tiefe zwi-schen 13,4 und 15,3 Prozent festgestellt werden. Dies entspricht der Nutzungsklasse 2 nach DIN 1052. Infolge des positiven Befundes hinsichtlich der Dauerhaftigkeit wurde im Jahr 2012 die zweite Wildbrücke in analoger Bauweise ausgeschrieben und erstellt.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Ansicht der Brücke, Quelle: DEGES

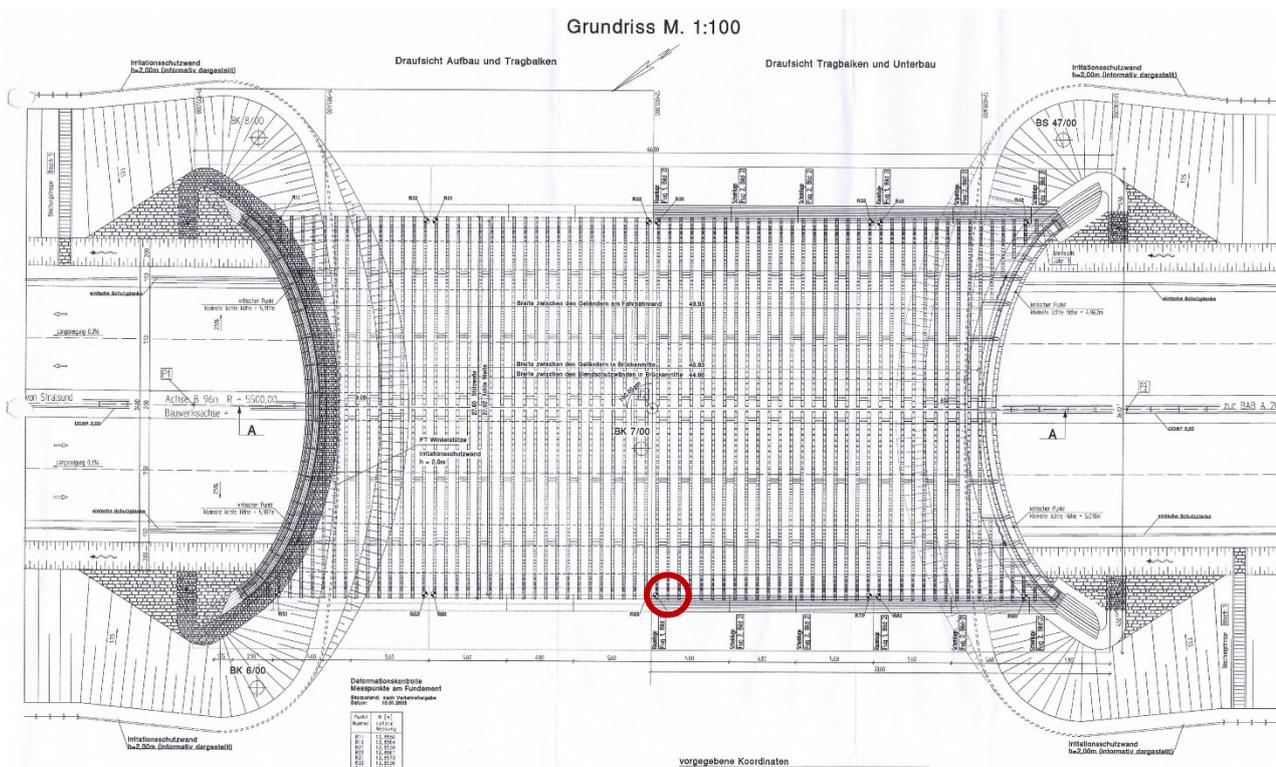


Bild 2: Lage der Messstellen, Quelle: KBauMV FH Wismar



Bild 3: Messkasten mit Datenlogger und Widerstandsmessmodul, Quelle: KBauMV FH Wismar

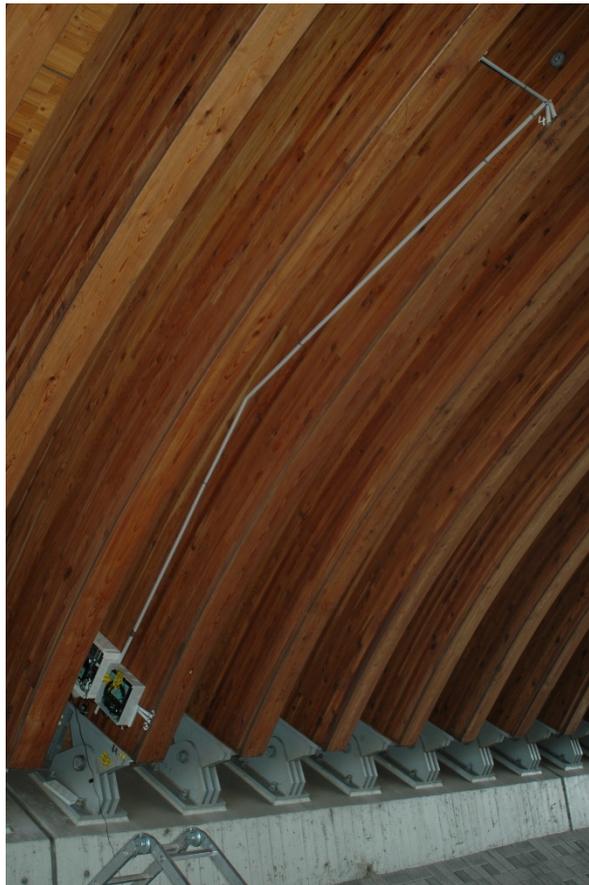


Bild 4: Anordnung der Elektroden (für das Dauermonitoring, Elektroden der Handmessung separat angeordnet), Quelle: KBauMV FH Wismar

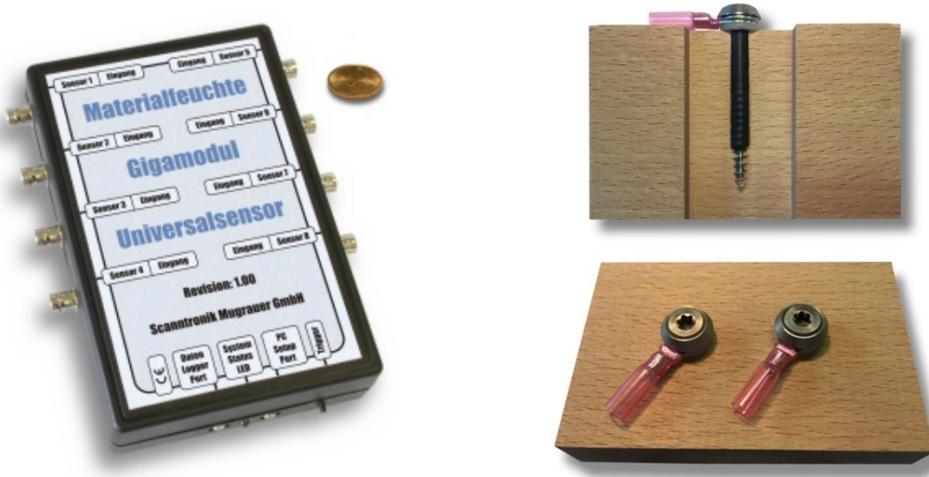


Bild 5: Datenlogger Erweiterungsmodule (li.) und isolierte Holz-Elektroden (re.),
Quelle: Scantronik Mugrauer GmbH

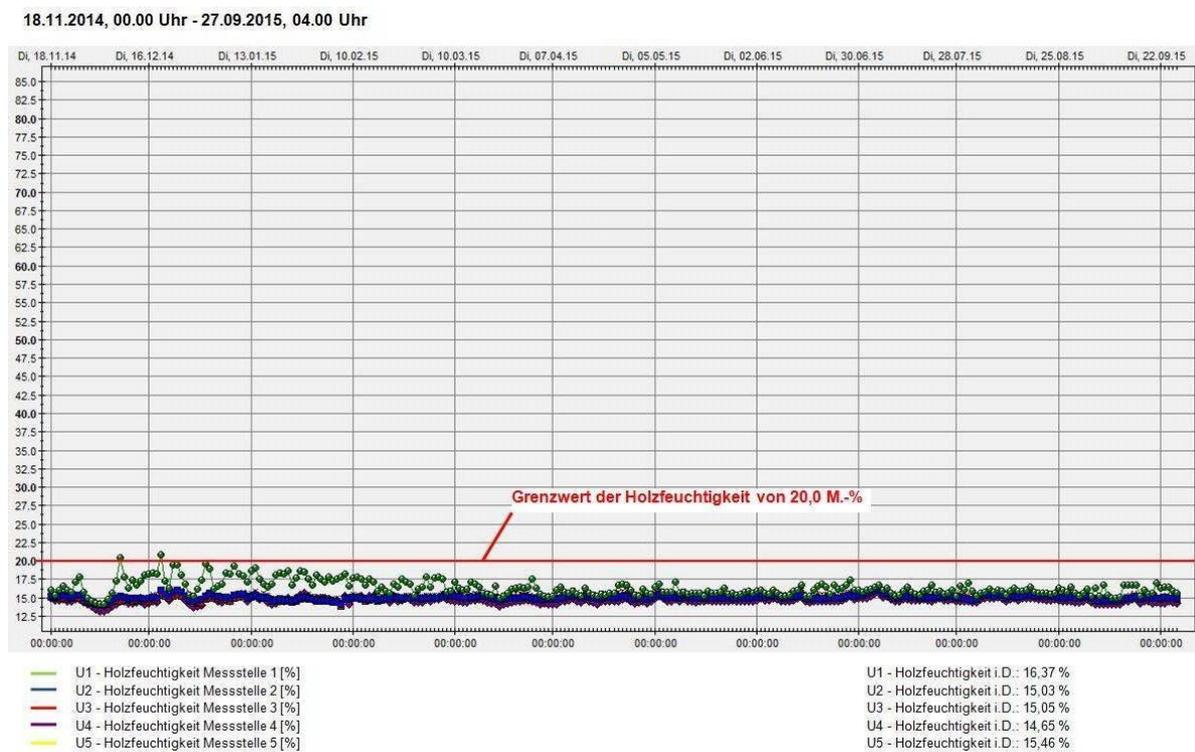


Bild 6: Messdiagramm der Holzfeuchte in SoftFOX, Quelle: KBauMV FH Wismar

Monitoring 3.2 Feuchtigkeitsmessung zur Überprüfung der Holzfeuchte und Funktionstüchtigkeit der Bauwerksabdichtung

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	32,0	m
1.2 Zahl der Felder:	1	
1.3 Brückenfläche:	1516	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	Wildbrücke p=0,5 kN/m ² + SLW30 in Alleinüberfahrt	
1.6 Baujahr:	2019	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Holz	
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Einfeldrig, Bogen	
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Balkenartige und plattenartige Tragwerke	
2.4 System der Lagerung:	Bolzgelenke (Zylinder-Zapfenlager)	
2.5 Pfeiler / Stützen:	-	
2.6 Widerlager:	Kämpfer, Massivwand	
2.7 Gründung:	Flachgründung mit Bodenaustausch	
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Feuerverzinke Oberfläche (Stahl) insektenvorbeugendes, pilzwidriges, witterungsbeständiges Holzschutzmittel	

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Lärchen-Brettschichtholz: GL 28h
3.2 Pfeiler/ Stützen:	-
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: C30/37

4. Baugrund

Geschiebemergeweich-steif/ halbfest,
3,5 m Bodenaustausch mit Kies-Sand-Gemisch als
Bettungspolster

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Wildbrücken in Holzbauweise

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Holzfeuchteelektroden
 - Messbereich Sensortechnik: 6 bis 90 M.-%
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,1 (Messauflösung) M.-%
 - Temperaturkompensation: Bauteil- und Außenlufttemperaturmessung
 - Gesamttechnischer Umfang: 3 Messverstärker, 4 Datenlogger, Sensoren
2. **Grund des Monitorings:** Bestimmung der Holzfeuchte in Abhängigkeit vom Umgebungsklima
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 27 Elektrodenpaare
3 Temperatursensoren (Bauteiltemperatur)
1 Klimasensor
4. **Messort am Bauwerk:** Kämpfer, Halbbogen und First in 3 Achsen (Einfahrt, Brückenmitte, Ausfahrt)
5. **Installationsbereich:** Seitenfläche Binder
6. **Installationsart:** Verlegung der Kabel im Schutzrohr, Verschraubung der Elektroden im Holz
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 55.350,00 €
 - Planungskosten: 1.370,00 €
 - Installationskosten: 26.260,00 €
 - Betriebskosten: 5.490,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *in Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 5 Werktage, 2018
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, 2018 bis 2023
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Wissenschaftliche Einrichtung für Baustoff- und Bauteiluntersuchungen *)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | |
|---------------------------------------|---|-----------|
| 1. Ziel der Messung: | Überwachung der Holzfeuchten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen | |
| 2. Messgrößen: | | |
| - Bauteilfeuchtemessung: | 7 bis 30 | M.-% |
| - Bauteiltemperaturmessung: | -30 bis +120 | °C |
| - Klimamessung: | 0 bis 100
-20 bis +70 | %rF
°C |
| 3. Abtastrate: | | |
| - Bauteilfeuchtemessung: | 6 | h |
| - Bauteiltemperaturmessung: | 6 | h |
| - Klimamessung: | 1 | h |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | | |
| - Bauteilfeuchtemessung: | 6 | h |
| - Bauteiltemperaturmessung: | 6 | h |
| - Klimamessung: | 1 | h |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | jährlich | |
| 6. Daten: | | |
| - Bauteilfeuchtemessung: | Momentanwert | |
| - Bauteiltemperaturmessung: | Momentanwert | |
| - Klimamessung: | Momentanwert | |
| 7. Datenformat: | *.tf2 (Scantronik), *.xls | |
| 8. Datenerfassung: | Scantronik Datenlogger | |
| 9. Datenübertragung: | Auslesen der Daten vor Ort | |
| 10. Datenmanagementsystem: | Dateiablage | |
| 11. Datenauswertung: | | |
| - Prozess: | Softfox (Scantronik) | |
| - Ausgabe: | Berichtanfertiung mit grafischen Darstellungen, Jahresmessprotokolle | |
| 12. Datenverwendung: | Registrierung und Auswertung der Holzfeuchte- und Klimamesswerte in Jahresmessprotokollen | |
| 13. Alarmierungsplan: | Nicht erforderlich | |
| - Grenzwert: | > 20 M.-% | |
| - Alarmierungskette: | - | |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Sachverständiger für Holz | |

Monitoringmaßnahme:	3. Feuchtigkeitsmessung	Lfd. Nr.:	3.2	Blatt:	4
---------------------	-------------------------	-----------	-----	--------	---

Beschreibung des Monitorings

Bei der Holzbrücke handelt es sich um eine Wildbrücke mit Erdüberschüttung. Das Haupttragwerk besteht aus parallel gestellten Bogenbindern mit einer Stützweite von 32,0 m, die über Gelenke auf den Widerlagerwänden aufgelagert und im Scheitel gelenkig zu Dreigelenkbögen verbunden sind (Bild 1). Die Aussteifung erfolgt durch einen als Scheibe ausgebildeten Holzbelag. Als Material für die Binder wurde Brettschichtholz (Gl28h, Nadelholz, 90%iges Kernholz) verwendet. Die gesamte Tragkonstruktion ist Witterung und Kondensation ohne Erdkontakt ausgesetzt und wurde in die Gefährdungsklasse 3 eingestuft. Das Holz ist mit einem insektenvorbeugenden, pilzwidrigen und witterungsbeständigen Holzschutzmittel behandelt. Die Abdichtung der Überbauoberseite erfolgt über einen Haftanstrich, mehrlagige Bitumenschweißbahnen mit Trennflies, Wurzelschutzfolie, Drainage und Nagerschutz. (Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen 2019, BMVI)

Zur Kontrolle der Holzfeuchte in der Konstruktion und zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Abdichtungslagen an der Überbauoberseite wurde während der Errichtung des Bauwerks ein kontinuierliches Feuchtemonitoring zur Langzeitüberwachung möglicher Schadensfälle durch Undichtigkeiten und erhöhte Holzfeuchte (Gefahr des Schädlingsbefalls) installiert. Das Monitoringsystem besteht aus Elektrodenpaaren zur kontinuierlichen Messung und Aufzeichnung der Holzfeuchte und Bauteiltemperatur im Holz alle 6 Stunden. Die Elektroden wurden im Bereich der Kämpfer im Auflagerpunkt, an den oberen Seitenflächen der Binder und im First am Holzbelag im Bereich der Ein-

fahrt, Brückenmitte und Ausfahrt installiert (Bilder 2 bis 4). Die Temperatursensoren für die Holzinnen-temperatur (Messungenauigkeit: $\pm 1^\circ\text{C}$) wurden in den BSH-Bindern an drei Stellen in den Halbbögen durch Einbringen von NTC-Sensor-Elementen in vorgebohrte Löcher installiert. Zur Verifizierung der Holzfeuchte und Bauteiltemperatur in Abhängigkeit der Umgebungsbedingung wurde zudem ein Klimasektor zur Erfassung der relativen Luftfeuchte und der Außenlufttemperatur am Halbbogen des Binders in Brückenmitte installiert. Die Klimadaten (Messungenauigkeit: $<0,4^\circ\text{C}$ (bei 20°C), $<3\%rF$ (zwischen $20\%rF$ und $80\%rF$)) werden stündlich aufgezeichnet. Die gesamten Kabel der Messanlage wurden in Schutzrohren verlegt und die Datenlogger in Verteilerschränken verbaut (Bilder 5 und 6).

Die Messstellen und Anzahl der Sensoren wurden nach Vorgabe des Bauherrn in Abstimmung mit dem Planungsbüro festgelegt. Die Anordnung der Messstellen am Bauwerk erfolgte derart, dass eine breite messtechnische Abdeckung in einem vorgegebenen Raster und Kostenrahmen erreicht wurde. Des Weiteren wurden durch die Anordnung der Messstellen im Drempebereich auch potentielle Schwachstellen erfasst.

Das Auslesen der Messdaten erfolgte in regelmäßigen Abständen vor Ort. Die Messergebnisse der Holzfeuchte- und Klimamesswerte werden dem Auftraggeber in Jahresberichten mit graphischer Darstellung der Messungen aufgearbeitet. Die Nutzungsdauer des Monitoringsystems ist für 5 Jahre vorgesehen.

Folgerung

Es wurden keine Defizite in Form einer zu hohen Baufeuchte ($>20\%$, kritische Grenze der Holzfeuchte für Schädlingsbefall) festgestellt. Seit Beginn des Monitorings wurden über einen Nutzungszeitraum von ca. 50 Monaten (seit Januar 2018) die sich bei diesem Außenklima einstellenden

Holzausgleichsfeuchten von $<20\%$ gemessen (Bild 7).

Durch ein aktives Monitoring mit einem positiven Befund besteht die Möglichkeit, die Restnutzungsdauer auch über den veranschlagten Zeitraum hinaus zu verlängern.

Monitoringmaßnahme:	3. Feuchtigkeitsmessung	Lfd. Nr.:	3.2	Blatt:	5
<p>Durch die Überwachung der Holzfeuchte liefert das Monitoringsystem einen ergänzenden Beitrag zur Bauwerksprüfung. Überschreiten die Messwerte die zulässige Holzfeuchte (z. B. über einen sehr langen Zeitraum) und die Überschreitungen sind nicht auf Fehlermeldungen der Messtechnik zurückzuführen, ist eine objektbezogene Bauwerksprüfung durch Sachverständige für Holz durchzuführen.</p>					
Brücken- und Ingenieurbau			Erfahrungssammlung „Monitoring für Brückenbauwerke“		41

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Ansicht der Brücke, Quelle: KBauMV FH Wismar

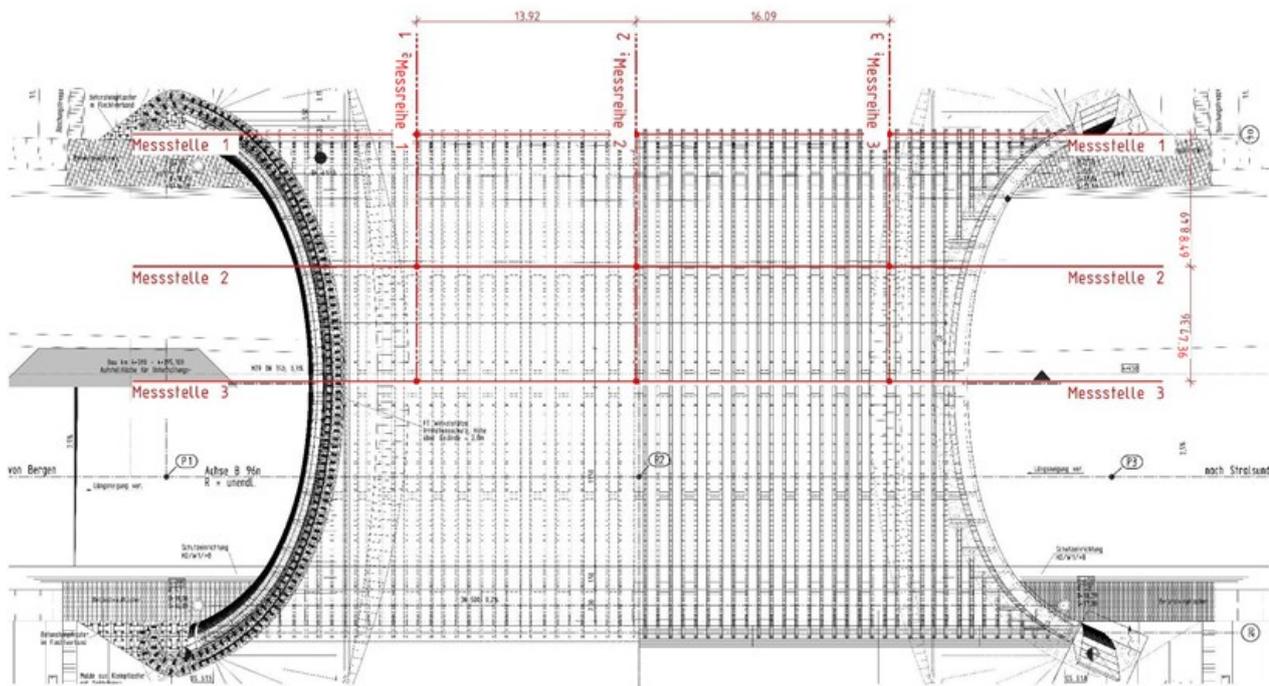


Bild 2: Lage der Messstellen in der Draufsicht, Quelle: KBauMV FH Wismar

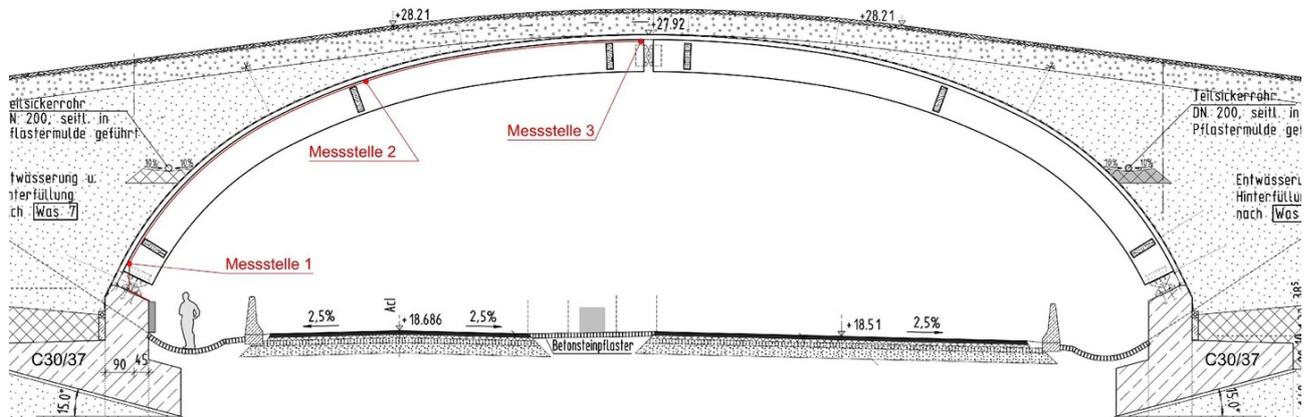


Bild 3: Lage der Messstellen in der Ansicht, Quelle: KBauMV FH Wismar

Prinzipdetail Messpunkte

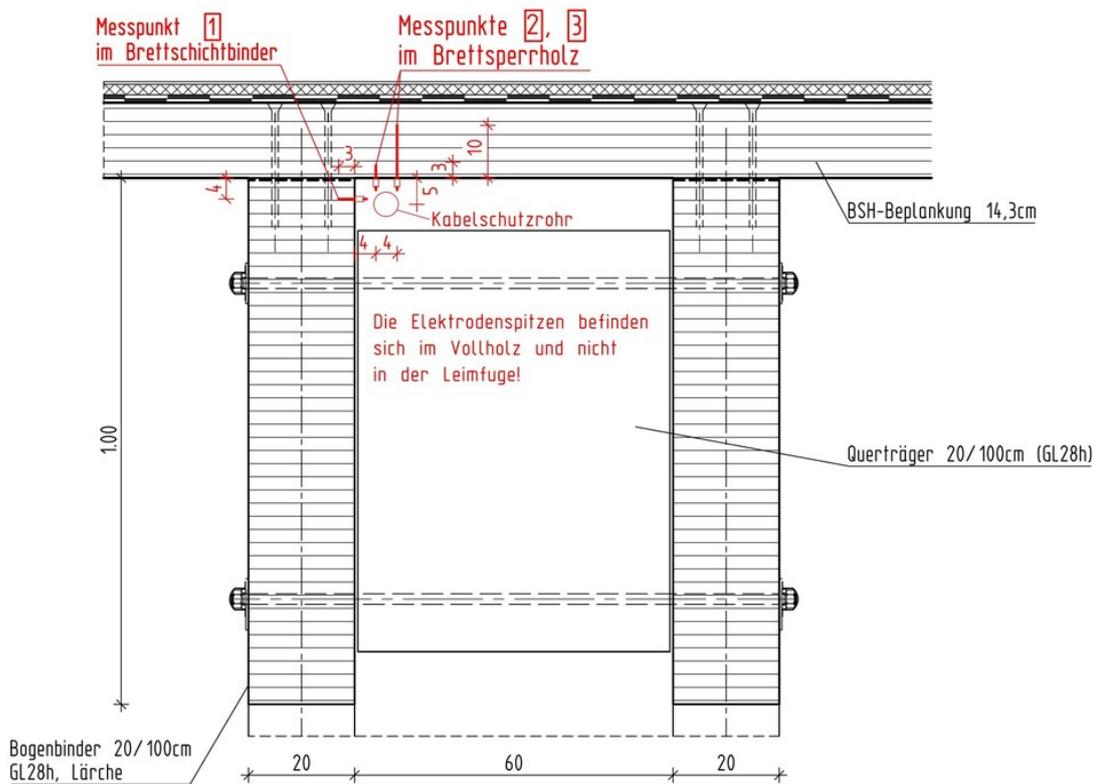


Bild 4: Anordnung der Elektroden im Querschnitt, Quelle: KBauMV FH Wismar

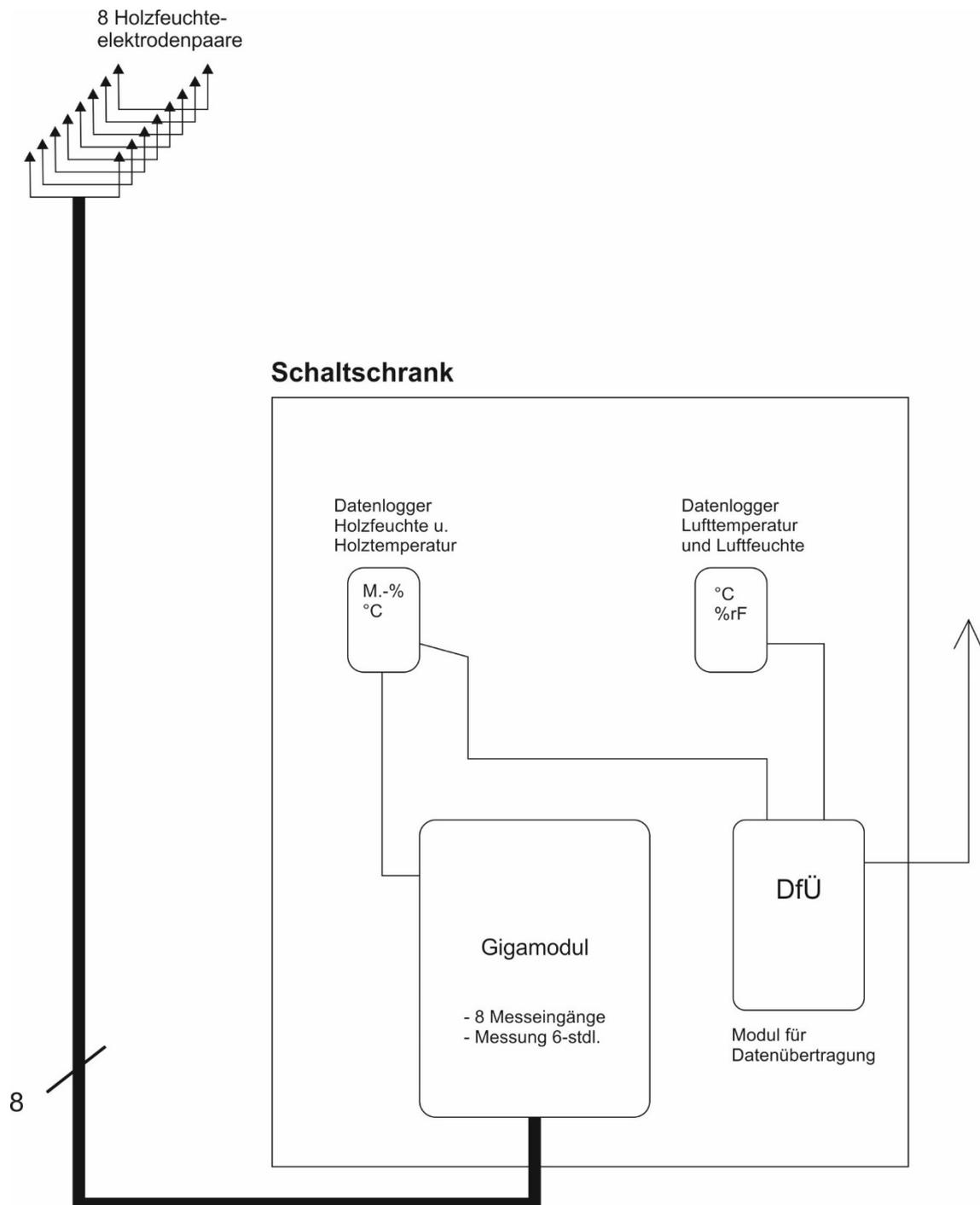


Bild 5: Übersicht Messsystem, Quelle: KBauMV FH Wismar



Bild 6: Messkasten mit Datenlogger und Widerstandsmessmodul, Quelle: KBauMV FH Wismar

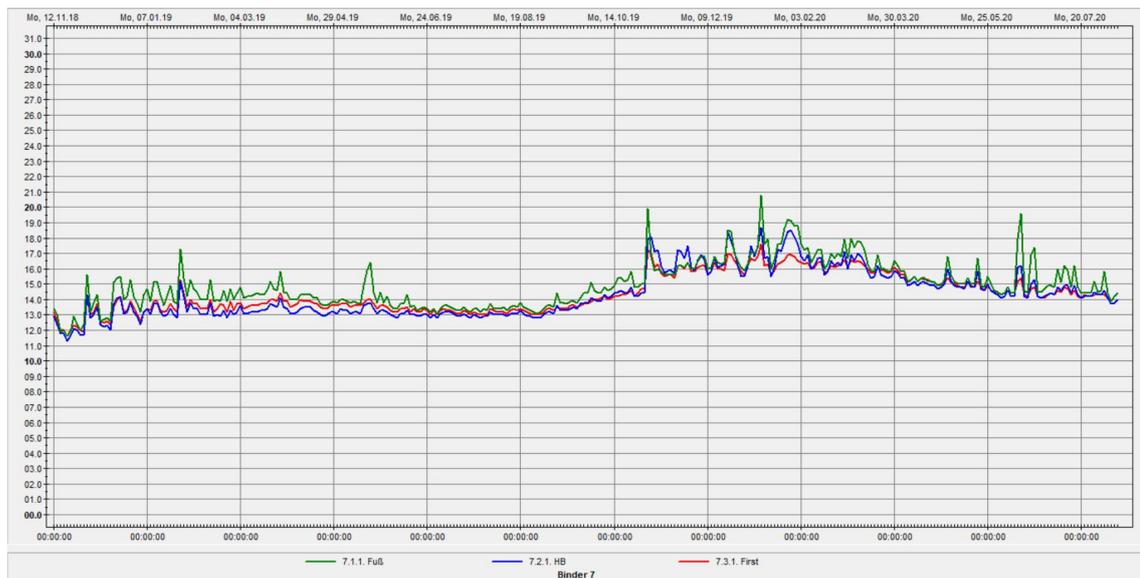


Bild 7: Messdiagramm der Holzfeuchte in SoftFOX, Quelle: KBauMV FH Wismar

Monitoringmaßnahme:	4. Korrosionsmessung	Lfd. Nr.:	4.1	Blatt:	1
---------------------	----------------------	-----------	-----	--------	---

4. Korrosionsmessung

Monitoring 4.1 **Korrosionsmonitoring eines Pilotbauwerks in Segmentbauweise mittels Anodenleiter**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	33,5	m
1.2 Zahl der Felder:	1	
1.3 Brückenfläche:	521	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	87.4	gon
1.5 Brückenklasse:	Lastmodell LM1 nach DIN EN 1991-2	
1.6 Baujahr:	2014	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Stahlverbundbauweise	
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Rahmenbauwerk, Segmentbauweise, Verbundfertigteilträger (VFT-Träger)	
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	2 Längsträger geschweißt als Hohlkästen, Betonflansch	
2.4 System der Lagerung:	Elastomerlager	
2.5 Pfeiler / Stützen:	-	
2.6 Widerlager:	Widerlagerwand und -flügel	
2.7 Gründung:	Flachgründung mit vorh. Bodenaustausch	
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Feuerverzinkte Oberfläche	

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Fahrbahnplatte: Spannbeton C60/75, Litzen St1660/1860; Längsträger: Stahl S 235	
3.2 Pfeiler/ Stützen:	-	
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: C35/45, BSt 500 S (IV S) nach DIN 488	
4. Baugrund	Bodenaustauschmaßnahmen erforderlich	

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Pilotbauwerk in Segmentbauweise

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Anodenleiter
 - Messbereich Sensortechnik: -2000 bis +2000 mV
-2000 bis +2000 μ A
0 bis 2 M Ω
 - Erwartete Messunsicherheit: 1 (Messauflösung) mV
 - Temperaturkompensation: PT 1000 Bauteiltemperatursensor (in Anodenleiter integriert)
 - Gesamttechnischer Umfang: Anodenleiter, Titanmischoxid-Gegenelektrode, Mangandioxid-Bezugselektrode, Terminal Box
- 2. Messort am Bauwerk:** Überwachung der Dauerhaftigkeit eines Pilotbauwerks, Überprüfung der Bauart
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 7 Anodenleitern
- 4. Messbereich:** Fahrbahnplatte
- 5. Installationsbereich:** Bewehrung, 5 mm Betondeckung der obersten Anode
- 6. Installationsart:** Befestigung an Bewehrung mit Kabelbindern, einbetoniert im Fertigteilwerk
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:** *Die Monitoringkosten sind in den Kosten des Überbaus des Pilotbauwerkes enthalten und nicht einzeln ausgewiesen.*
 - Gesamtkosten: -
 - Planungskosten: -
 - Installationskosten: -
 - Betriebskosten: -
 - Kosten Datenmanagement: -
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** -
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, seit 2014 laufend
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro mit Tätigkeitsfeldern ZfP, Instandsetzung, Bauwerksmonitoring*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Bauunternehmen
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

1. **Ziel der Messung:** Überprüfung einer möglichen Depassivierung
2. **Messgrößen:**
 - Potentialmessung: -2000 bis +2000 mV
 - Elementstrommessung: -2000 bis +2000 μ A
 - Wechselstromwiderstandsmessung: 0 bis 2 M Ω
3. **Abtastrate:**
 - Potential, Elementstrom, Wechselstromwiderstand: Im Zuge der Zustandsprüfung vor Ort
4. **Frequenz Datenaufzeichnung:**
 - Potential, Elementstrom, Wechselstromwiderstand: Im Zuge der Zustandsprüfung vor Ort
5. **Frequenz Datenauswertung:** Im Zuge der Zustandsprüfung vor Ort
6. **Daten:**
 - Potential, Elementstrom, Wechselstromwiderstand: Momentanwert
7. **Datenformat:** *.csv
8. **Datenerfassung:** Handmessgerät CANIN-LTM
9. **Datenübertragung:** Auslesen der Daten vor Ort, Serielle Schnittstelle zum Handmessgerät
10. **Datenmanagementsystem:** Dateiablage
11. **Datenauswertung:**
 - Prozess: Canin+-Korrosionsanalysesystem
 - Ausgabe: Graphisch, Gutachterliche Stellungnahmen zur Bewertung des IST-Zustands
12. **Datenverwendung:** Überprüfung der Dauerhaftigkeit und des IST-Zustands des Pilotbauwerks
13. **Alarmierungsplan:** Nicht erforderlich
 - Grenzwert: Dynamische Bewertung, zeitabhängige Veränderung der Messwerte gegenüber der vorherigen Messung (Potentialabfall, Anstieg des Korrosionsstroms)
 - Alarmierungskette: -
 - Zuständigkeit im Alarmfall: -

Beschreibung des Monitorings

Bei dem Bauwerk handelt es sich um ein Pilotprojekt in Segmentbauweise (Bild 1). Die Hauptmerkmale der Bauweise sind die Trennung der Tragstruktur in ein Längs- und ein Quertragsystem und die trocken gestoßenen, vorgespannten Fertigteil-Segmente ohne Abdichtung und Asphalt. Durch diese Bauweise können kurze Bauzeiten realisiert werden. Zur Überprüfung der Dauerhaftigkeit und Sammlung von Erfahrungswerten in Hinblick auf eine mögliche Überführung in eine Regelbauweise wurde ein Korrosionsmonitoring-System mit Anodenleitern installiert.

Zur Überwachung des Chlorideintrags wurden im Fertigteilwerk sieben Korrosionssensoren (Anodenleiter) in den Fertigteilen eingebaut (Bild 4). Die Anodenleitern bestehen aus sechs Einzelanoden, die tiefgestaffelt zwischen der äußeren Bewehrung und der Bauteiloberfläche angeordnet werden (Bilder 2 und 3). Ergänzend wurden je Anodenleiter eine Titanmischoxid-Elektrode und ein Tempera-

tursensor installiert. Die Anodenleitern wurden im Fertigteilwerk an der oberen Bewehrungslage fixiert und mit einer Betondeckung (der obersten Anode) von 5 mm einbetoniert.

Das Auslesen der Sensordaten erfolgt vor Ort mit einem Handmessgerät. Die Überprüfung des IST-Zustands des Brückenbaus erfolgte erstmals nach einer Nutzung von 3 Jahren. Ein plötzlicher Abfall des Ruhepotentials in Verbindung mit einem deutlichen Anstieg des Korrosionsstroms wird als Hinweis auf eine aktive Bewehrungskorrosion gewertet. Üblicherweise wird hier ein Korrosionsstrom $< -15 \mu\text{A}$ rund 5 Sekunden nach dem Kurzschluss mit dem Kathodenstab angesetzt. Durch die Bestimmung der Temperatur an der Anode durch einen integrierten PT 1000 Temperatursensor können temperaturbedingte Einflüsse auf Ströme und Spannungen kompensiert werden.

Folgerung

Die Sensordaten zeigen keine bedenklichen Anzeichen für eine Depassivierung. Die Korrosionsströme und Widerstände sind unauffällig, so dass bei allen Sensoren von Passivität ausgegangen werden kann. Ergänzend zu den Messdaten wurden im Bereich der Anodenleitern im Zuge der ersten Prüfung Bohrmehlproben an den Segmentplatten zur Bestimmung der Chloridbelastung entnommen. Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse der ergänzenden Bohrproben ist gegenwärtig von keiner Depassivierung der Bewehrung oder oberen Sprosse der Anodenleiter auszugehen. In

der Gutachterlichen Stellungnahme wird eine erneute Untersuchung nach drei weiteren Nutzungsjahren empfohlen. Da es sich bei der Bestimmung der Tiefe der Depassivierungsfront um Langzeitmessungen mit untergeordneter Bedeutung von kurzzeitigen Schwankungen handelt, ist eine jährliche bzw. dreijährige Messung ausreichend zur Bestimmung des IST-Zustands der Dauerhaftigkeit des Bauwerks.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Ansicht der Brücke, Quelle: Bayerische Straßenbauverwaltung StBA Regensburg

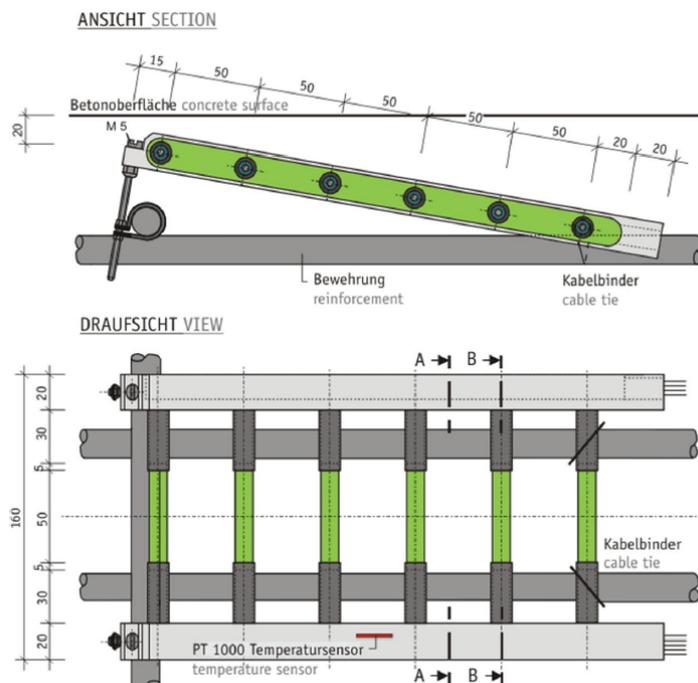


Bild 2: Schematische Darstellung der Anodenleiter, Quelle: Sensortec GmbH

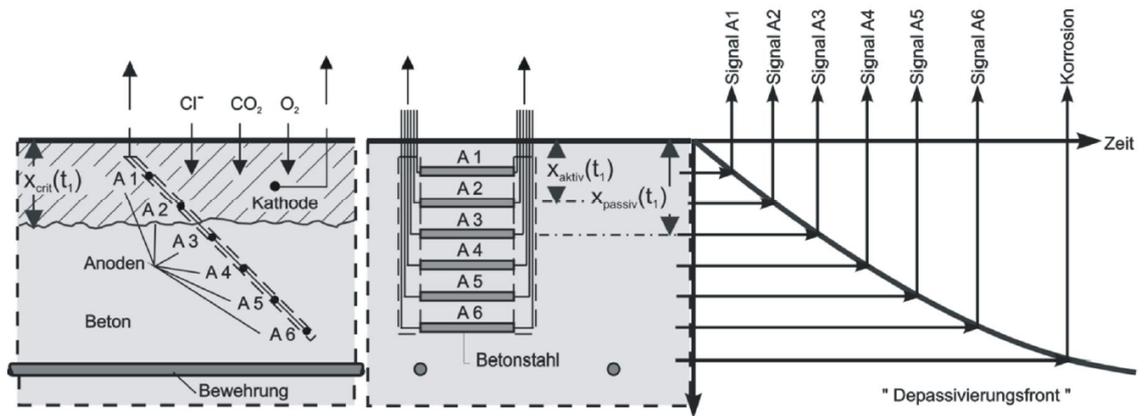


Bild 3: Funktionsprinzip des Korrosionssensors, Quelle: Sensortec GmbH

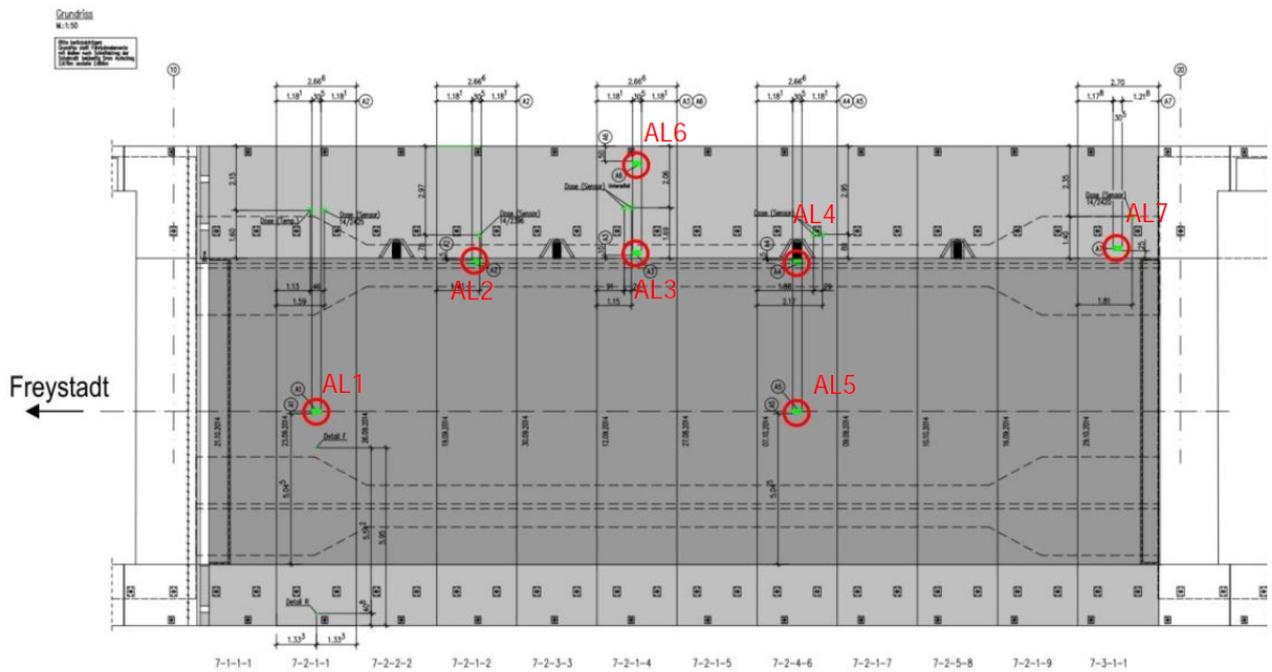


Bild 4: Grundriss mit Kennzeichnung der Sensorpositionen, Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

Monitoringmaßnahme:	4. Korrosionsmessung	Lfd. Nr.:	4.2	Blatt:	1
---------------------	----------------------	-----------	-----	--------	---

**Monitoring 4.2 Korrosionsmonitoring eines Pilotbauwerks für die
Anwendungsprüfung von korrosionsarmem Betonstahl**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	20,85 – 25,15 – 25,15 – 20,85	m
1.2 Zahl der Felder:	4	
1.3 Brückenfläche:	5944	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	85,50	gon
1.5 Brückenklasse:	Lastmodell LMM nach DIN EN 1991-2	
1.6 Baujahr:	2017 bis 2019	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton	
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Vierfeldriger Durchlaufträger	
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken (zweistegig äußere Teilbauwerke, dreistegig innere Teilbauwerke) / Trägerrost (mit Querverteilung)	
2.4 System der Lagerung:	Elastomere Verformungslager (Längsfeste Lagerung in Bauwerksmitte)	
2.5 Pfeiler / Stützen:	Einzelpfeiler unter jedem Überbausteg	
2.6 Widerlager:	Konventionelle Kastenwiderlager	
2.7 Gründung:	Flachgründung (Streifenfundamente)	
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Einlagige Bitumenschweißbahn auf Epoxidharzversiegelung, Gussasphaltschutzschicht, Gussasphaltdeckschicht	

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: C40/50, Betonstahl B500B, Spannstahl St 1660/1860	
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: C35/45, Betonstahl B500B-NR mit erhöhtem Korrosionswiderstand (Werkstoff-Nr. 1.4003)	
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: C30/37, Betonstahl B500B	

4. Baugrund

Bodenaustauschmaßnahmen mit Kiesaufschüttung, Kiesaufschüttung von Dämmen

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Pilotprojekt zum Einsatz von Bewehrungsstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Anodenleiter
 - Messbereich Sensortechnik: -2000 bis +2000 mV
-2000 bis +2000 μ A
0 bis 2 M Ω
 - Erwartete Messunsicherheit: 1 (Messauflösung) mV
 - Temperaturkompensation: PT 1000 Bauteiltemperatursensor (in Anodenleiter integriert)
 - Gesamttechnischer Umfang: Anodenleiter, Titanmischoxid-Gegenelektrode, Mangandioxid-Bezugselektrode, Terminal Box
- 2. Grund des Monitorings:** Überwachung der Dauerhaftigkeit eines Pilotbauwerk, Überprüfung der Bauart
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 10 Anodenleitern aus gewöhnlichem Baustahl
10 Anodenleitern aus korrosionsarmem Baustahl
- 4. Messort am Bauwerk:** 4 Messstellen an Pfeilern unterhalb der Lager,
1 Messstelle am Widerlager
- 5. Installationsbereich:** Bewehrung der Pfeiler,
13 mm Betondeckung der obersten Anode
- 6. Installationsart:** Befestigung an Bewehrung mit Kabelbindern,
Einbetoniert (Ortbeton)
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: -
 - Planungskosten: -
 - Installationskosten: -
 - Betriebskosten: -
 - Kosten Datenmanagement: -
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** Mai bis Juli 2017
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, seit 2018 für voraussichtlich
10 Jahre
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro mit Tätigkeitsfeldern ZfP, Instandsetzung, Bauwerksmonitoring*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*), Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen (Hersteller von Mess-, Schutz- und Steuerungselektronik)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

1. **Ziel der Messung:** Erfassung einer möglichen Korrosionsinitiation
2. **Messgrößen:**
 - Potentialmessung: -2000 bis +2000 mV
 - Elementstrommessung: -2000 bis +2000 μ A
 - Wechselstromwiderstandsmessung: 0 bis 2 M Ω
3. **Abtaste:**
 - Potential, Elementstrom, Wechselstromwiderstand: Alle 3 Tage, flexibel anpassbar
4. **Frequenz Datenaufzeichnung:**
 - Potential, Elementstrom, Wechselstromwiderstand: Alle 3 Tage, flexibel anpassbar
5. **Frequenz Datenauswertung:** Alle 3 Tage, flexibel anpassbar
6. **Daten:**
 - Potential, Elementstrom, Wechselstromwiderstand: Momentanwert
7. **Datenformat:** *.csv
8. **Datenerfassung:** CAMUR II System, Fa. Protector KKS
9. **Datenübertragung:** Fernablesung per Funkübertragung
10. **Datenmanagementsystem:** Dateiablage
11. **Datenauswertung:**
 - Prozess: CAMUR II System, Fa. Protector KKS
 - Ausgabe: Graphisch, Ergebnisbericht zur Bewertung des Korrosionsfortschritts
12. **Datenverwendung:** Bewertung der Auswirkung unterschiedlicher Bewehrungsmaterialien auf die Dauerhaftigkeit
13. **Alarmierungsplan:**
 - Grenzwert: Nicht erforderlich
 - Alarmierungskette: Dynamische Bewertung, zeitabhängige Veränderung der Messwerte gegenüber der vorherigen Messung (Potentialabfall, Anstieg des Korrosionsstroms)
 - Zuständigkeit im Alarmfall: -

Beschreibung des Monitorings

Am Ursprungsbauwerk der Autobahnbrücke wurden wesentliche Mängel der Bausubstanz hinsichtlich einer fortschreitenden Bewehrungskorrosion infolge Chlorideinwirkungen festgestellt. In einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurde ein Ersatzneubau als Vorzugsvariante ermittelt. Im Rahmen eines Pilotprojekts wurde in verschiedenen Bereichen des Ersatzneubaus Bewehrungsstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand verbaut. Zur Überprüfung einer möglichen Verlängerung der Lebensdauer bestimmter Bauteile durch Verwendung eines Betonstahls mit erhöhtem Korrosionswiderstand wurde ein Korrosionsmonitoring mit Anodenleitern während der Bauphase der Pfeiler installiert.

Das Monitoringsystem besteht aus fünf Messstellen an den Pfeilern im Bereich der Auflager (Bild 1). Je Messstelle wurden zwei Anodenleitern installiert, deren Anoden aus korrosionsarmem Stahl hergestellt wurden. Als Vergleichssensoren wurden zusätzlich jeweils zwei Anodenleitern mit herkömmlichem Bewehrungsstahl in kurzen Abständen eingebaut und neben jeder Anodenleiter eine Mangandioxid-Referenzelektrode installiert (Bilder 2 und 3). Es wird davon ausgegangen, dass die Anodenleitern bei einem kurzen Einbauabstand zur benachbarten Anodenleiter einer gleichen Tausalz- und Feuchtigkeitsbeaufschla-

gung ausgesetzt sind. Hierdurch wird ein Vergleich der Korrosionsbeständigkeit des gewöhnlichen Betonstahls mit dem Betonstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand möglich.

Insgesamt wurden 20 Anodenleitern eingebaut: (i) zehn Anodenleitern mit Anoden bzw. Sprossen aus herkömmlichem Betonstahl und (ii) zehn Anodenleitern aus korrosionsarmem Stahl. Die Korrosionssensoren wurden in verschiedenen Bereichen der erfahrungsgemäß am stärksten mit Chlorid beanspruchten Bauteile eingebaut. Durch die Verteilung der fünf Messstellen können außerdem die unterschiedlichen Einflüsse an verschiedenen Bauwerksbereichen beurteilt werden.

Zur Überprüfung des korrosionsauslösenden Chloridgehalts wird im Fall einer Korrosionsinitiierung eine Bohrmehlprobe an den entsprechenden Bauteilen entnommen. Von der Straßenbauverwaltung wurde eine Messdatenauslesung zweimal jährlich in den ersten drei Jahren und jährlich in den folgenden sieben Jahren beauftragt. Bei dem verbauten Monitoringsystem erfolgt eine automatische Sensorauslesung in einem Zeitintervall von vier Tagen. Die Ergebnisse können per Fernablese von dem beauftragten Fachplaner des Monitorings abgerufen werden.

Folgerung

An der Messstelle auf der Westseite des Pfeilers wurde an einer Anodenleiter mit herkömmlichem Bewehrungsstahl im November 2019 an der oberflächennächsten Sprosse A1 eine sprungartige Verschiebung des Potentials in Verbindung mit einem Anstieg des Elementstroms aufgezeichnet (Bild 4), welche auf eine erste Korrosionsinitiierung der oberflächennächsten Sprosse hindeuten. Im folgenden Sommer 2020 verschiebt sich das Potential wieder in Richtung edlerer Potentiale, was auf eine Austrocknung des Betons und einen damit einhergehenden Rücktransport von Chloriden zurückzuführen ist. Der Elementstrom geht in dieser Zeit bis auf vernachlässigbare Werte zurück. Im

folgenden Winter verschieben sich die Potentiale und Ströme infolge eines erneuten Feuchte- und Chlorideintrags wieder und zeigen seitdem aktive Korrosion der oberflächennächsten Sprosse A1 an. An den beiden Anodenleitern aus korrosionsarmem Stahl wurden trotz gleicher Expositionsbedingungen über den gesamten Zeitraum noch keine Anzeichen von Korrosion festgestellt.

An der Stelle mit messtechnisch festgestellter Korrosionsinitiierung wurden zur Überprüfung des Chloridgehalts im Beton Bohrmehlproben entnommen.

Dabei wurden oberflächennah erhöhte Werte festgestellt, die sich im Bereich üblicher korrosionsauslösender Chloridgehalte für Betonstahl befinden. Daneben wurde bei drei weiteren Sensoren aus herkömmlichen Betonstahl Korrosionsanzeigen festgestellt. Bei allen übrigen Sensoren aus herkömmlichem Betonstahl sowie allen Sensoren aus korrosionsarmem Betonstahl kann aufgrund der Messergebnisse derzeit davon ausgegangen werden, dass über die gesamte Sensorhöhe Passivität vorliegt.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

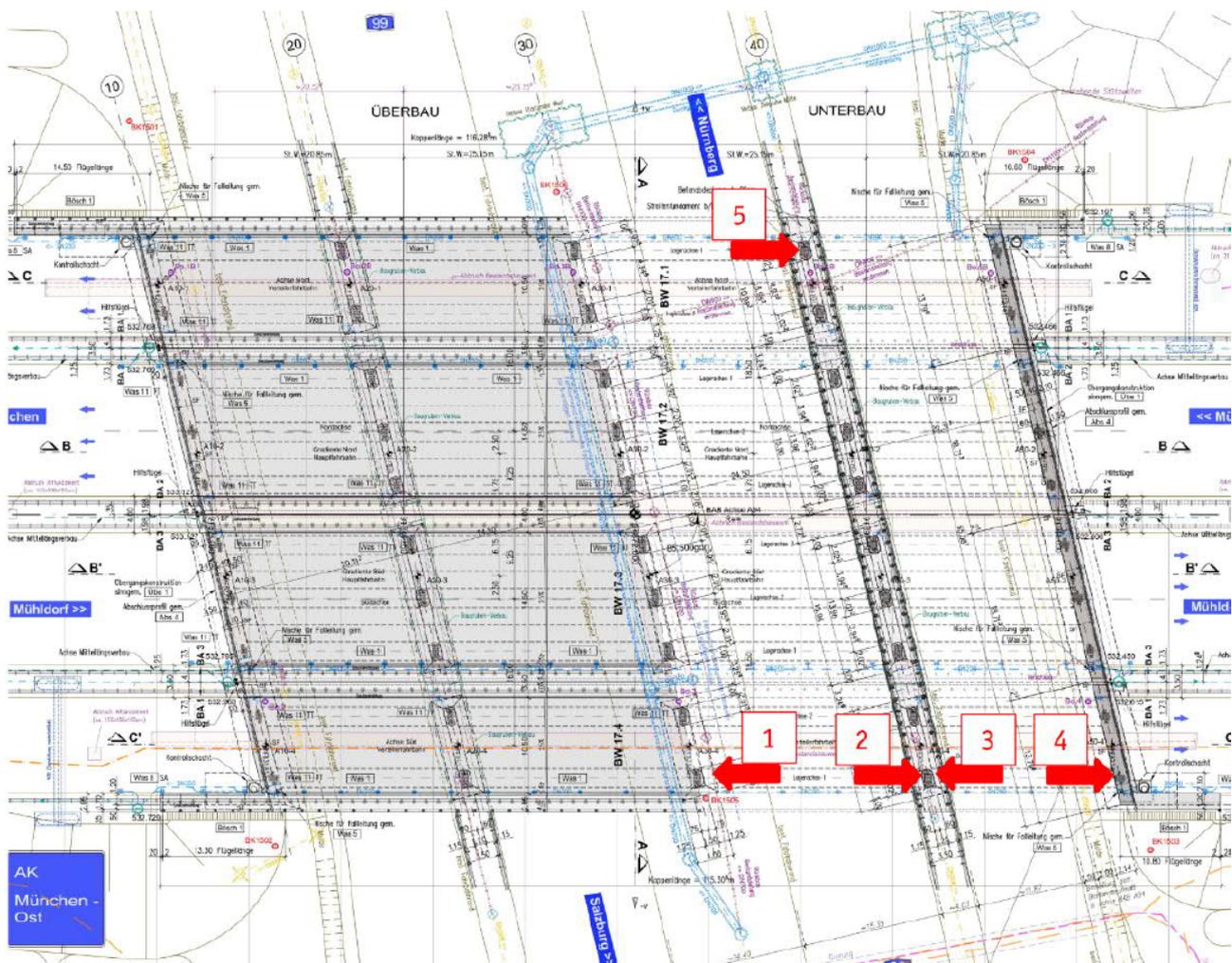


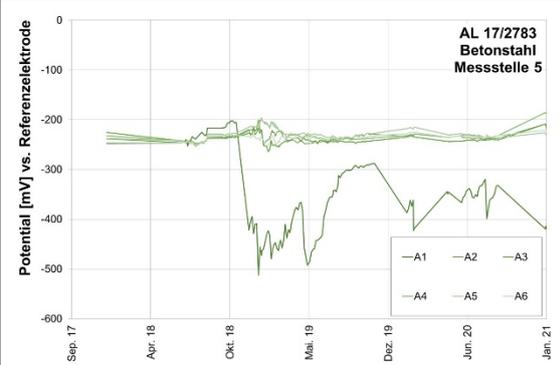
Bild 1: Ansicht der Brücke, Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

Messstelle 5 (rd. 0,40 m ü. GOK)

Top12-Stahl

Betonstahl

Ruhepotential



Elementstrom

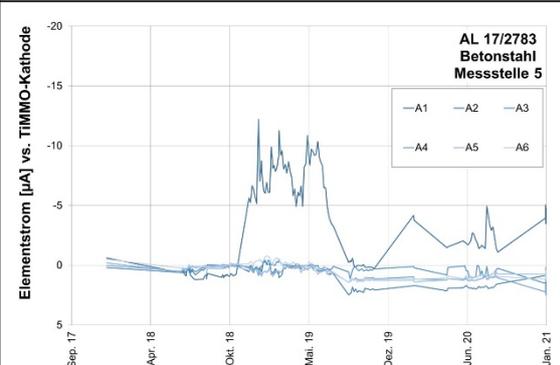
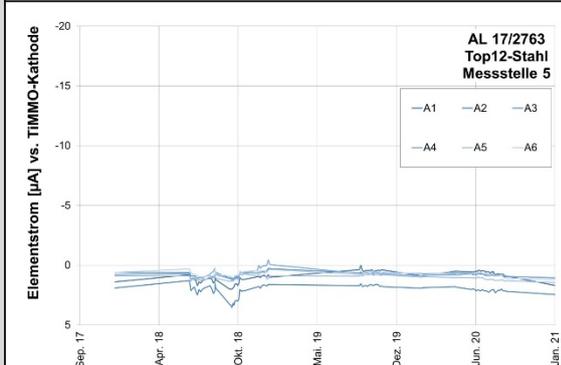


Bild 4: Exemplarischer Messwertgraph des Ruhepotentials und Elementstroms,
Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

5. Überwachung der Tragwerksverformungen

Monitoring 5.1 Überwachung von Verformungen der Hauptträger infolge Steifigkeitsänderungen mittels digitaler Schlauchwaage

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	52,00 – 52,00	m
1.2 Zahl der Felder:	2	
1.3 Brückenfläche:	1563	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1974	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Stahl (Stahlverbund)
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken / Trägerrost (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Rollenlager/Punktkipplager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Massivpfeiler
2.6 Widerlager:	Massivwand
2.7 Gründung:	Tiefgründung (Rammpfähle)
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Gussasphalt, Bleimennige und Eisenglimmer

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Stahlverbund: S 235 (früher St 37), geschweißt
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton
3.3 Widerlager:	Stahlbeton

4. Baugrund

Gründung im Flussbett und Uferbereich

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Rechnerische Tragfähigkeitsdefizite im Zuge der Nachrechnung
- Gefahr von Materialversprödung (Terrassenbruch)

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Digitale Schlauchwaagenmesssysteme
 - Messbereich Sensortechnik: 0 bis 50 cm
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,2 mm
 - Temperaturkompensation: Messung der Oberflächen- und Außenlufttemperatur
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Wetterstation, Auswerterechner, Serverschrank
- 2. Grund des Monitorings:** Überwachungsmaßnahme als Kompensation bei bekannten Defiziten, Überwachung eines möglichen Verformungszuwachses
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 15 Verformungssensoren
4 Temperatursensoren
1 Wetterstation
- 4. Messort am Bauwerk:** Überbau, Feldmitte
- 5. Installationsbereich:** Unterseite des Längsträgers in Feldmitte
- 6. Installationsart:** Befestigung durch Schrauben
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 327.000,00 €
 - Planungskosten: *In Installationskosten enthalten* €
 - Installationskosten: 20.000,00 €
 - Betriebskosten: 120.000,00 €
 - Kosten Datenmanagement: 20.000,00 €
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** Ca. 3 Wochen, Oktober bis November 2021
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, seit 2021 voraussichtlich 48 Monate + 72 Monate (optional)
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Straßenbauverwaltung
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister Monitoring (Ingenieurbüro für Vermessung und Überwachungsmessung*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Spezialdienstleister Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Tragwerksplaner, Straßenbauverwaltung
 - Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1. Ziel der Messung: | Erfassung abrupter und schleichender Steifigkeits- und Verformungsänderungen an den Hauptträgern |
| 2. Messgrößen: | |
| - Verformungsmessung: | 0 bis 50 cm |
| - Temperaturmessung: | - 35 bis 85 °C |
| 3. Abtastrate: | |
| - Verformungsmessung: | 2 Hz |
| - Temperaturmessung: | 10 min |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Verformungsmessung: | 2 Hz |
| - Temperaturmessung: | 10 min |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Laufend, wöchentlich |
| 6. Daten: | |
| - Verformungsmessung: | Mittelwert |
| - Temperaturmessung: | Momentanwert |
| 7. Datenformat: | *.csv, *.pdf |
| 8. Datenerfassung: | Elektronische Speicherung der Messdaten vor Ort |
| 9. Datenübertragung: | Mobilfunk |
| 10. Datenmanagementsystem: | Firmenspezifisch |
| 11. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Firmenspezifisch, MS Excel |
| - Ausgabe: | Graphisch, Vorlage von Berichten beim Auftraggeber, Warnmeldungen |
| 12. Datenverwendung: | Frühzeitige Detektion von Schadensfällen und Strukturveränderungen, Messtechnische Ergänzung der Nachrechnung |
| 13. Alarmierungsplan: | Vorhanden |
| - Grenzwert: | Warnmeldung: 5 mm
Alarmmeldung: 20 mm |
| - Alarmierungskette: | Messtechniker → Tragwerksplaner
→ Straßenbauverwaltung |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Straßenbauverwaltung |

Beschreibung des Monitorings

Im November 2018 wurden im Zuge der Nachrechnung der Autobahnbrücke (Bild 1) und Materialprüfungen des im Überbau verbauten Stahls Defizite in der Tragfähigkeit der Brücke ermittelt. Infolgedessen wurde die Fahrtrichtung auf dem älteren Überbau aus dem Jahr 1949 für den Verkehr gesperrt und der Verkehr auf den jüngeren Überbau in einer 4+0 Verkehrsführung umgeleitet. Seit Ende 2020 wird der Stahlüberbau durch den Einbau zusätzlicher Stahlbauteile an den Tragwerksteilen mit rechnerischen Defiziten ertüchtigt. Mit der Ertüchtigung in Kombination mit einer messtechnischen Überwachung des Überbauverhaltens wird dem Bauwerk eine ausreichende Restnutzungsdauer zur Überbrückung der Planungs- und Bauzeit des Ersatzneubaus getestet.

Zur Aufrechterhaltung des Verkehrs bis zum Ersatzneubau wurde ein Monitoringsystem zur Überprüfung möglicher Tragwerksverformungen vorgesehen. Es wird davon ausgegangen, dass sich ein Abfall der Überbausteifigkeit über zunehmende Verformungen in Feldmitte ankündigt. Als Messsystem wurde ein digitales Schlauchwaagensystem mit 15 Messpunkten an der Unterkante der Längsträger in den Feldmitten installiert (Bilder 2 bis 4). Die Messpunkte wurden über die rechnerisch maßgebenden Stellen in Längsrichtung aus der Nachrechnung festgelegt. Zur Abschätzung thermischer Überbauverformungen in den Verformungsmessungen der Schlauchwaage wurden 4 Temperatursensoren zur Messung der Oberflächentemperatur des Stahls und eine Wetterstation

installiert. Die gesamte Messanlage ist für eine mögliche Nutzungsdauer von 15 Jahren ausgelegt.

Zur Kalibrierung der Messanlage und Untersuchung des tatsächlichen Tragverhaltens der Brücke wurde eine Kalibrierungsfahrt mit unterschiedlichen Schwerlasttransportern und Geschwindigkeiten durchgeführt (Bild 5).

Während der Betriebsphase wurden Messstörungen infolge der Bauwerksschwingung bzw. Vibration aus Verkehrseinwirkungen festgestellt. Die Messdatenauswertung wurde infolge dessen um einen Filter zur Bereinigung der Einflüsse aus Vibration und Schwingung ergänzt. Als redundantes Messsystem für den Fall eines Messausfalls sind Kontrollmessungen mittels eines Tachymeters vorgesehen. Das Monitoringsystem wurde lediglich am älteren Überbau installiert. Der Überbau aus jüngeren Baujahr befindet sich noch in der Nachrechnung. Die Verformungsgrenzwerte wurden konservativ und konstruktiv festgelegt. Durch die Kalibrierungsfahrt konnte das Rechenmodell im Wesentlichen verifiziert werden. Das Bauwerk verhält sich real etwas steifer als im Modell abgebildet. Die Warnwert- und Alarmwertüberprüfung verwendet Stundenmittelwerte und findet automatisiert und laufend statt. Benachrichtigt wird der Tragwerksplaner, die Straßenbauverwaltung und der Monitoringbetreiber. Direkte Folgen aus Warn- oder Alarmmeldungen sind u.a. kurzfristige Sonderprüfungen.

Folgerung

In dem bisherigen Messzeitraum konnte kein Verformungszuwachs an den Hauptträgern festgestellt werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Bauwerksansicht, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nordwest

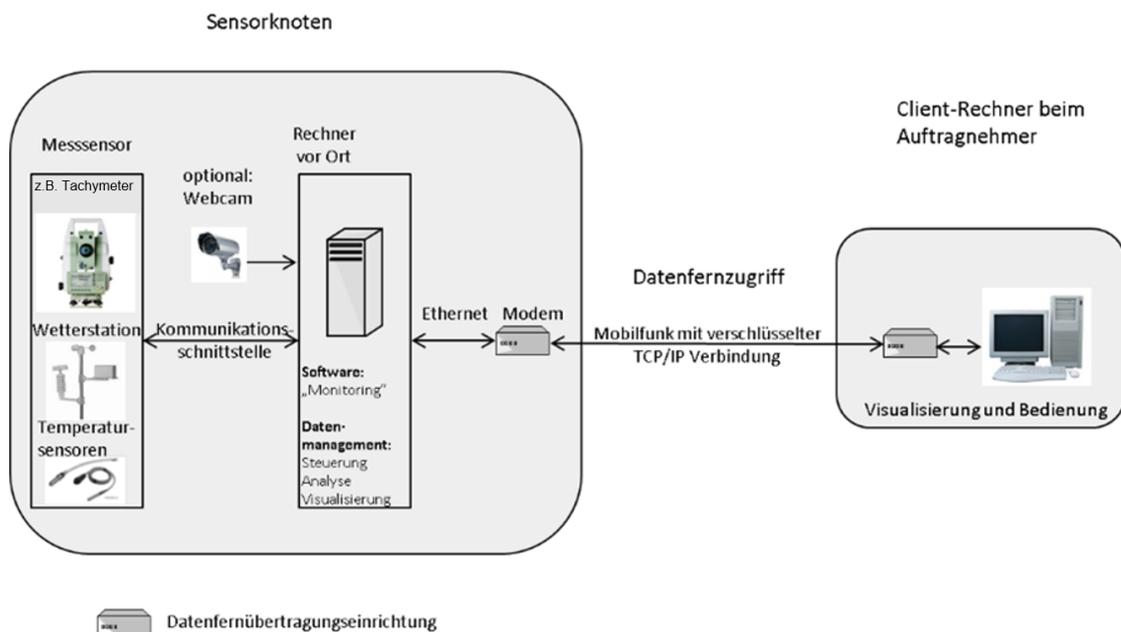


Bild 2: Messsystemarchitektur, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nordwest



Bild 3: Digitale Schlauchwaage, Quelle: Dr. Hesse und Partner Ingenieure

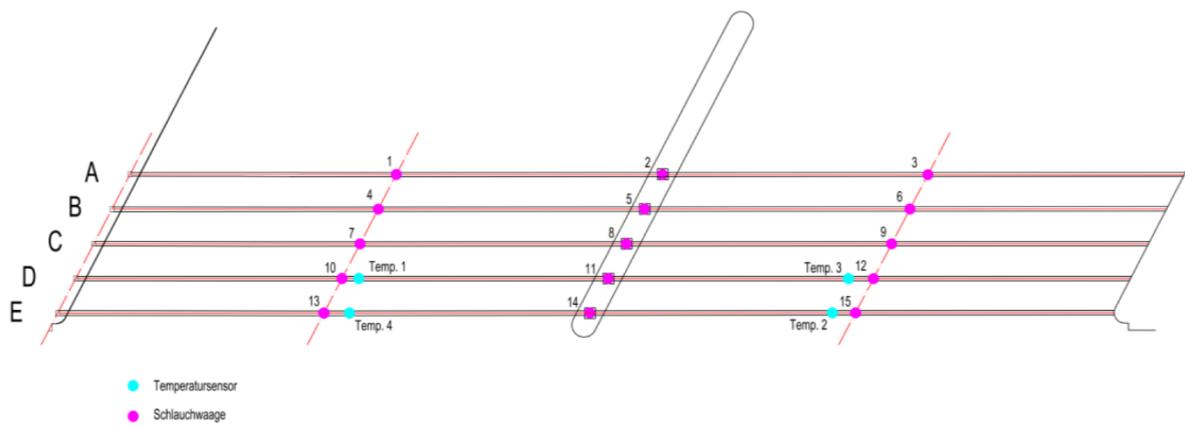


Bild 4: Skizze der Messstellen, Quelle: Dr. Hesse und Partner Ingenieure

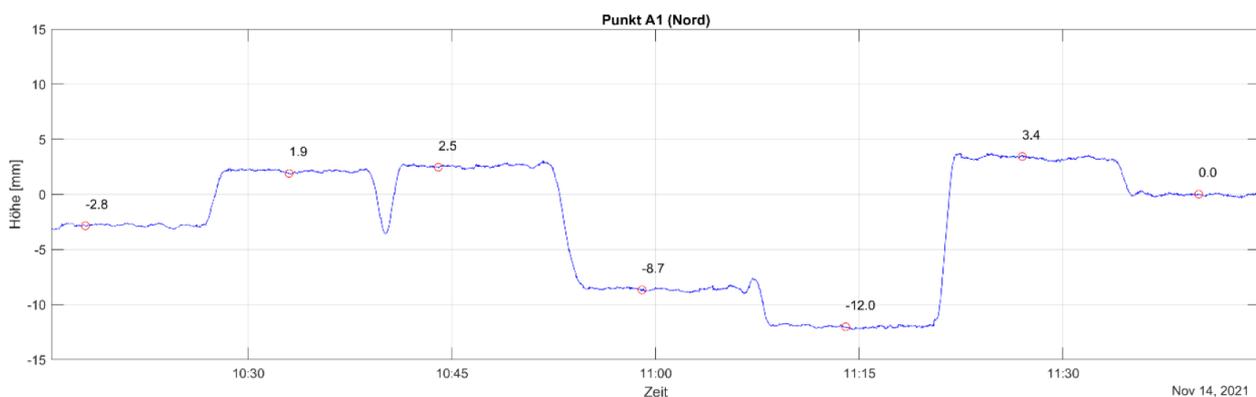


Bild 5: Exemplarischer Messwertgraph während der Kalibrierungsfahrt, Quelle: Dr. Hesse und Partner Ingenieure

Monitoring 5.2 **Tachymetrische Überwachungsmessung der Überbauverformungen zur Schadensdetektion bei Spannungsrisskorrosionsgefahr**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	21,95 – 27,80 – 21,95	m
1.2 Zahl der Felder:	3	
1.3 Brückenfläche:	2294	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	82.3	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 45 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1963	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Zellenkasten (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Stelzenlager, Linienkipplager, Rollenlager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Massivpfeiler
2.6 Widerlager:	Massivwand
2.7 Gründung:	Widerlager: Flachgründung, Pfeiler: Tiefgründung Rammpfähle
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450, St145/160
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B300
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B300

4. Baugrund Gründung im Uferbereich

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Spannungsrisskorrosionsgefährdeter Spannstahl ohne rechnerisches Ankündigungsverhalten bei bisher keiner bekannten Schädigung

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Tachymeter
 - Messbereich Sensortechnik: -
 - Erwartete Messunsicherheit: -
 - Temperaturkompensation: Widerstandsthermometer zur Abschätzung der Verformungen infolge Temperatur
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Wetterstation, Auswerterechner, Serverschrank
2. **Grund des Monitorings:** Überwachungsmaßnahme als Kompensation bei bekannten Defiziten, Spannungsrisskorrosionsgefahr
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 10 Messprismen
1 Tachymeter
2 Temperatursensoren
4. **Messort am Bauwerk:** Überbau, Feldmitte
5. **Installationsbereich:** Unterseite des Längsträgers in Feldmitte
6. **Installationsart:** Befestigung durch Schrauben
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 88.000,00 € bis Mitte 2021 €
 - Planungskosten: - €
 - Installationskosten: - €
 - Betriebskosten: 18.000,00 € ab Mitte 2021 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 2 Werktage
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2016 bis zum ENB
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Straßenbauverwaltung
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring, Messdienstleister
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring, Messdienstleister
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring, Messdienstleister
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring, Messdienstleister
 - Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Vertikale Verformungsmessung des Überbaus |
| 2. Messgrößen: | |
| - Verformungsmessung: | Über Höhenkoordinate |
| - Temperaturmessung: | °C |
| 3. Abtaste: | |
| - Verformungsmessung: | 0,004 Hz |
| - Temperaturmessung: | 10 min |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Verformungsmessung: | 0,004 Hz |
| - Temperaturmessung: | 10 min |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Täglich und monatlich |
| 6. Daten: | |
| - Verformungsmessung: | Absolutwert, Mittelwert |
| - Temperaturmessung: | Momentanwert |
| 7. Datenformat: | *.csv |
| 8. Datenerfassung: | Elektronische Speicherung der Messdaten vor Ort |
| 9. Datenübertragung: | Mobile Daten |
| 10. Datenmanagementsystem: | Firmenspezifisch |
| 11. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Firmenspezifisch, MS Excel |
| - Ausgabe: | Graphisch, Vorlage von Berichten beim Auftraggeber |
| 12. Datenverwendung: | Bewertung von Anomalien und Schäden, Frühzeitige Detektion von Schadensfällen und Strukturveränderungen, Identifikation und Bewertung der Bauwerksreaktionen, Warnwertgebung |
| 13. Alarmierungsplan: | |
| - Grenzwert: | 2 mm Differenz zwischen den Tagesmittelwerten |
| - Alarmierungskette: | Fachplaner Monitoring → Straßenbauverwaltung |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Fachplaner Monitoring, Straßenbauverwaltung |

Beschreibung des Monitorings

Dem Bauwerk (Bild 1) mit Spannungsrisskorrosion gefährdetem Spannstahl wurden Defizite im rechnerischen Ankündigungsverhalten ausgewiesen. Zur frühzeitigen Detektion von Strukturveränderungen wurde eine Verformungsüberwachung mit Tachymetern vorgesehen (Bild 3). Die Bauwerksverformungen werden jeweils in Feldmitte mit Messprismen als Objektpunkten gemessen (Bild 2). Als Referenzmessung der Überbauverformung dienen Verformungsmessungen an den Festpunk-

ten an den Pfeilern (Bilder 2 und 4). Es findet ein automatisierter Vergleich der Tagesmittelwerte sowie eine Bewertung der Monatsmittelwerte statt. Mit dem Monitoring sollen Steifigkeitsveränderungen am Bauwerk frühzeitig erkannt werden. Die Monitoringdaten werden nicht für die Nachrechnung angesetzt. Das Monitoring ist ein Bestandteil eines Systems an umfassenden Kompensationsmaßnahmen.

Folgerung

In der bisherigen Monitoringperiode konnte keine Zustandsverschlechterung angekündigt über eine Zunahme der Überbauverformungen festgestellt werden. Das Monitoring liefert einen maßgebenden Beitrag zur Aufrechterhaltung des Verkehrs. Über die kontinuierliche Überwachung möglicher Überbauverformungen kann das Sicherheitsdefizit aufgrund eines fehlenden rechnerischen Ankündigungsverhaltens reduziert werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Bauwerksansicht, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nordwest



Bild 2: Messstellen und Installation der Messprismen, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nordwest



Bild 3: Standpunkt des Tachymeters,
Quelle: Die Autobahn GmbH des
Bundes, Niederlassung Nordwest



Bild 4: Übersicht der Messpunkte, Quelle: RMK Vermessung Geodatenservice

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Tachymeter
 - Messbereich Sensortechnik: -
 - Erwartete Messunsicherheit: -
 - Temperaturkompensation: Widerstandsthermometer zur Abschätzung der Verformungen infolge Temperatur
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Wetterstation, Auswerterechner, Serverschrank
2. **Grund des Monitorings:** Überwachungsmaßnahme als Kompensation bei bekannten Defiziten, Spannungsrisskorrosionsgefahr
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 13 Messprismen
1 Tachymeter
4 Temperatursensoren
4. **Messort am Bauwerk:** Überbau, Feldmitte
5. **Installationsbereich:** Unterseite des Längsträgers in Feldmitte
6. **Installationsart:** Befestigung durch Schrauben
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 88.000,00 € bis Mitte 2021 €
 - Planungskosten: / €
 - Installationskosten: / €
 - Betriebskosten: 18.000,00 € ab Mitte 2021 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *in Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 2 Werktage
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2016 bis ENB
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Straßenbauverwaltung
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring, Messdienstleister
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring, Messdienstleister
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring, Messdienstleister
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring, Messdienstleister
 - Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Vertikale Verformungsmessung des Überbaus |
| 2. Messgrößen: | |
| - Verformungsmessung: | Über Höhenkoordinate |
| - Temperaturmessung: | °C |
| 3. Abtaste: | |
| - Verformungsmessung: | 0,004 Hz |
| - Temperaturmessung: | 10 min |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Verformungsmessung: | 0,004 Hz |
| - Temperaturmessung: | 10 min |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | täglich und monatlich |
| 6. Daten: | |
| - Verformungsmessung: | Absolutwert, Mittelwert |
| - Temperaturmessung: | Momentanwert |
| 7. Datenformat: | *.csv |
| 8. Datenerfassung: | Elektronische Speicherung der Messdaten vor Ort |
| 9. Datenübertragung: | Mobile Daten |
| 10. Datenmanagementsystem: | Firmenspezifisch |
| 11. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Firmenspezifisch, MS Excel |
| - Ausgabe: | Graphisch,
Vorlage von Berichten beim Auftraggeber |
| 12. Datenverwendung: | Bewertung von Anomalien und Schäden,
Frühzeitige Detektion von Schadensfällen und
Strukturveränderungen, Identifikation und
Bewertung der Bauwerksreaktionen,
Warnwertgebung |
| 13. Alarmierungsplan: | |
| - Grenzwert: | 2 mm Differenz zwischen den Tagesmittelwerten |
| - Alarmierungskette: | Fachplaner Monitoring → Straßenbauverwaltung |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Fachplaner Monitoring, Straßenbauverwaltung |

Monitoringmaßnahme:	5. Überwachung der Tragwerksverformungen	Lfd. Nr.:	5.3	Blatt:	4
---------------------	--	-----------	-----	--------	---

Beschreibung des Monitorings

Dem Bauwerk (Bild 1) mit spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl wurden Defizite im rechnerischen Ankündigungsverhalten ausgewiesen. Zur frühzeitigen Detektion von Strukturveränderungen wurde eine Verformungsüberwachung mit Tachymetern vorgesehen.

Die Bauwerksverformungen werden jeweils in Feldmitte gemessen (Bild 2). Es findet ein automatisierter Vergleich der Tagesmittelwerte sowie eine Bewertung der Monatsmittelwerte statt. Mit dem Monitoring sollen Steifigkeitsveränderungen am Bauwerk frühzeitig erkannt werden. Das Monitoring ist ein Bestandteil eines Systems an umfassenden Kompensationsmaßnahmen.

Folgerung

In der bisherigen Monitoringperiode konnte keine Zustandsverschlechterung angekündigt über eine Zunahme der Überbauverformungen festgestellt werden. Das Monitoring liefert einen maßgebenden Beitrag zur Aufrechterhaltung des Verkehrs. Über die kontinuierliche Überwachung möglicher Überbauverformungen kann das Sicherheitsdefizit aufgrund eines fehlenden rechnerischen Ankündigungsverhaltens reduziert werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Bauwerksansicht, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nordwest

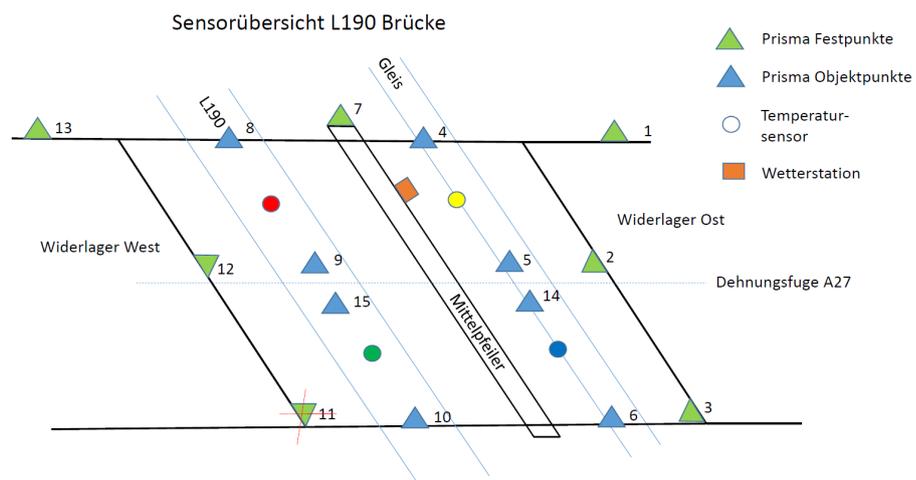


Bild 2: Installationsskizze der Messprismen und Sensoren, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nordwest

Monitoring 5.4 **Dynamische Laserdistanzmessung zur Überwachung der Überbauverformungen bei Defiziten im rechnerischen Ankündigungsverhalten**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	41,36 – 22,17	m
1.2 Zahl der Felder:	2	
1.3 Brückenfläche:	712	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	72	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1969	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Zweistegiger Plattenbalken, Vollquerschnitt
2.4 System der Lagerung:	Schwimmende Lagerung, Elastomerlager
2.5 Pfeiler / Stützen:	-
2.6 Widerlager:	-
2.7 Gründung:	Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtete Oberfläche

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450 nach DIN 1045 bis 1972
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B450 nach DIN 1045 bis 1972
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B250 nach DIN 1045 ab 1972 bzw. 1978

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Verwendung von spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl (Sigma Oval)
- Ergebnis eines nicht ausreichenden Versagensankündigungsverhalten in einer rechnerischen Untersuchung gemäß der BAST-Handlungsanweisung-Spannungsrissskorrosion
- Reduzierung der rechnerischen Restnutzungsdauer bis zum Jahr 2019 aufgrund festgestellter Tragfähigkeitsdefizite
- geplante Inbetriebnahme eines Ersatzneubaus innerhalb weniger Jahre nach Ablauf der Restnutzungsdauer

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Dynamische Laserdistanzmessung, Laserklasse 2 sichtbar $\lambda = 650 \text{ nm}$, IP66
 - Messbereich Sensortechnik: 1 bis 50 m
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,1 mm Auflösung
0,25 mm Standardabweichung
 - Temperaturkompensation: Referenzmessung der Oberflächen- und Außenlufttemperatur
 - Gesamttechnischer Umfang: Laserdistanzsensor, Justiervorrichtung, Messziel, Microcomputer zur Datenaufzeichnung und -verarbeitung, nicht flüchtiger Datenspeicher, Modul zur Datenübermittlung per UMTS/GPRS, Server zur dauerhaften Datenspeicherung, Schutzgehäuse vor Vandalismus.
2. **Grund des Monitorings:** Spannungsrisskorrosion und Tragfähigkeitsdefizite
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 4 Laserdistanzsensoren mit passiven Messzielen, 3 Temperatursensoren
4. **Messort am Bauwerk:** Bauwerksquerschnitt in der Feldmitte der 2 Felder
5. **Installationsbereich:** Laserdistanzmessgerät und CPU auf dem Widerlager;
Zielmessebene innenseitig an den Stegen
6. **Installationsart:** Mittels Schrauben und Dübeln verankert
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 232.200,00 (über 5 Jahre) €
 - Planungskosten: *In Installationskosten enthalten* €
 - Installationskosten: 57.180,00 €
 - Betriebskosten: 14.880,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 3 Tage, inkl. Inbetriebnahme
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2019 bis ENB (geplante Dauer: 5 Jahre)
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Straßenbauverwaltung
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*Dienstleister für Sondermesstechnik für Windkraftanlagen und Ingenieurbauwerke)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Datenaufbereitung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung

Informationsgewinn und Datenmanagement

1. **Ziel der Messung:** Analyse der Nulllage (Hinweis auf Änderungen der Tragfähigkeit); Vertikale Verformung durch Verkehrslasten (Hinweis auf Änderungen der Längssteifigkeit); Schwingungsanalysen (Hinweis auf Strukturänderungen); Erfassung globaler Verkehrslasten
2. **Messgrößen:**
 - Verformungsmessung: 1 bis 50 m
3. **Abtastrate:**
 - Verformungsmessung: 5 bis 50 Hz
4. **Frequenz Datenaufzeichnung:**
 - Verformungsmessung: 5 bis 50 Hz
5. **Frequenz Datenauswertung:** Stündlich
6. **Daten:**
 - Verformungsmessung: Momentanwert
 - Temperaturmessung: Momentanwert
7. **Datenformat:** *.csv
8. **Datenerfassung:** Server, Datenaufbereitung und Analyse
9. **Datenübertragung:** Automatische Übertragung der Daten per UMTS/GPRS
10. **Datenmanagementsystem:** Stetig wachsende Datenbank von Rohdaten und Auswertungen, Fernzugriff über FTP-Server
11. **Datenauswertung:**
 - Prozess: Trendanalyse zum Tragwerksverhalten
 - Ausgabe: Monatsberichten und Alarmierung per E-Mail
12. **Datenverwendung:** Kontrolle und frühzeitige Warnung von Änderungen im Bauwerksverhalten.
13. **Alarmierungsplan:**
 - Grenzwert: Auffälligkeiten im Verformungs- und Rückstellverhaltens des Tragwerkes und Überwachung von Grenzwertüberschreitungen
 - Alarmierungskette: Alarm per E-Mail → Fachplaner Monitoring → Straßenbauverwaltung
 - Zuständigkeit im Alarmfall: Straßenbauverwaltung

Beschreibung des Monitorings

Das Spannbetonbauwerk (Bilder 1 und 2) wurde mit spannungsriissgefährdetem Spannstahl Sigma Oval hergestellt. Eine rechnerische Untersuchung gemäß der BAST-Handlungsanweisung Spannungsriisskorrosion in den Jahren 2011 hatte ein nicht ausreichendes Versagensankündigungsverhalten zum Ergebnis. Die Zeitspanne zwischen Rissbildung und der Überbauverformung bis hin zum Versagenseintritt ist rechnerisch kleiner als die Regelprüfungen gemäß der DIN 1076. Es wurden zudem Tragfähigkeitsdefizite an allen vier Teilbauwerken festgestellt, welche zu einem Ablauf der rechnerischen Restnutzungsdauer im Jahr 2019 führten. Aufgrund von fehlenden baurechtlichen Voraussetzungen für die Ersatzneubauten zeichnete sich bereits Ende 2018 ab, dass die Restnutzungsdauer bis Ablauf des Jahres 2019 nicht eingehalten werden kann bzw. um mehrere Jahre überschritten werden muss. Aufgrund der geplanten Inbetriebnahme des Ersatzbauwerks im Jahr 2020 wurde auf eine Verstärkung verzichtet und die wirtschaftlichere Lösung des Bauwerksmonitorings gewählt. Ziel des Monitorings ist die Sicherstellung der verkehrlichen Nutzung trotz Überschreitung der rechnerischen Restnutzungsdauer bei gegebener Tragfähigkeit im Sinne der Nachrechnungsrichtlinie bis zum Ersatzneubau.

Für das Bauwerksmonitoring wurde ein zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme neuartiges Verfahren der dynamischen Laserdistanzmessung im Rahmen eines Pilotprojektes angewendet. Das Verfahren der dynamischen Laserdistanzmessung bietet die Möglichkeit, über einzelne Messpunkte globale und über mehrere zeitgleiche Einzelmessungen lokale Aussagen über das gesamte Tragwerksverhalten zu treffen. Dabei kann die Zeitspanne zwischen den Messungen entsprechend der Abtastrate des Laserdistanzmessgerätes so eingestellt werden, dass Aussagen zu Ereignissen getroffen werden, welche einen temporären und dauerhaften Einfluss auf das Tragwerk nehmen. Die Einflüsse werden über die Verformungsmessung wie folgt erfasst:

- 1 Temporäre Einflüsse wie z.B. Verkehrs- und Temperaturlasten:
Über die kurzfristige Verschiebung der Nulllage

der Entfernungsmessungen kann die lastbedingte Verformung des Tragwerkes beschrieben werden (Bild 6 und 7).

- 2 Dauerhafte Einflüsse auf das statische System (Risse und Abrisse der Litzen): Über die permanente Verschiebung der Nulllage der Entfernungsmessungen und der Eigenresonanz des Tragwerkes aufgrund von kurzfristigen Lasten, kann durch den Abgleich der aktuellen Daten mit älteren Daten (Referenzdaten) eine Veränderung im statischen System beschrieben werden.

Die Auswahl der Messstellen und Laserpositionierung erfolgte nach Aussagekraft der Messergebnisse, Beständigkeit gegen Vandalismus und dem zu erwartenden Wartungsaufwand. Die Messanlage ist für eine Nutzungsdauer von 10 Jahren ausgelegt.

Je Steg und Feld wurde jeweils eine Messstrecke installiert. Die Messziele sind an den jeweiligen Innenseiten der Stege auf halber Spannweite angebracht (Bilder 3, 4, 8, 9 und 10). Über die vier Messstrecken kann neben der Überwachung der globalen Verformung auch die Torsion des Überbaus gemessen werden (Bild 5). Über die Überwachung der Verformungen können Schäden, welche noch nicht durch Risse angekündigt werden, frühzeitig erkannt werden. Zur Validierung der Einflüsse aus Temperatureinwirkungen werden zusätzlich die Oberflächentemperatur des Überbaus und die Außenlufttemperatur gemessen.

Die Messdaten werden automatisiert auf einen Server übertragen und stündlich ausgewertet. Die Alarmwerte wurden nach einer üblichen Kalibrierungsphase in vier Abstufungen festgelegt. Bei Erreichen eines definierten Grenzwertes wird eine automatisierte E-Mail an den Entscheidungsträger versandt.

Monitoringmaßnahme:	5. Überwachung der Tragwerksverformungen	Lfd. Nr.:	5.4	Blatt:	5
----------------------------	---	------------------	------------	---------------	----------

Nach einer Plausibilitätsprüfung werden in Abhängigkeit von der Warnstufe Maßnahmen in Reaktionszeiten zwischen fünf Werktagen (Stufe 1) und 2 h (Stufe 4) koordiniert. Bisher ist noch keine Überschreitung der Grenzwerte aufgetreten.

Die Dokumentation der Messergebnisse erfolgt in Form von Monatsberichten, welche dem Auftraggeber digital übersendet werden. Die Rohdaten und die Trendanalysen zum Tragwerksverhalten liegen zudem auf einem Server beim Spezialdienstleister abrufbereit vor. Die Datenübergabe wurde in der Leistungsbeschreibung in Form einer monatlichen Berichterstellung und als Warnung bei festgestellten Änderungen des Bauwerksverhaltens innerhalb von 1 Werktag per E-Mail festgelegt.

Die Reaktionszeit zur Feststellung eines Messsystemausfalls liegt bei einem Werktag. Dabei hält der Spezialdienstleister für den Fall eines Ausfalles Komponenten redundant vorrätig, um eine schnelle Reaktionszeit zu gewährleisten. Die Sicherheit in der Stromversorgung wird vom Bauherrn/ der Straßenbauverwaltung übernommen. Der Aufbau der Verkehrssicherung und Zugangstechnik obliegt ebenfalls dem Bauherrn/ der Straßenbauverwaltung. Aufgrund dessen wird aktuell von einer tendenziellen Reaktionszeit von 2-3 Tagen zur Wiederaufnahme des Messbetriebes nach dem Auftreten einer Störung ausgegangen.

Folgerung

Bis zum derzeitigen Monitoringbetrieb wurden keine Auffälligkeiten beobachtet, welche auf eine Zustandsveränderung des Tragwerks oder Schadensentwicklung hindeuten. Über die messtechnische Dauerüberwachung kann das Bauwerk weiterhin unter Verkehr gehalten werden. Zudem bietet das Monitoring die Möglichkeit einer permanenten Überwachung des Tragwerksverhaltens, welche innerhalb der regulären Bauwerksprüfung nicht vorgesehen und nicht umzusetzen ist. Diese Messungsdichte des Bauwerksmonitorings ermöglicht im Bedarfsfall (Versagensankündigung) eine frühzeitige Veranlassung einer Sonderbauwerksprüfung und Einleitung entsprechender Maßnahmen. Unter Einhaltung der Verkehrs-

sicherheit wird hierdurch ermöglicht das Bauwerk über die rechnerische Restnutzungsdauer hinaus weiter in Betrieb zu halten. Das Bauwerksmonitoring ersetzt hierbei nicht die Bauwerksprüfung und Schadensanalyse am Bauwerk, sondern ist als ergänzendes Überwachungselement und insbesondere als Warnungsinstrument zu verstehen. Die Dauerüberwachung versetzt den Baulasträger in die Lage rechtzeitig Kompensationsmaßnahmen im Fall von Zustandsveränderungen zu ergreifen.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Bauwerksansicht, Quelle: Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung West



Bild 2: Unteransicht des Bauwerkes, Quelle: Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung West

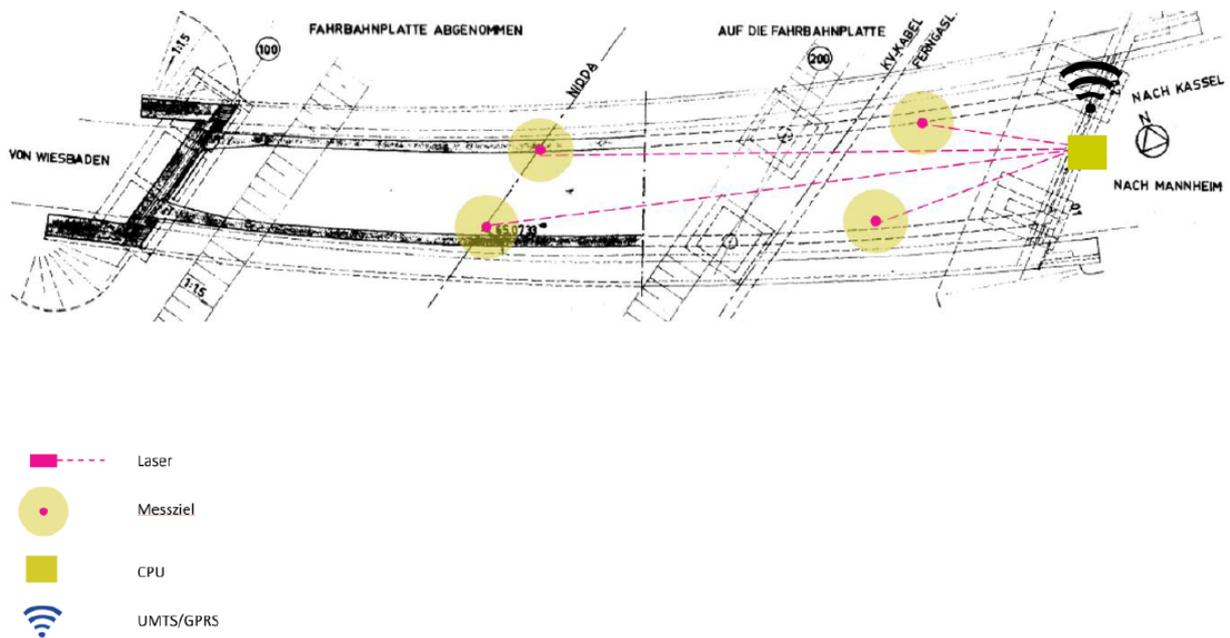


Bild 3: Unteransicht des Bauwerkes, Quelle: Lucks Technologies GmbH

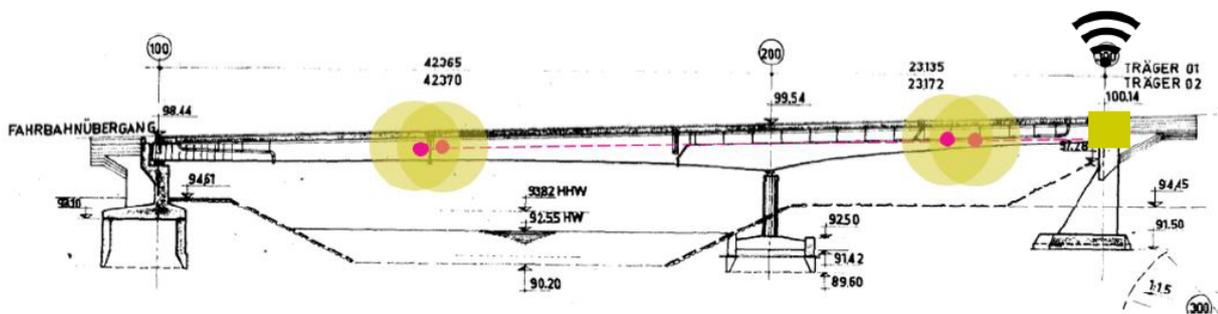


Bild 4: Skizze des Messsystems in der Seitenansicht, Quelle: Lucks Technologies GmbH

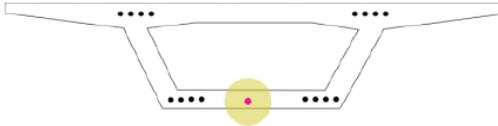
Globale Verformung

1 Messpunkt pro Abschnitt

Globale Verformung + Torsion

2 Messpunkte pro Abschnitt

Ruhelage



Verformung

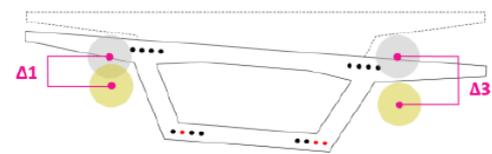
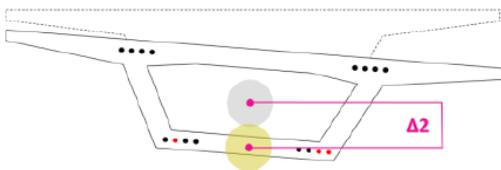


Bild 5: Darstellung des Messprinzips, Quelle: Lucks Technologies GmbH



Bild 6: Verformungsverhalten eines Messziels für einen Zeitraum von 3 Minuten, Quelle: Lucks Technologies GmbH



Bild 7: Verformungsverhalten eines Messziels bei LKW Überfahrten, Quelle: Lucks Technologies GmbH



Bild 8: Laser-Messsystem für dynamische Verformungsmessungen, Quelle: Lucks Technologies GmbH



Bild 9: Messziel am Überbau, Quelle: Lucks Technologies GmbH



Bild 10: Ansicht der Messzentrale, Quelle: Lucks Technologies GmbH

Monitoring 5.5 **Verformungsüberwachung mittels Präzisionsschlauchwaage bei Spannungsrissskorrosionsgefahr**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	22,89 – 50,15 – 20,08	m
1.2 Zahl der Felder:	3	
1.3 Brückenfläche:	1946	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	98.3	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 45 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1967	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken / Trägerrost (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Rollenlager ohne besondere Kippvorrichtung, Topflager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Stahlbetonrundstützen
2.6 Widerlager:	Widerlagerwand, massiv
2.7 Gründung:	Widerlager: Flachgründung, Stützen: Tiefgründung (Rammpfähle)
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtet; thermisch gespritzt

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B450
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B300

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Verbau von spannungsrissskorrosionsgefährdetem Sigma Spannstahl

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Präzisionsschlauchwaage
 - Messbereich Sensortechnik: 0 bis 500 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: $\pm 0,1$ mm
 - Temperaturkompensation: Bauteiltemperaturmessung
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Messzentrale, Webanschluss
2. **Grund des Monitorings:** Überwachungsmaßnahme als Kompensation bei bekannten Defiziten, Spannungsrissskorrosionsgefährdeter Spannstahl
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 10 Präzisionsschlauchwaagen
2 Digitalnivellieren
2 Inklinometer
2 Temperatursensoren
4. **Messort am Bauwerk:** Feldmitte
5. **Installationsbereich:** Hohlkasten
6. **Installationsart:** Mittels Schrauben und Dübeln verankert
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:** *Nettobetrag*
 - Gesamtkosten: 49.988,50 €
 - Planungskosten: - €
 - Installationskosten: 46.388,50 €
 - Betriebskosten: 3.600,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: - €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** Digitalnivelliere und Inklinometer: November 2008; Schlauchwaagen und Temperatursensoren: September 2019
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2008
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Straßenbauverwaltung, Tragwerksplaner
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (Ingenieur- und Vermessungsbüro*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung, Tragwerksplaner

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Überwachung möglicher Verformungen bei Spanndrahtbrüchen infolge Spannungsrisskorrosion |
| 2. Messgrößen: | |
| - Verformungsmessung (Schlauchwaage): | < 2 mm |
| - Temperaturmessung: | - 50 bis +200 °C |
| 3. Abtastrate: | |
| - Verformungsmessung: | < 1 Hz |
| - Temperaturmessung: | < 1 Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Verformungsmessung: | < 1 Hz |
| - Temperaturmessung: | < 1 Hz |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Kontinuierlich |
| 6. Daten: | |
| - Verformungsmessung: | Momentanwert,
Wertemittelung Datenspeicher 1:
für 2 Stunden alle 15 sec/Messwert
Wertemittelung Datenspeicher 2:
für 168 Stunden alle 15 min/Messwert
Wertemittelung Datenspeicher 3:
alle Daten, Intervall 1 Std. /Messwert |
| - Temperaturmessung: | Momentanwert, Wertemittelung entsprechen der Verformungsmessung |
| 7. Datenformat: | *.csv |
| 8. Datenerfassung: | Datenlogger mit Weiterleitung an Server, Datenaufbereitung und Analyse auf Server |
| 9. Datenübertragung: | Automatische Übertragung der Daten per UMTS/GPRS; Online Zugriff auf Messwerte |
| 10. Datenmanagementsystem: | Stetig wachsende Datenbank von Rohdaten und Auswertungen, Fernzugriff über FTP-Server |
| 11. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Trendanalyse zum Tragwerksverhalten |
| - Ausgabe: | Web-Präsentation der Messwerte;
graphische und tabellarische Wochenberichte,
Alarmierung per E-Mail und SMS |
| 12. Datenverwendung: | Kontrolle und frühzeitige Warnung bei Änderungen im Bauwerksverhalten |
| 13. Alarmierungsplan: | |
| - Grenzwert: | Auffälligkeiten im Verformungs- und Rückstellverhaltens des Tragwerkes und Überwachung von Grenzwertüberschreitungen |
| - Alarmierungskette: | Alarm per E-Mail → Fachplaner Monitoring
→ Straßenbauverwaltung |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Straßenbauverwaltung |

Beschreibung des Monitorings

Die Brücke wurde im Jahr 1967 erbaut. Es handelt sich um eine 3-feldrige Spannbetonbrücke mit 2-zelligem Hohlkasten und seitlich untergehängten Geh- und Radwegen (Bilder 1 und 2). Der seinerzeit verbaute Sigma Spannstahl ist gefährdet durch Spannungsrisskorrosion. Das Bauwerk wurde sowohl nach Nachrechnungsrichtlinie als auch nach der Handlungsanweisung Spannungsrisskorrosion für die Brückenklasse BK 60 nachgerechnet. Es konnte nicht in allen Schnitten ein ausreichendes Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden. Eine Verstärkung des Bauwerks oder eine weitere verkehrliche Entlastung war aufgrund der Berechnungsergebnisse alleine nicht möglich bzw. nicht ausreichend, dass auf ein Monitoringsystem zur Dauerüberwachung hätte verzichtet werden können.

Um das Bauwerk bis zum Ersatzneubau weiterhin unter Verkehr halten zu können, wurde zusätzlich zu der jährlichen Sonderprüfung eine Dauerüberwachung durch ein Monitoringsystem angeordnet, damit Veränderungen des Tragverhaltens der Brücke frühzeitig erkannt werden können. Ursprünglich wurde ein nivellierbasiertes System zur Überwachung der Tragwerksverformungen

eingesetzt. Da die Laufzeit des Monitorings verlängert wurde, erfolgte ein Ersatz des alten Messsystems durch ein Schlauchwaagensystem (Bilder 4 und 5).

Die Messorte wurden von dem zuständigen Brückeningenieur als Ergebnis der Nachrechnung festgelegt. Die Messstellen wurde so definiert, dass die Höhenänderung in Feldmitte bzw. die Durchbiegung des Feldes erfasst werden kann (Bild 3). Als Referenzpunkt der Verformungsmessung dient ein Fixpunkt am Widerlager, an welchem keine Verformungen erwartet werden. Zur Abschätzung temperaturbedingter Bauwerksverformungen wird die Bauwerkstemperatur in Feldmitte an zwei Stellen aufgenommen.

Die Messdaten werden in Wochenberichten vom Vermessungsbüro an den beteiligten Brückeningenieur übermittelt (Bild 6). Im Fall einer außergewöhnlichen Verformungszunahme wird zunächst durch das Vermessungsbüro geprüft, dass diese Verformung nicht auf einer Fehlfunktion des Messsystem beruht. Nach der Prüfung erfolgt die Weitergabe der Daten und Prüfberichte an die Straßenbauverwaltung.

Folgerung

Über die Anordnung einer kontinuierlichen Verformungsmessung mittels digitaler Schlauchwaage kann das Bauwerk weiterhin für den Verkehr mit dem gesellschaftlich geforderten Sicherheitsstandard bis zum Ersatzneubau betrieben werden.

An dem Bauwerk wurde eine Spannstahlbeprobung mit nachfolgenden Laboruntersuchungen gemäß der Handlungsanweisung Spannungsrisskorrosion durchgeführt, welche

bereits einige Jahre (≥ 5 Jahre) zurückliegt. Die Ergebnisse der Untersuchungen waren unauffällig. In jährlichen Sonderprüfungen wurden bisher keine Risse und Rissentwicklungen festgestellt, die auf Schäden infolge Spannungsrisskorrosion hindeuten. Das Ergebnis der Sonderprüfungen kann mit den Verformungsmessungen bestätigt werden. In der bisherigen Messperiode konnten keine außergewöhnlichen Verformungen festgestellt werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Bauwerksansicht, Quelle: Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr



Bild 2: Bauwerksunteransicht, Quelle: Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr

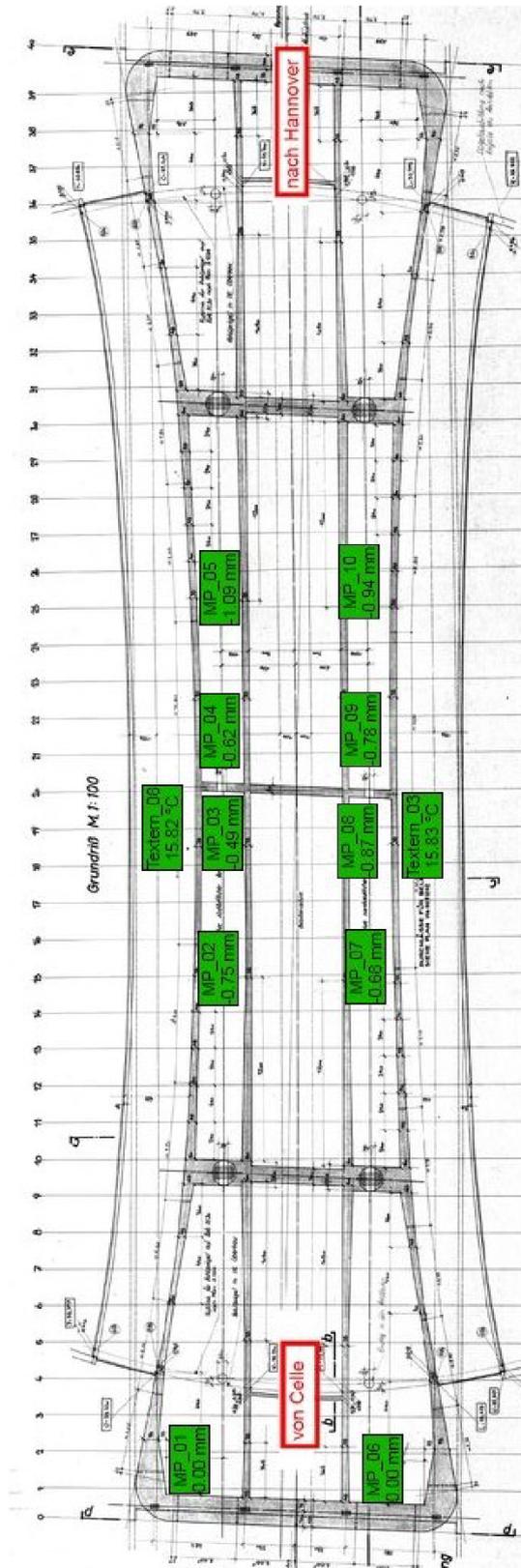


Bild 3: Messstellen der Präzisions Schlauchwaage und Temperaturgeber,
Quelle: Ingenieurbüro Drecoll



Bild 4: Installation und Messstelle der Präzisionsschlauchwaage,
Quelle: Ingenieurbüro Drecoll

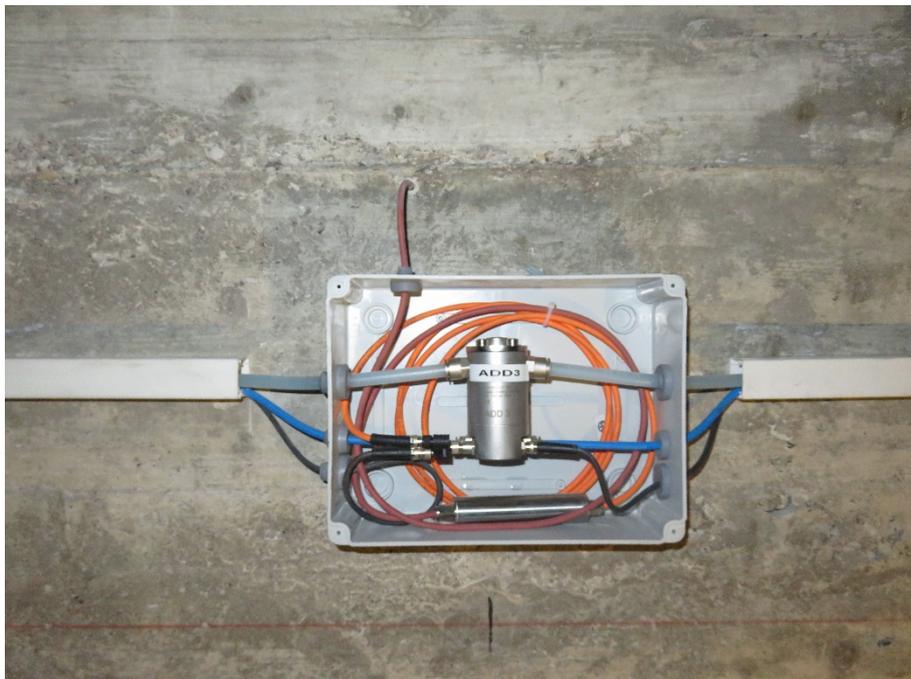


Bild 5: Installation und Messstelle der Temperatursensoren,
Quelle: Ingenieurbüro Drecoll

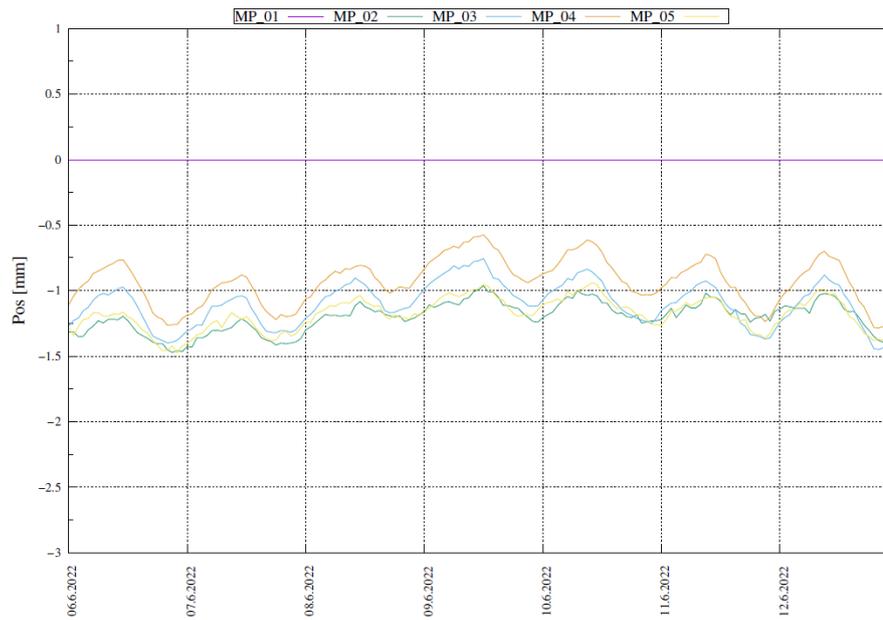


Bild 6: Exemplarischer Messwertgraph der Verformungsmessung der Schlauchwaage über die Messperiode von einer Woche, Quelle: Ingenieurbüro Drecoll

Monitoring 5.6 **Überwachung der Kragarmverformungen während einer 4+0 Verkehrsführung mittels Laserdistanzmessung**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	33,50 - 40,0 - 40,0 - 40,0 - 40,0 - 40,0 – 40,0 - 40,0 - 40,0 - 40,0 - 40,0 - 40,0 – 40,0 - 40,0 - 40,0 – 33,50	m
1.2 Zahl der Felder:	16	
1.3 Brückenfläche:	9217	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1970	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Zellenkasten (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Verformungsgleitlager, Linienkipplager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Hohlpfeiler
2.6 Widerlager:	Kastenwiderlager mit Schleppplatte
2.7 Gründung:	Tiefgründung, Bohrpfähle
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	SMA 0/11S, Gussasphalt 0/11S, Bitumenschweißbahn

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B450
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B300

4. Baugrund

Sandiger Ton, weicher Ton und Feinsand, teilweise Schluff, mürber Fels, harter Ton und Tonstein

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Höhere Kappenbelastung während der 4+0 Verkehrsführung in der Bauphase des Ersatzneubaus

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Laser-Distanzsensor mit passivem Messziel, Laserklasse 2, $\lambda = 650 \text{ nm}$
 - Messbereich Sensortechnik: 1 bis 100 m
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,1 mm Auflösung
0,25 mm Standardabweichung
 - Temperaturkompensation: Messung der Außenluft- und Bauwerkstemperatur
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, 2 CPUs,
2 Batteriekästen, 16 Verteilerdosen
2. **Grund des Monitorings:** 4+0 Verkehrsführung mit Fahrspur auf äußerem Kragarm
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 16 Laser-Distanzsensoren mit passivem Messziel
6 Temperatursensoren
4. **Messort am Bauwerk:** Kragarme im Stütz- und Feldbereich
5. **Installationsbereich:** Messziele am Kragarmende, Laserdistanzsensor am Überbausteg
6. **Installationsart:** Festinstallation am Überbau
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 354.000,00 (über 36 Monate) €
 - Planungskosten: 31.120,00 (Fachplaner) €
 - Installationskosten: 145.290,00 €
 - Betriebskosten: 44.160,00 €/Jahr
(Fachplaner & Spezialdienstleister)
 - Kosten Datenmanagement: 15.120,00 (Spezialdienstleister) €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 6 Tage (inkl. Inbetriebnahme), 2019
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, Juni 2019 bis September 2022 (ENB)
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Dienstleister für Sondermesstechnik für Windkraftanlagen und Ingenieurbauwerke*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Dynamische Verformungsmessung am Kragarm |
| 2. Messgrößen: | |
| - Verformungsmessung: | 1 bis 100 m |
| - Temperaturmessung | - °C |
| 3. Abtastrate: | |
| - Verformungsmessung: | 5 Hz |
| - Temperaturmessung | 0,1 Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Verformungsmessung: | 5 Hz |
| - Temperaturmessung | 0,1 Hz |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | 10 Minuten Intervalle
(Trendanalyse und Alarmierung) |
| 6. Daten: | |
| - Verformungsmessung: | Momentanwerte, 10-min Mittelwerte |
| - Temperaturmessung | Momentanwerte, 10-min Mittelwerte |
| 7. Datenformat: | *.csv |
| 8. Datenerfassung: | Server, Datenaufbereitung und Analyse |
| 9. Datenübertragung: | Automatische Übertragung der Daten per UMTS/GPRS, stündliche Übertragung der Datenpakete |
| 10. Datenmanagementsystem: | stetig wachsende Datenbank von Rohdaten und Auswertungen, Fernzugriff über FTP-Server |
| 11. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Excel, Trendanalyse zum Tragwerksverhalten |
| - Ausgabe: | Graphische Ausgabe in quartalsweisen Messberichten |
| 12. Datenverwendung: | Kontrolle und frühzeitige Warnung von Änderungen im Bauwerksverhalten |
| 13. Alarmierungsplan: | |
| - Grenzwert: | 4 mm |
| - Alarmierungskette: | Spezialdienstleister für Bauwerksmessung
→ Fachplaner Monitoring → Bauleitung |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Örtliche Bauleitung |

Beschreibung des Monitorings

Die Talbrücke wird aufgrund von spannungs-risikokorrosionsgefährdetem Spannstahl und fehlender Sanierungsmöglichkeiten durch einen Neubau ersetzt. Im Rahmen der Abbrucharbeiten des nördlichen Teilbauwerks wird der Verkehr vierspurig auf das südliche Teilbauwerk umgeleitet. Mit der 4+0 Verkehrsführung erfahren die Kragarme eine erhöhte Verkehrsbelastung hinsichtlich des Schwerlastverkehrs und werden zur Kontrolle der Standsicherheit permanent mittels Laserdistanzmessung überwacht.

Durch die permanente Überwachung der Kragarmverformungen konnten Verstärkungsmaßnahmen bzw. eine bauliche Unterstützung der Kragarme zur Sicherstellung der 4+0 Verkehrsführung während der Bauzeit vermieden werden.

Die Definition der Fragestellung erfolgte durch die Straßenbauverwaltung. Die Monitoringleistung wurde als funktionale Leistungsbeschreibung über die Definition der folgenden Leistungen ausgeschrieben:

- Dynamische Verformungsmessung mit Eliminierung der Temperatureffekte
- Messgenauigkeit 1 mm
- Automatische Alarmbenachrichtigung

Das Messprinzip ist eine dynamische Verformungsmessung zwischen zwei Messpunkten. Eine Messstrecke besteht aus einem aktiven Laser-Distanzsensor und einem passiven Messziel. Insge-

samt wurden 16 Laserdistanzsensoren mit passivem Messziel in 12 Stützbereichen und 4 Feldbereichen installiert (Bilder 1 und 2). Die Anzahl und der Ort der Messstellen wurden gemäß den statischen Erfordernissen gewählt. Die Laser wurden an Sockeln an den Außenseiten der Hohlkastenstege befestigt. Die passiven Messziele befinden sich an der Unterkante des Kragarms (Bilder 3 und 4). Zur Abschätzung des Temperatureinflusses auf die mittlere Auslenkung wurden Bauteil- und Außenlufttemperatursensoren in den Drittelpunkten der Brückenlänge installiert (Bild 5). Die Messzentrale befindet sich geschützt im Inneren des Hohlkastens (Bild 6).

In der Datenanalyse werden Verformungsänderungen als Indikator einer eintretenden Schädigung erfasst. Dabei wird das Rückstellverhalten bewertet, indem die aktuelle Höhenlage unter Kompensation verkehrsbedingter Verformungen mit historischen Werten vergangener Messperioden verglichen wird (Bild 7). So können neben einer plötzlichen Zustandsveränderung (Zunahme der Kragarmverformung) des Tragwerks auch schleichende Änderungen erkannt werden. Die Verifizierung der Schädigungsszenarien erfolgt über die Erfahrungswerte aus Bauteilversuchen mit künstlich herbeigeführten Schäden wie bspw. Spanndrahtbrüche.

Folgerung

Bis zum aktuellen Zeitpunkt konnten keine Anomalien oder sonstige Schädigungen in Form von einer Zunahme der Kragarmverformungen festgestellt werden. Mit Hilfe der permanenten Verformungsüberwachung der Kragarme kann das nördliche Teilbauwerk während des Neubaus des südlichen Teilbauwerks in Betrieb gehalten werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

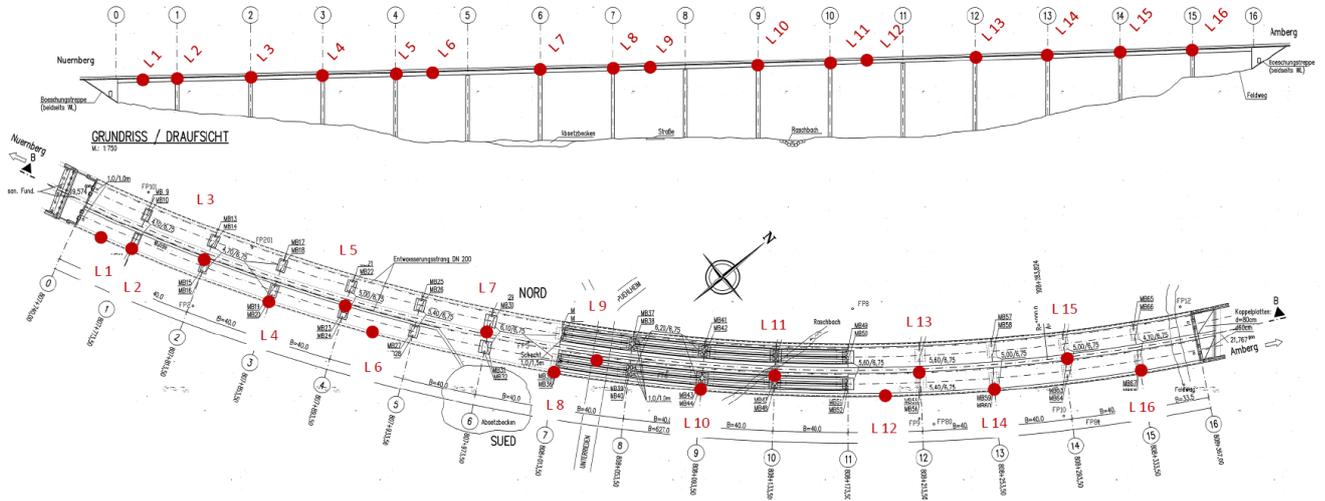


Bild 1: Anordnung der Laser-Messstrecken, Quelle: Lucks Technologies GmbH

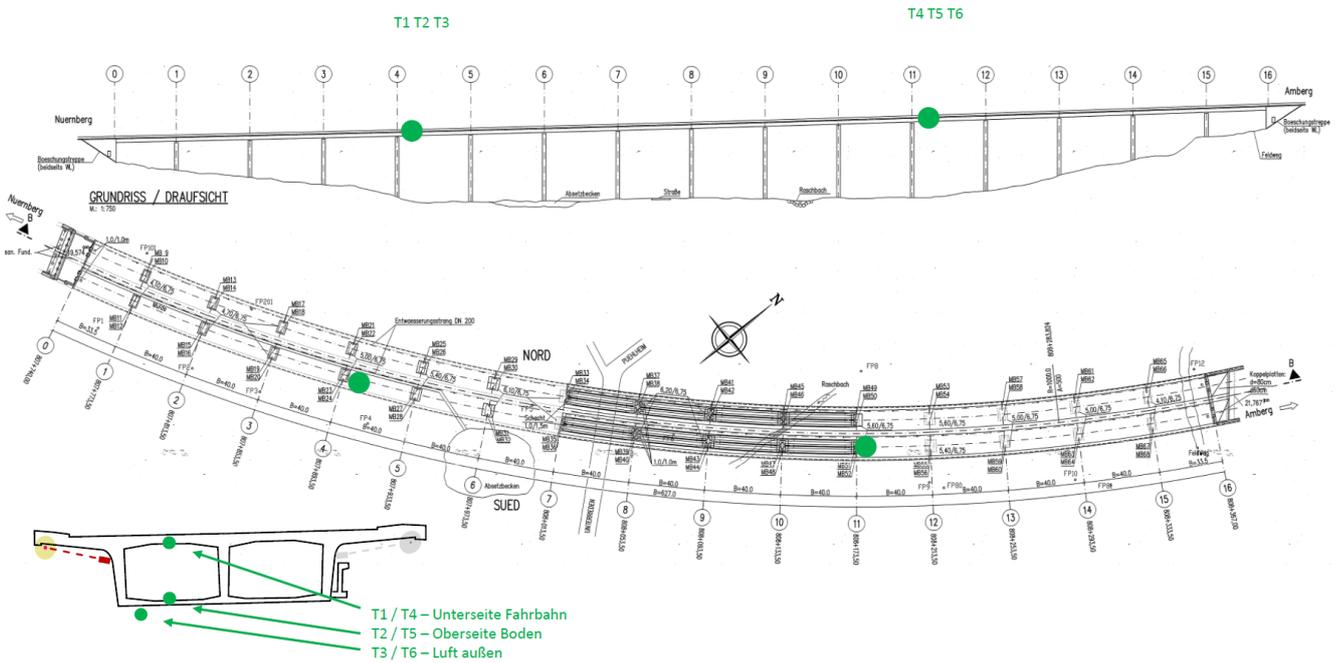


Bild 2: Anordnung der Temperaturmessstellen, Quelle: Lucks Technologies GmbH



Bild 3: Lasermesssystem für dynamische Verformungsmessungen, Quelle: Lucks Technologies GmbH

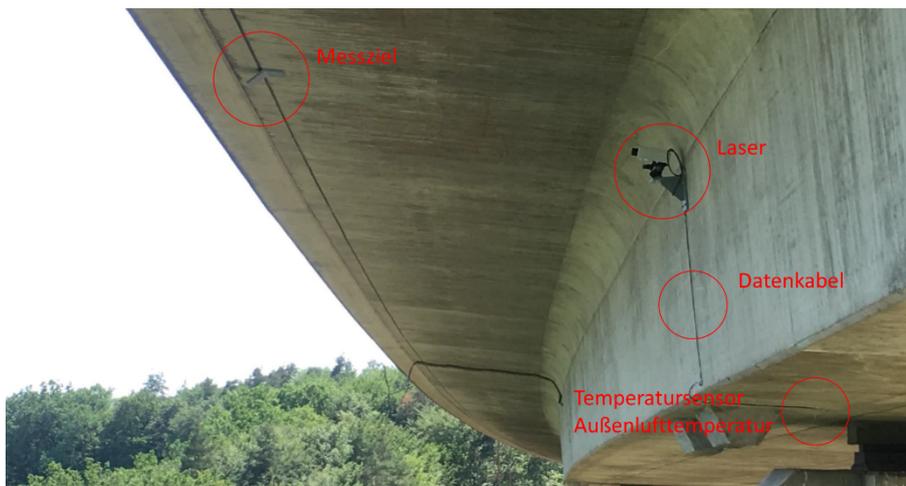


Bild 4: Anordnung der Messstrecken, Quelle: Lucks Technologies GmbH



Bild 5: Temperatursensoren an der Überbauunterkante (links) und Fahrbahnunterkante (rechts), Quelle: Lucks Technologies GmbH



Bild 6: Messzentrale und Batteriekästen, Quelle: Lucks Technologies GmbH

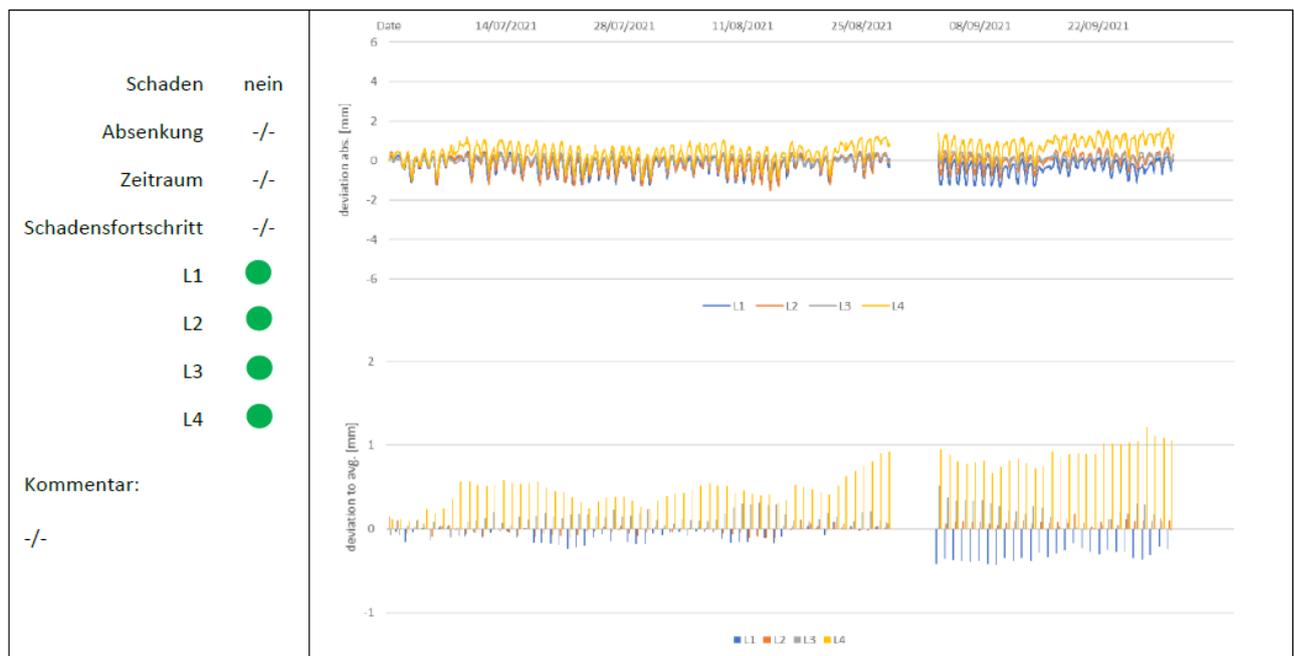


Bild 7: Exemplarischer Messwertgraph der Verformungsmessung: Null-Lagen an den Messpunkten als Stundenwerte (oben), Abweichung der einzelnen Messstrecke vom Normverhalten/Mittelwert (unten), Quelle: Lucks Technologies GmbH

Monitoring 5.7 **Temperaturkompensierte Dehnungsmessung zur Überwachung von Verformungszunahmen infolge Spannungsrissskorrosion**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	21,70 – 30,30 – 32,30 – 32,30 – 30,30	m
1.2 Zahl der Felder:	5	
1.3 Brückenfläche:	1763	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	38	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1970	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	-
2.4 System der Lagerung:	Rollenlager ohne besondere Kippvorrichtung, Linienkipplager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Pfeiler/Stütze, massiv
2.6 Widerlager:	Massivwand
2.7 Gründung:	Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B450
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B300

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Aufgrund des Eindringens von Wasser in vereinzelte Spannkanäle im Bauzustand ist mit einer Korrosionsschädigung an Teilen des verbauten Spannstahl zu rechnen.

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Integraler Dehnungsmesstreifen
 - Messbereich Sensortechnik: ± 5 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: - %
 - Temperaturkompensation: Bauteiltemperaturmessung
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Messverstärker, Datenlogger, Industrie-PC, Schaltschrank
2. **Grund des Monitorings:** Überwachung eines möglichen Schädigungsfortschritts
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 10 Integrale Dehnungsmesstreifen
20 Temperatursensoren, PT100
4. **Messort am Bauwerk:** Feldmitte
5. **Installationsbereich:** Unterseite Unterzug
6. **Installationsart:** Geschraubt und geklebt
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 50.000,00 €
 - Planungskosten: *In Installationskosten enthalten* €
 - Installationskosten: 43.000,00 €
 - Betriebskosten: 7.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 5 Tage, 2016
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2016 bis ENB
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Regierungspräsidium
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Spezialdienstleister für Bauwerksmessung*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | | |
|---------------------------------------|--|--|----|
| 1. Ziel der Messung: | Feststellung von Verformungen infolge eines Spannstahlausfalls, Frühzeitige Detektion von Schadensfällen und Strukturveränderungen | | |
| 2. Messgrößen: | | | |
| - Wegmessung: | ± 5 | | mm |
| - Temperatur: | -50 bis +250 | | °C |
| 3. Abtaste: | | | |
| - Wegmessung: | 100 | | Hz |
| - Temperatur: | 10 | | Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | | | |
| - Wegmessung: | 100 | | Hz |
| - Temperatur: | 10 | | Hz |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Stündliche automatisierte Auswertung und Upload auf das Webportal | | |
| 5. Daten: | | | |
| - Wegmessung: | Momentanwert | | |
| - Temperatur: | Momentanwert | | |
| 6. Datenformat: | *.csv und *.xlsx | | |
| 7. Datenerfassung: | Datenlogger | | |
| 8. Datenübertragung: | Automatische Übertragung der Daten an eine externe Stelle über Funk oder Internet, Upload auf Webportal | | |
| 9. Datenmanagementsystem: | Interner Server und Webportal des Auftragnehmers | | |
| 10. Datenauswertung: | | | |
| - Prozess: | Globale und lokale Analyse des Dehnungstrends | | |
| - Ausgabe: | Grafische Ausgabe, Berichtsform | | |
| 11. Datenverwendung: | Bewertung des Bauteilzustands hinsichtlich eines Schädigungsfortschritts | | |
| 12. Alarmierungsplan: | Vorhanden | | |
| - Grenzwert: | 0,06 mm Dehnungsdifferenz | | |
| - Alarmierungskette: | Spezialdienstleister für Bauwerksmessung | | |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Spezialdienstleister für Bauwerksmessung | | |

Beschreibung des Monitorings

Beim Bau der Brücke kam es zum Eindringen von Wasser in vereinzelte Spannkanäle. In Untersuchungen wurde gezeigt, dass mit einer Korrosionsschädigung der Spannglieder gerechnet werden muss. Im Rahmen einer Sonderprüfung wird das Tragwerk zur Überprüfung eines Schädigungsfortschritts durch eine Dauerüberwachung der Betondehnung mit Dehnungsmesstreifen und der Bauteiltemperatur mit Widerstandstemperaturfühlern permanent überwacht. In den äußeren Feldern und im Mittelfeld wurden je Unterzug ein integraler Dehnungsmesstreifen an der Unterkante in Feldmitte installiert (Bild 1). Die Widerstandsthermometer wurde nahe der Dehnungsmesstreifen im

unteren und oberen Bereich der Unterzüge in Feldmitte angebracht (Bild 2). Die Aufzeichnung der Bauteiltemperatur ermöglicht die Abschätzung temperaturbedingter reversibler Verformungen. Verbleibende temperaturunabhängige Verformungen sind ein Anzeichen für Veränderungen innerhalb der Bauwerksstruktur. Die Temperaturkompensation der Dehnungsmessung erfolgt über die Korrelation der thermisch bedingten Dehnungsänderung zur Bauteiltemperatur und Abzug thermischer Dehnung von der Gesamtdéhnung

Folgerung

In der bisherigen Messperiode konnten im Bereich der Messstellen keine signifikanten Veränderungen der Bauteilverformungen festgestellt werden, die auf eine Zustandsveränderung hindeuten. Die Messergebnisse der Betondehnung verlaufen im Wesentlichen parallel zur Bauteiltemperatur (Bild 3), was auf ein plausibles Bauteilverhalten hindeutet. Bei einer korrosionsbedingten Schädigung der Spannglieder mit einhergehendem Bruch wird von einer Verformungszunahme oberhalb des

Grenzwertes von etwa 0,06 mm ausgegangen. Die Verformungszunahme wird im Detail zwischen benachbarten Dehnungsmessungen verglichen (Bild 4). Im bisherigen Zeitraum lag die Dehnungsdifferenz unterhalb des Grenzwertes, weshalb von einem intakten Bauwerksverhalten ausgegangen werden kann (Bild 5).

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Installation und Schutzabdeckung der Sensorik an der Trägerunterkante in Feldmitte,
Quelle: LGA Landesgewerbeanstalt Bayern

Bild 2: Installation des Bauteiltemperaturfühlers an der Trägerunterkante, Quelle: LGA
Landesgewerbeanstalt Bayern

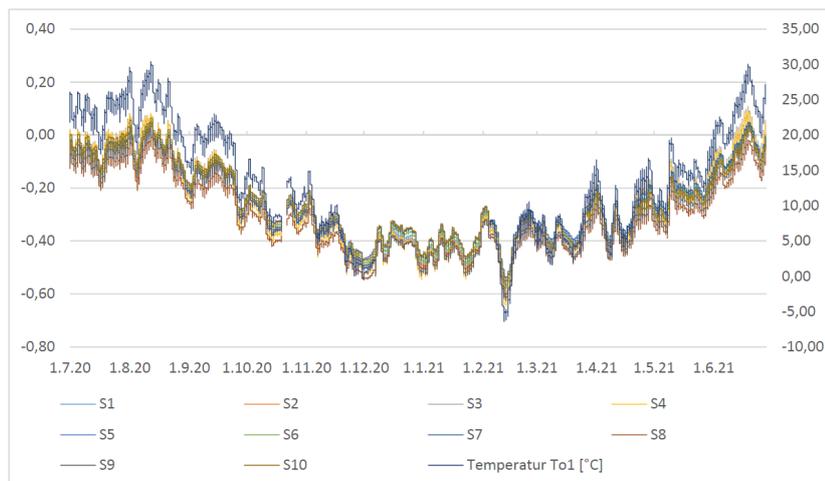


Bild 3: Exemplarische Gegenüberstellung der Betondehnung und Bauteiltemperatur zur globalen Analyse des Bauteilverhaltens,
Quelle: LGA Landesgewerbeanstalt Bayern

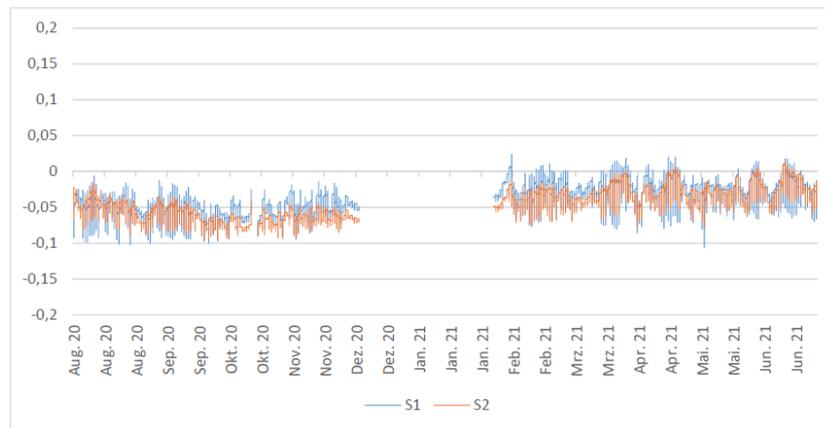


Bild 4: Exemplarischer Messwertgraph der temperaturkompensierten Betondehnung benachbarter Dehnungsmessungen, Quelle: LGA Landesgewerbeanstalt Bayern

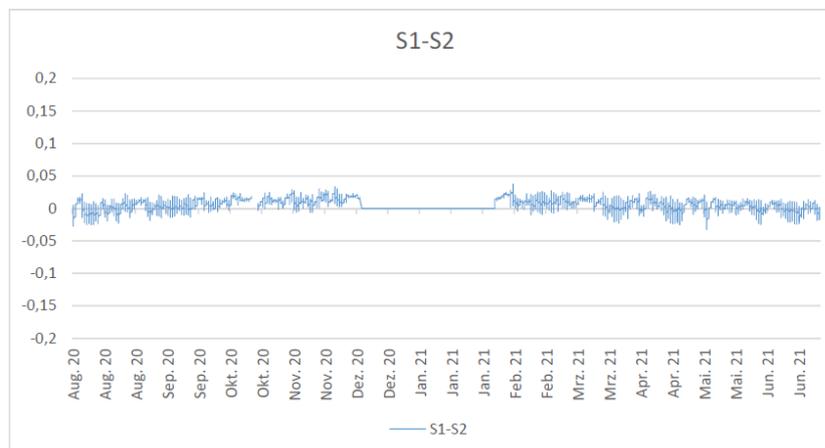


Bild 5: Exemplarischer Messwertgraph der temperaturkompensierten Dehnungsdifferenz benachbarter Dehnungsmessungen zur lokalen Verformungsanalyse, Quelle: LGA Landesgewerbeanstalt Bayern

Monitoringmaßnahme:	6. Messung von Verschiebungen	Lfd. Nr.:	6.1	Blatt:	1
---------------------	-------------------------------	-----------	-----	--------	---

6. Messung von Verschiebungen

Monitoring 6.1 **Überwachung der Verschiebungen der Endverankerungsblöcke der externen Vorspannung mit Wegaufnehmern**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	40,60 – 50,00 – 50,00 – 50,00 – 50,00 – m	
	40,60	
1.2 Zahl der Felder:	6	
1.3 Brückenfläche:	4651	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60/30 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1970	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken / Trägerrost (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Punktkipplager, Topflager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rundstützen
2.6 Widerlager:	Widerlager mit Flügelwand
2.7 Gründung:	Tiefgründung (Bohrpfähle)
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtet

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton
3.3 Widerlager:	Stahlbeton

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Verstärkung mit einer externen Vorspannung aufgrund rechnerischer Defizite
- Schadensfall eines herabfallenden Endverankerungsblocks an einer Brücke mit ähnlichem Verstärkungssystem

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Induktive Wegaufnehmer mit freiem Kern
 - Messbereich Sensortechnik: ± 5 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,1 %
 - Temperaturkompensation: Messung der Bauteiltemperatur und Lufttemperatur nahe Widerlager, PT100
 - Gesamttechnischer Umfang: Wegaufnehmer inkl. Messverstärker, Messzentrale mit Industrie-PC, Temperaturfühler PT100, Kamera
2. **Grund des Monitorings:** Überwachung der Endverankerungsblöcke nach Schadensfall
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 16 Wegaufnehmer
4 Temperatursensoren
4. **Messort am Bauwerk:** Endverankerungsblöcke der externen Vorspannung
5. **Installationsbereich:** Seitlich der Kontaktfuge
6. **Installationsart:** Geklebt, Methylmetacrylat
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 71.000,00 €
 - Planungskosten: 6.000,00 €
 - Installationskosten: 65.000,00 €
 - Betriebskosten: 9.500,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *in Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 10 Tage, Dezember 2011
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2011 laufend bis ENB
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner (Ingenieurbüro, Tragwerksplaner*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Ingenieurbüro für Messtechnik**)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (**)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Messtechnische Überwachung horizontaler Verschiebungen der Endverankerungsblöcke |
| 2. Messgrößen: | |
| - Wegmessung: | ± 5 mm |
| - Temperaturmessung: | -60 bis +250 °C |
| 3. Abtaste: | |
| - Wegmessung: | 100 Hz |
| - Temperaturmessung: | 0,1 Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Wegmessung: | 10 sec |
| - Temperaturmessung: | 10 sec |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | 24 h |
| 6. Daten: | |
| - Wegmessung: | Momentanwert (10 sec) |
| - Temperaturmessung: | Momentanwert (10 sec) |
| 7. Datenformat: | .*xls |
| 8. Datenerfassung: | Speicherung vor Ort |
| 9. Datenübertragung: | Automatischer Mailversand über Mobilfunk |
| 10. Datenmanagementsystem: | Excel |
| 11. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Manuell, makrobasiert in Excel |
| - Ausgabe: | Graphisch und tabellarisch, Quartalsberichte |
| 12. Datenverwendung: | Kontrolle und frühzeitige Detektion von Änderungen des Bauwerkverhaltens, Warnsystem |
| 13. Alarmierungsplan: | Vorhanden |
| - Grenzwert: | Dynamische Grenzwertbetrachtung, plötzliches Auftreten von Verschiebungen |
| - Alarmierungskette: | Fachplaner plausibilisiert Alarm, informiert im Alarmfall Ansprechpartner Straßenbauverwaltung |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Fachplaner, Straßenbauverwaltung |

Beschreibung des Monitorings

Die Brücke wurde aufgrund rechnerischer Defizite mit einer externen Vorspannung verstärkt. In Folge eines Schadensfalls eines herabfallenden Endverankerungsblocks an einer Brücke mit ähnlichem Verstärkungssystem wurde die Vorspannkraft der externen Spannglieder vorbeugend auf 75% reduziert. Untersuchungen ergaben Defizite in Bezug auf den Anpressdruck der nachträglich ergänzten Konsolen auf die vorhandenen Stege zur sicheren Lasteinleitung der zusätzlichen externen Längsvorspannung. Um das Tragverhalten der Verankerungskonstruktion beim Wiederaufbringen der externen Vorspannkraft und das anschließende Langzeitverhalten zu beobachten, wurde beschlossen, die Endverankerungsblöcke kontinuierlich messtechnisch zu überwachen.

Das Tragwerkverhalten wird an jedem der Verankerungsblöcke mit je 4 Wegaufnehmern überwacht (Bild 1). Die Messwerte werden mit einer Abtastrate von 10 Sekunden aufgezeichnet. Für die Auswertung des Langzeitverhaltens werden hieraus die stündlichen Mittelwerte gebildet. Parallel werden die Lufttemperatur sowie die Bauteiltemperatur gemessen und aufgezeichnet. Bei der Überschreitung definierter Grenzwerte oder Änderungsgeschwindigkeiten wird ein Alarm ausgelöst, der es

ermöglicht, die Ursache der Verformung oder Dehnungszunahme zu identifizieren und ggf. sofortige Maßnahmen zu ergreifen. Die Wegaufnehmer sind auf beiden parallel verlaufenden Teilbauwerken an den Widerlagern installiert. Ihre Anordnung erfolgt an der Kontaktfuge zwischen den Endverankerungsblöcken und den Stegen des Bestandsbauwerks (Bild 2). Je Endverankerungsblock messen zwei Wegaufnehmer die Verschiebungen an der Fuge des Ankerblocks in Brückenlängsrichtung und zwei Wegaufnehmer die Verschiebungen in Brückenquerrichtung. Damit kann der Lastabtrag in der Kontaktfuge überwacht werden.

Die Daten aus den einzelnen Messstellen werden zentral gesammelt und zusammen mit den Temperaturwerten übermittelt und gespeichert. In Quartalsberichten wird die Ergebnisauswertung mit Messwertgraphen von dem Fachplaner an die Straßenbauverwaltung übermittelt (Bilder 3 und 4). Bei Überschreitung der Grenzwerte oder plötzlich zunehmenden Verschiebungen wird entsprechend der Angaben des Alarmierungsplans vorgegangen.

Folgerung

Mit Hilfe der durchgeführten Messungen an der Talbrücke wird kontinuierlich überprüft, wie der Lastabtrag in der Kontaktfuge zwischen der Endverankerung der externen Spannglieder und dem Bestandsbauwerk funktioniert. Es werden die Verschiebungen des Endverankerungsblocks in Brückenlängsrichtung, sowie die Rissbreite in der Kontaktfuge zwischen Verankerungsblock und Bestandsüberbau gemessen. Aktuell befinden sich die gemessenen Verschiebungen im Erwartungsbereich sodass keine weiteren Maßnahmen ergriffen werden müssen.

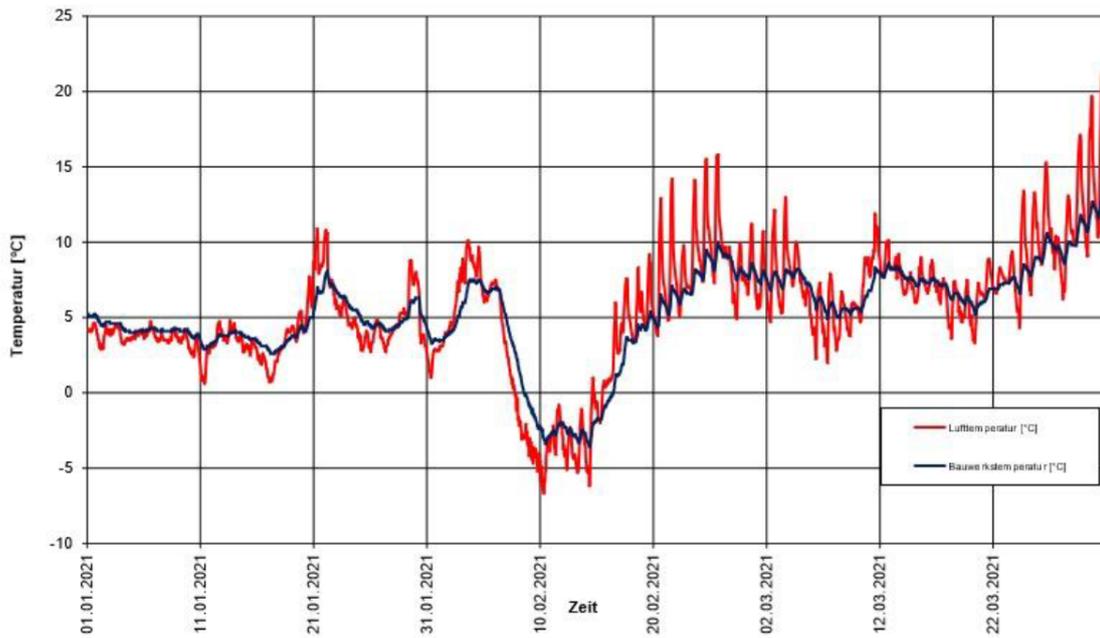


Bild 3: Gemessene Temperaturen im betrachteten Zeitraum,
Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

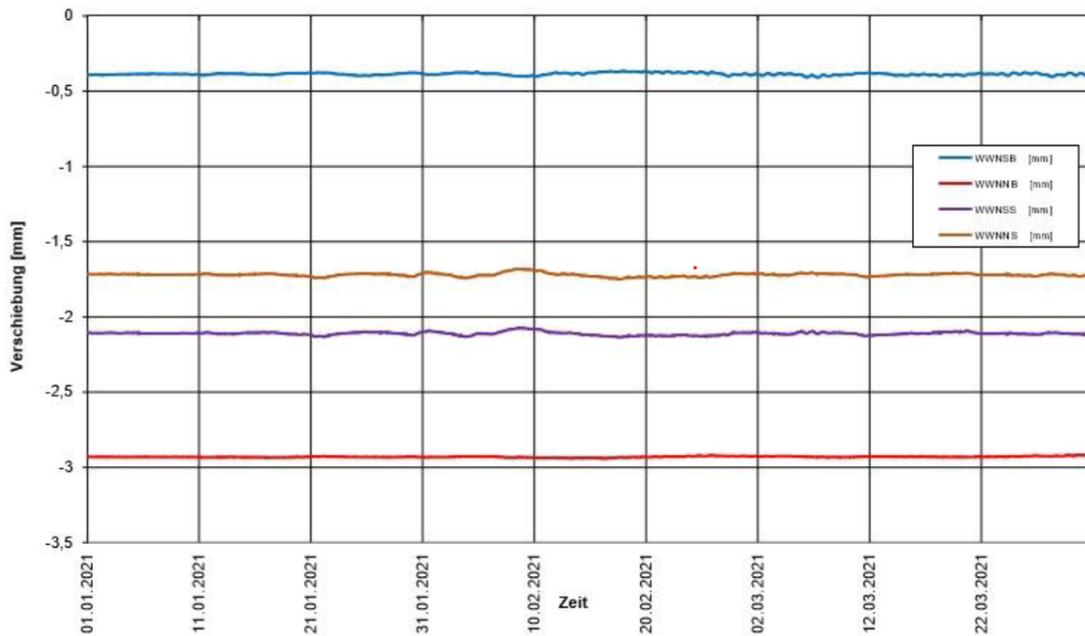


Bild 4: Gemessene Verschiebungen am westlichen Widerlager des nördlichen Überbaus,
Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

Monitoringmaßnahme:	6. Messung von Verschiebungen	Lfd. Nr.:	6.2	Blatt:	1
---------------------	-------------------------------	-----------	-----	--------	---

Monitoring 6.2 **Überwachung der Verschiebungen der Endverankerungsblöcke der externen Vorspannung mit Wegaufnehmern**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	61,80 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,70 – 47,64 – 48,07 – 48,30 – 48,54 – 32,38 – 74,19 – 53,10 – 43,91 – 55,14	m
1.2 Zahl der Felder:	20	
1.3 Brückenfläche:	15444	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60/30 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1968	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken / Trägerrost (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Widerlager: querfest, Pfeiler: schwimmend
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rundstütze
2.6 Widerlager:	Widerlager mit Flügelwand
2.7 Gründung:	Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: C35/45
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: C20/25
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: C35/45

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Verstärkung mit einer externen Vorspannung aufgrund rechnerischer Defizite
- Schadensfall eines herabfallenden Endverankerungsblocks am hier behandelten Bauwerk

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Induktive Wegaufnehmer mit freiem Kern
 - Messbereich Sensortechnik: ± 10 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,1 %
 - Temperaturkompensation: Außenlufttemperaturmessung, PT100
 - Gesamttechnischer Umfang: Wegaufnehmer inkl. Messverstärker, Messzentrale mit Industrie-PC, Temperaturfühler PT100, Kamera
2. **Grund des Monitorings:** Überwachung der Endverankerungsblöcke nach Schadensfall
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 30 Wegaufnehmer, 1 Temperaturfühler, 2 Kameras (1 je Fahrtrichtung)
4. **Messort am Bauwerk:** Endverankerungsblöcke der externen Vorspannung
5. **Installationsbereich:** Seitlich der Schubfuge
6. **Installationsart:** Geklebt, Methylmethacrylat
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:** *Gesamtkosten der in Monitoring 6.2 und Monitoring 11.1 beschriebenen Maßnahmen.*
 - Gesamtkosten: 92.000,00 €
 - Planungskosten: 6.000,00 €
 - Installationskosten: 86.000,00 €
 - Betriebskosten: 9.500,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 20 Tage, Dezember 2011
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2011 bis ENB
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner (Ingenieurbüro, Tragwerksplaner*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Ingenieurbüro für Messtechnik**)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | |
|-----|------------------------------------|---|
| 1. | Ziel der Messung: | Messtechnische Überwachung horizontaler Verschiebungen der Endverankerungsblöcke |
| 2. | Messgrößen: | |
| | - Wegmessung: | ± 5 mm mm |
| | - Temperaturmessung: | -20 bis +250 °C |
| 3. | Abtaste: | |
| | - Wegmessung: | 100 Hz |
| | - Temperaturmessung: | 0,1 Hz |
| 4. | Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| | - Wegmessung: | 10 sec |
| | - Temperaturmessung: | 10 sec |
| 5. | Frequenz Datenauswertung: | 24 h |
| 6. | Daten: | |
| | - Wegmessung: | Momentanwert |
| | - Temperaturmessung: | Momentanwert |
| 7. | Datenformat: | *.xls |
| 8. | Datenerfassung: | Speicherung vor Ort |
| 9. | Datenübertragung: | Automatischer Mailversand über Mobilfunk |
| 10. | Datenmanagementsystem: | Excel |
| 11. | Datenauswertung: | |
| | - Prozess: | Manuell, makrobasiert in Excel |
| | - Ausgabe: | Grafische und tabellarisch |
| 12. | Datenverwendung: | Kontrolle und frühzeitige Detektion von Änderungen des Bauwerkverhaltens, Warnsystem
Vorhanden |
| 13. | Alarmierungsplan: | |
| | - Grenzwert: | Dynamische Grenzwertbetrachtung, plötzliches Auftreten von Verschiebungen |
| | - Alarmierungskette: | Fachplaner plausibilisiert Alarm, informiert im Alarmfall Ansprechpartner Straßenbauverwaltung |
| | - Zuständigkeit im Alarmfall: | Fachplaner → Straßenbauverwaltung |

Beschreibung des Monitorings

Die Talbrücke (Bild 1) wurde mit einer externen Vorspannung verstärkt. Nach dem Schadensfall eines herabfallenden Endverankerungsblocks wurden die Ortbetonkonsolen mit Wegaufnehmern zur frühzeitigen Erkennung von Verschiebungen (Monitoring 6.2) und Dehnmesstreifen an den Querspannstäben (Monitoring 11.1) zur kontinuierlichen Überwachung der Stahlspannung ausgestattet.

An der Rückseite der Ankerblöcke wurden Wegaufnehmer in Längs- und Querrichtung der Brücke angebracht (Bild 2 und 3). Die Messung der Verschiebungen in Brückenquerrichtung ermöglicht die Detektion eines ggf. entstehenden Risses in der Kontaktfuge zwischen Alt- und Neubeton. Durch die Wegaufnehmer, die in Brückenlängsrichtung ausgerichtet sind, kann eine Verschiebung des Endverankerungsblocks entlang der Brückenachse detektiert werden. Teilweise wurden die Blöcke auch an der Vorderseite mit Wegaufnehmern bestückt, um Stauchung und Starrkörperverschiebung des Ankerblocks unterscheiden zu können.

Parallel zu den Messungen der Wegaufnehmer wird kontinuierlich die Luft- und Bauwerkstemperatur aufgezeichnet, um bei der Analyse der Messergebnisse Temperatureffekte herausfiltern zu können. Zusätzlich wird die Temperatur im Schaltschrank gemessen, um die Klimatisierung der Messeinrichtung zu kontrollieren.

Das Ziel dieses Monitorings ist die kontinuierliche Überwachung der Endverankerungsblöcke und eine automatische Alarmierung bei Auffälligkeiten der Messwerte. Für jeden Messkanal wurde ein statischer und dynamischer Warngrenzwert definiert. Bei Überschreiten der jeweiligen Ober- und Untergrenzen der Warnwerte bzw. einer festgelegten Differenz aufeinander folgender Werte wird eine automatische Warnung über das Mobilfunknetz versendet. Die Analyse und Plausibilisierung der Messungen und Entscheidung, ob Handlungsbedarf durch bspw. eine Begutachtung vor Ort besteht, erfolgt durch den Fachplaner Monitoring bzw. das zuständige Ingenieurbüro.

Folgerung

Mit dem Monitoring konnten Veränderungen in der Bauphase detektiert werden. Bei dem hinteren Wegaufnehmer kann eine positive Verschiebung beobachtet werden. Zeitgleich tritt an dem vorderen Wegaufnehmer eine annähernd gleich große Verschiebung mit entgegengesetztem Vorzeichen auf (Bild 4). Daraus lässt sich folgern, dass sich der gesamte Endverankerungsblock um etwa 0,1 mm in Brückenlängsrichtung zur Brückenmitte hin verformt hat. Der in Querrichtung montierte Wegaufnehmer zeigt ebenfalls eine positive Verformung von ca. 0,1 mm. Dies deutet darauf hin, dass sich in der Kontaktfuge zwischen dem Ankerblock und dem Bestandsbauwerk ein Riss mit dieser Rissweite öffnet. Dies war auch zu erwarten, da sich die Quervorspannung am hinteren Ende des Ankerblocks durch die Lastausbreitung noch nicht

gleichmäßig verteilt hat. Das Monitoring liefert insgesamt wichtige Erkenntnisse zur Überwachung und den Besonderheiten bzw. Unbekannten bei der nachträglichen Endverankerung von externen Spanngliedern an Bestandsbrücken mittels nachträglich angebrachter Verankerungsblöcke.

Vertiefende Informationen können dem folgenden Beitrag entnommen werden:

Boros, V., Novák, B., Pelke, E. and Koster, G. (2016), Messtechnische Überwachung extern vorgespannter Betonbrücken. Bautechnik, 93: 725-729. <https://doi.org/10.1002/bate.201600066>

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Unteransicht Bauwerk, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

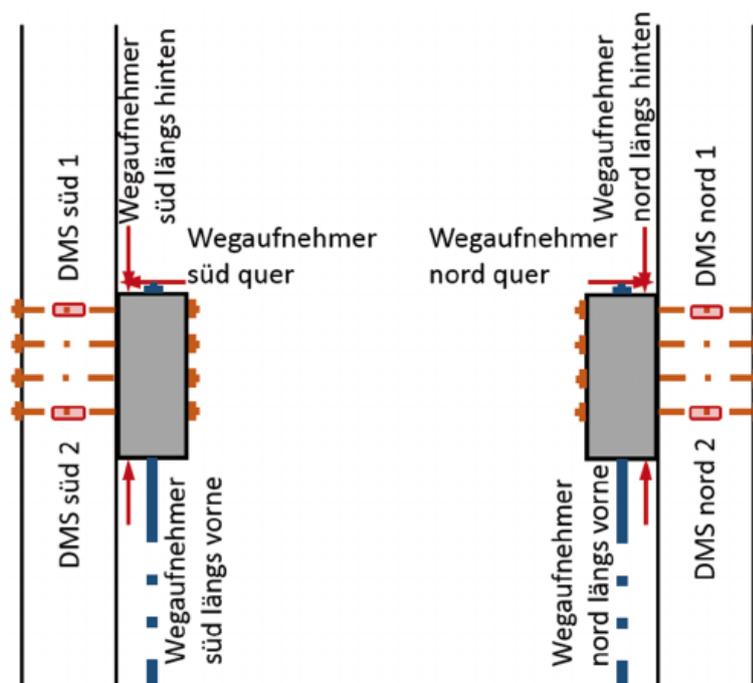


Bild 2: Installationsskizze Draufsicht, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH



Bild 3: Klebung Wegaufnehmer zur Kontrolle horizontaler Verschiebungen, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

Dauerüberwachung Talbrücke Sechshelden

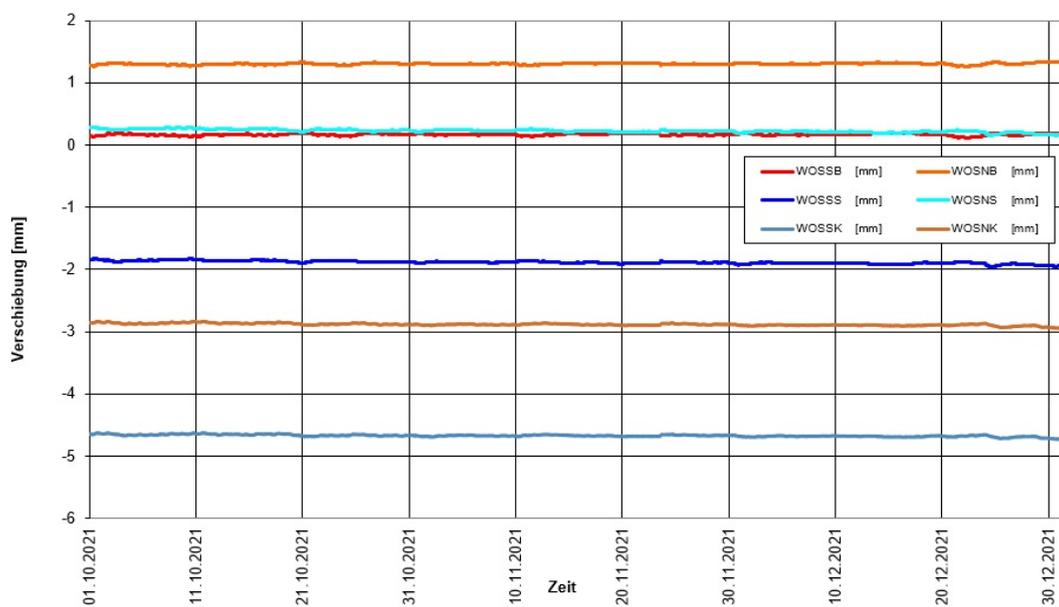


Bild 4: Exemplarischer Messwertgraph der Verschiebung der Endverankerungsblöcke, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

Monitoringmaßnahme:	6. Messung von Verschiebungen	Lfd. Nr.:	6.3	Blatt:	1
---------------------	-------------------------------	-----------	-----	--------	---

Monitoring 6.3 **Überwachung der vertikalen Verschiebungen an den Federelementen einer Notunterstützung mit Wegaufnehmern**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	46,00 – 60,00 – 69,00 – 69,00 – 60,00	m
1.2 Zahl der Felder:	5	
1.3 Brückenfläche:	4332	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1963	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken / Trägerrost (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Verformungslager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Hohlquerschnitt
2.6 Widerlager:	Widerlagerwand
2.7 Gründung:	Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450 (C30/37)
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B300 (C20/25)
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B300 (C20/25)

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- rechnerische Querkrafttragfähigkeitsdefizite, Verstärkungsmaßnahme durch Schublaschen
- Spannungsrisskorrosion gefährdeter Spannstahl
- Notunterstützung, da nicht alle Defizite durch Verstärkungsmaßnahmen behoben werden konnten

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Induktive Wegaufnehmer mit freiem Kern
 - Messbereich Sensortechnik: ± 5 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,1 %
 - Temperaturkompensation: Lufttemperaturmessung, PT100
 - Gesamttechnischer Umfang: Wegaufnehmer inkl. Messverstärker, Messzentrale mit Industrie-PC, Temperaturfühler, Kamera
2. **Grund des Monitorings:** Überwachung der Verformungen der Federelemente der Notunterstützungstürme
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 20 Wegaufnehmer, 6 Oberflächentemperaturfühler (Stahlkonstruktion), 4 Temperatursensor (Betonpfeiler), 1 Temperatursensor (Außenluft Pfeilerkopf), 1 Bauteiltemperatursensor (Überbau), 1 Kamera
4. **Messort am Bauwerk:** Türme Notunterstützung
5. **Installationsbereich:** Federelemente
6. **Installationsart:** geklebt
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 90.500,00 €
 - Planungskosten: 18.000,00 €
 - Installationskosten: 72.500,00 €
 - Betriebskosten: 15.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *in Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 14 Tage, Herbst 2018
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, 2018 bis 2021
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Tragwerksplaner, Prüflingenieur*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Ingenieurbüro für Messtechnik**)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (**)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

1. **Ziel der Messung:** Messtechnische Überwachung vertikaler Verschiebungen der Notunterstützung
2. **Messgrößen:**
 - Wegmessung: ± 5 mm mm
 - Temperaturmessung: - 60 bis +250 °C
3. **Abtastrate:**
 - Wegmessung: 100 Hz
 - Temperaturmessung: 0,1 Hz
4. **Frequenz Datenaufzeichnung:**
 - Wegmessung: 10 sec
 - Temperaturmessung: 10 sec
5. **Frequenz Datenauswertung:** 24 h
6. **Daten:**
 - Wegmessung: Minimal-, Maximal-, Mittelwert
 - Temperaturmessung: Momentanwert
7. **Datenformat:** *.xls
8. **Datenerfassung:** Speicherung vor Ort
9. **Datenübertragung:** Automatischer E-Mail Versand über Mobilfunk
10. **Datenmanagementsystem:** Excel
11. **Datenauswertung:**
 - Prozess: Manuell, makrobasiert in Excel
 - Ausgabe: Grafische und tabellarisch
12. **Datenverwendung:** Kontrolle und frühzeitige Detektion von Änderungen des Bauwerkverhaltens, Warnsystem Vorhanden
13. **Alarmierungsplan:**
 - Grenzwert: Warnwert: 1,5 mm
Alarmwert: 2,5 mm
 - Alarmierungskette: Fachplaner plausibilisiert Alarm, informiert im Alarmfall Ansprechpartner Straßenbauverwaltung
 - Zuständigkeit im Alarmfall: Fachplaner, Straßenbauverwaltung

Beschreibung des Monitorings

Das Bestandsbauwerk weist zum Teil erhebliche Defizite hinsichtlich der geforderten Tragfähigkeit und der verbauten Materialien auf (spannungs-risskorrosionsgefährdeter Spannstahl, geringe verbaute Bügelbewehrungsgrade). Diese Defizite führten zu einer mehrfachen Verstärkung der Überbauten. Um im Zuge des Ersatzneubaus die Verlegung des Verkehrs auf ein Teilbauwerk zu ermöglichen, erfolgte zusätzlich die Installation einer externen Unterstützungsstruktur aus Stahl an einem der zwei Teilbauwerke (Bilder 1 und 2). Die externe Unterstützungsstruktur wurde mit einer definierten Kraft an den bestehenden Überbau angepresst und im Bereich der Pfeilerfußpunkte auf Federelementen gelagert.

Zur Kontrolle der vorhandenen Anpresskräfte und des allgemeinen Bauwerkszustands wurde je Federelement ein Wegaufnehmer installiert, der die Dehnung und Stauchung der Feder misst und auf-

zeichnet (Bilder 3 und 5). Um Temperatureffekte bei der Auswertung der Messergebnisse kompensieren zu können, wurden zusätzlich die Bauteiltemperatur des Betonüberbaus, die Bauteiltemperatur der Stahlkonstruktion und die Lufttemperatur kontinuierlich ermittelt.

Die Messdaten werden vor Ort gespeichert und täglich an den Spezialdienstleister für Bauwerksmessung und den Fachplaner des Monitorings übermittelt und ausgewertet. Für die Wegaufnehmer sind statische und dynamische Grenzwerte festgelegt. Wird einer der Grenzwerte an einer Messstelle überschritten, erhält der Fachplaner Monitoring eine automatische Warnung über das Mobilfunknetz und kann ggf. erforderliche Maßnahmen gemäß Alarmierungsplan ergreifen.

Folgerung

Während der Einsatzdauer des Monitorings befanden sich die gemessenen Verschiebungen der Wegaufnehmer innerhalb der festgelegten Grenzwerte und es konnte keine Verschlechterung des Bauwerkszustands festgestellt werden (Bild 4). Die Nutzung des Teilbauwerks konnte durch die messtechnische Überwachung über das Ende der rechnerischen Restnutzungsdauer hinaus verlängert werden und die Verlegung des Verkehrs für den Ersatzneubau des anderen Teilbauwerks erfolgen.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Ansicht Bauwerk, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

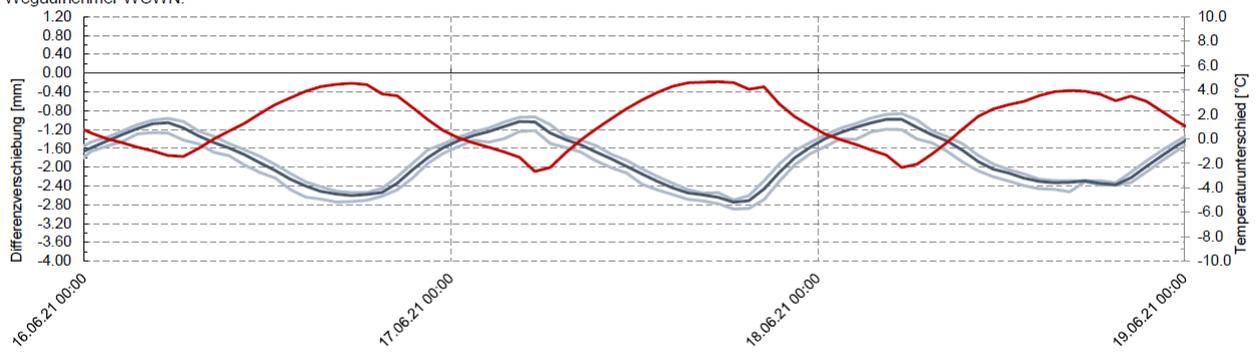


Bild 2: Ansicht der Notunterstützung, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH



Bild 3: Klebung Wegaufnehmer zur Kontrolle vertikaler Verschiebungen der Federelemente, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

Wegaufnehmer WCWN:



Wegaufnehmer WCWS:

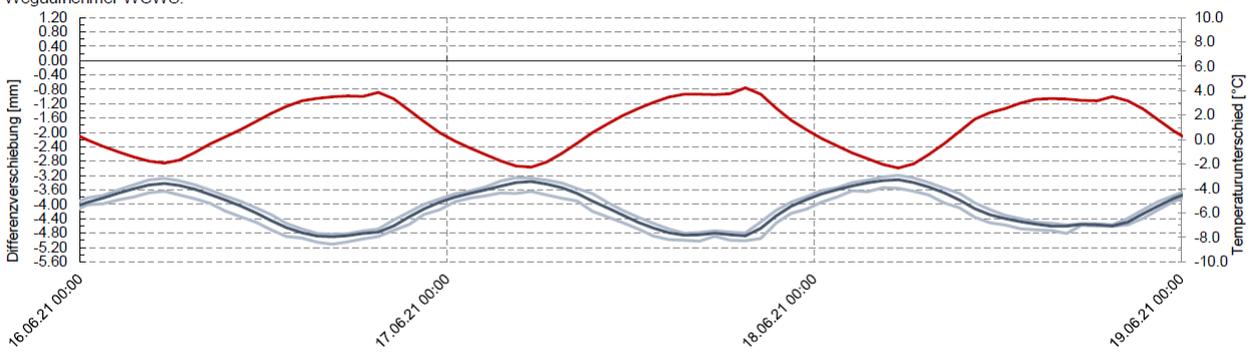


Bild 4: Exemplarische Auswertung der Verschiebungen ohne Kompensation der unterschiedlichen Bauteiltemperaturen, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

Verkabelung und Positionierung der Messtechnik

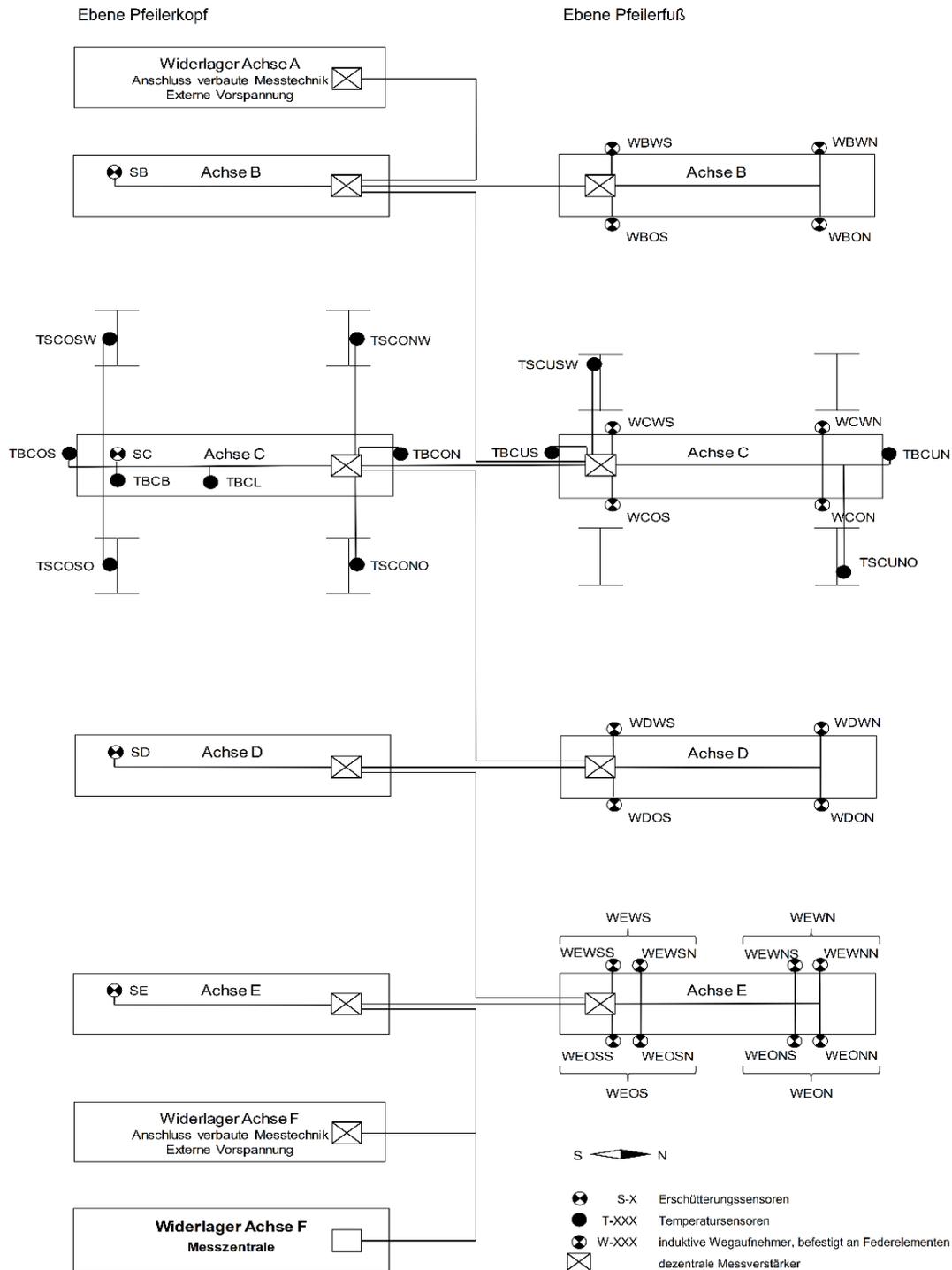


Bild 5: Messsystemarchitektur, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

7. Messung von Neigungsänderungen

Monitoring 7.1 Neigungsmessung zur Überwachung von Änderungen im Tragverhalten

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	77,00 – 110,00 – 77,00	m
1.2 Zahl der Felder:	3	
1.3 Brückenfläche:	3604	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1979	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Stahl/Leichtmetall
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Echte Platte quer biegesteif, Flächentragwerk
2.4 System der Lagerung:	Festpunkt Pfeiler C (nördlicher Mittelpfeiler); alle Lager querfest
2.5 Pfeiler / Stützen:	Flusspfeiler, im Unterwasserbereich Senkkästen
2.6 Widerlager:	Widerlager mit Flügelwand, auf Unterwasserbeton im Spundwandkasten flach gegründet
2.7 Gründung:	Senkkastengründung, Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtet

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Stahl/Leichtmetall
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Schweißprofil
3.3 Widerlager:	Stahlbeton

4. Baugrund

Widerlager: Mittelsand, feinsandig
Pfeiler: ca. 12 m Mudde; 3 – 5 m Feinsand

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Orthotrope Fahrbahnplatte
- Stahllängsträger mit Terrassenbruchgefahr

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Neigungssensoren
 - Messbereich Sensortechnik: 1,4 °
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,0008 °
 - Temperaturkompensation: Temperaturkalibrierung der eingesetzten Sensoren im Labor, Außenlufttemperaturfühler
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Datenlogger/Messcontroller, dezentrale Messverstärker, Server
2. **Grund des Monitorings:** Unterstützung der Erhaltungsplanung, Dauerüberwachung zur rechtzeitigen Feststellung von erhöhten Beanspruchungen
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 8 Neigungssensoren
12 Dehnungsmessstreifen
12 Temperatursensoren
4. **Messort am Bauwerk:** beidseitig der Pfeiler
5. **Installationsbereich:** Hauptträger
6. **Installationsart:** geschraubt
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:** *Gesamtkosten der in Monitoring 7.1 und Monitoring 11.2 beschriebenen Maßnahmen*
 - Gesamtkosten: 235.818,50 €
 - Planungskosten: 28.339,85 €
 - Installationskosten: 151.128,38 €
 - Betriebskosten: 22.550,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In den Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** -
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, 2015 bis 2018 (ENB)
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro Fachgebiet Bauwerkserhaltung**)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Rechtzeitige Erkennung möglicher Überlastungen der Hauptträger |
| 2. Messgrößen: | |
| - Neigungsmessung: | 1,4 ° |
| - Temperaturmessung: | - 35 bis 105 °C |
| 3. Abtastrate: | |
| - Neigungsmessung: | > 10 Hz |
| - Temperaturmessung: | > 10 Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Neigungsmessung: | 10 Hz |
| - Temperaturmessung: | 10 Hz |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Periodisch und ereignisbezogen |
| 6. Daten: | |
| - Neigungsmessung: | Minimal-, Maximalwert |
| - Temperaturmessung: | Momentanwert |
| 7. Datenformat: | Binär, *csv |
| 8. Datenerfassung: | Gesicherte Speicherung der Messdaten vor Ort |
| 9. Datenübertragung: | Mobilfunk, Quartalsweise tabellarische Übersendung der Messdaten an den Auftraggeber |
| 10. Datenmanagementsystem: | Firmenspezifisch |
| 11. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Firmenspezifisch, MS Excel |
| - Ausgabe: | Grafische Darstellung, monatlicher Statusbericht, Grenzwertkontrolle mit Meldung per E-Mail oder SMS |
| 12. Datenverwendung: | Überwachung des Tragverhaltens und Beanspruchung, Alarmierung bei Grenzwertüberschreitung |
| 13. Alarmierungsplan: | Vorhanden |
| - Grenzwert: | 90% des zulässigen Gesamtwertes der rechnerischen Krümmung (GZG) |
| - Alarmierungskette: | 1. Verkehrsmanagementzentrale;
2. Autobahnmeisterei und zuständige Polizeidienststelle;
3. zuständige Abteilungsleiter/Dezernatsleiter |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Autobahnmeister und zuständige Abteilungsleiter/Dezernatsleiter |

Beschreibung des Monitorings

Die überwachte Brücke besteht aus zwei Teilbauwerken und wurde während des Monitoringzeitraums schrittweise durch einen Ersatzneubau ersetzt. Während des Neubaus erfolgte eine Umleitung des Verkehrs auf das östliche Teilbauwerk. An diesem Teilbauwerk haben sich die Pfeilerbereiche in der statischen Nachrechnung als die für die Tragfähigkeit kritischen Bereiche herausgestellt. Im Rahmen einer Verstärkung wurde die Terrassenbruchgefahr des Stahls über Anrisse im Stahl erkannt und die Anrisse ausgeschliffen. Als Kompensierung der Querschnittsschwächung wurden zur Sicherstellung der Tragsicherheit während der Restnutzungsdauer verkehrseinschränkende Maßnahmen getroffen und eine messtechnische Dauerüberwachung als Teil der Maßnahmenkette zur Aufrechterhaltung der Nutzung während des Baus des Ersatzneubaus geplant.

Um die Sicherheit des Teilbauwerks während der Restnutzungsdauer zu gewährleisten, wurden messtechnischen Untersuchungen zur sicheren Umsetzung der 2+0 Verkehrsführung geplant. Vor der Installation des Dauermonitorings erfolgte ein Belastungsversuch zur Verifizierung der in der Nachrechnung getroffenen Annahmen.

Die Dauerüberwachung während der Restnutzungsdauer verfolgt die folgenden Ziele:

1. Abschätzung der tatsächlichen Beanspruchung im Pfeilerbereich
2. Kontrolle möglicher Veränderungen des Tragzustands über die Überwachung lokaler Dehnungen (siehe Monitoring 11.2) und globaler Formänderungen wie Querschnittsverdrehung und Krümmung im Pfeilerbereich

Die Neigungssensoren wurden am Stegblech im oberen Bereich des Hauptträgers befestigt (Bild 1). Die Sensoren wurden an das Bauwerk geschraubt und so gesichert, dass Relativbewegungen zwischen Sensor und Bauwerk ausgeschlossen werden können. Die Ankopplung der Sensoren wurde so gewählt, dass zur Überprüfung der Messergebnisse die Messung der Absolutabweichung von der Horizontalen mittels eines Referenzsensors (temporär) erfolgen kann.

Für die Neigungssensoren wurde vor der Installation am Bauwerk in Kurzuntersuchungen der Temperaturfehler bestimmt. Die Temperaturkalibrierung während des Dauermonitorings erfolgt mittels eines an einem Pfeiler angebracht Außenlufttemperaturfühlers.

Folgerung

Über die verkehrseinschränkenden Maßnahmen und die messtechnische Dauerüberwachung konnte das Bauwerk für die Restnutzungsdauer bis zum Ersatzneubau und unter Umleitung des Verkehrs als 2+0 Regelung unter Verkehr gehalten werden. Während der messtechnischen Überwachung wurde keine kritische Veränderung des Tragverhaltens festgestellt.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

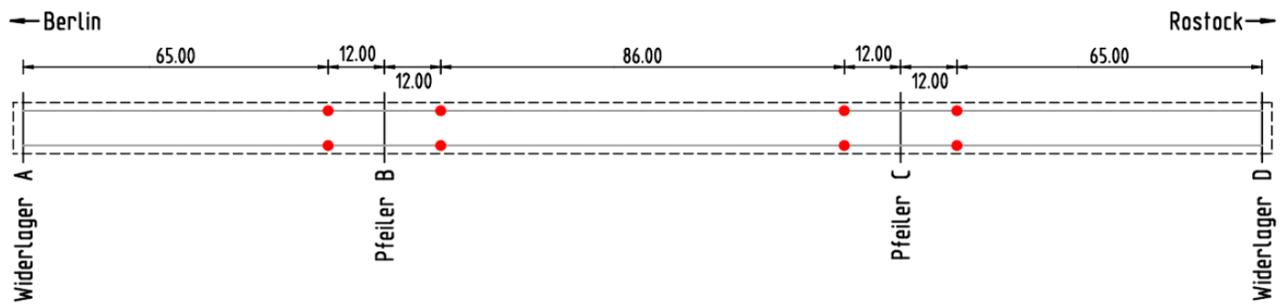


Bild 1: Anordnung der Neigungsmessstellen entlang der Bauteillängsachse, Quelle: KBauMV

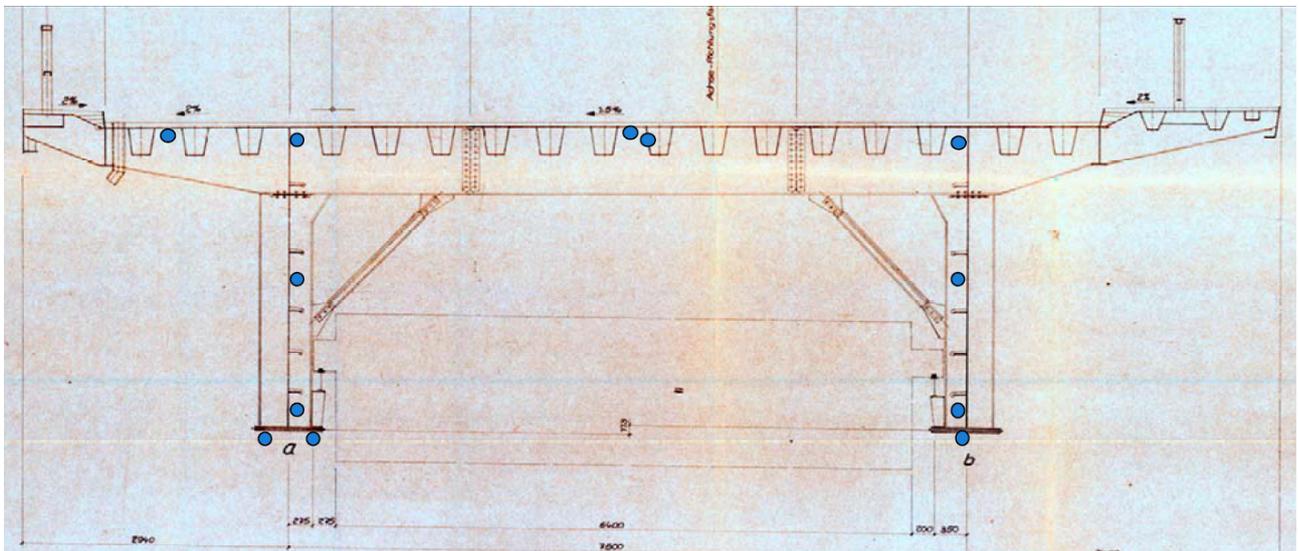


Bild 2: Anordnung der Temperaturmessstellen im Pfeilerquerschnitt, Quelle: KBauMV

Monitoring 7.2 Neigungsmessung zur Überwachung von Änderungen im Tragverhalten

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	15,70 – 31,40 – 15,70	m
1.2 Zahl der Felder:	3	
1.3 Brückenfläche:	785	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	30	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60/30 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1973	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Balkenartige und plattenartige Tragwerke, Rahmen
2.4 System der Lagerung:	Verformungslager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rechteckiger Vollquerschnitt
2.6 Widerlager:	Kastenwiderlager
2.7 Gründung:	Flachgründung, Gründung auf Winkelfuß
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtet, feuerverzinkt

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: C35/45, Spannstahl St 140/160 gemäß TGL 101-036, Bündelspannglieder BSG 25 und BSG 100
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: C35/45
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: C20/25

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Spannungskorrosionsgefährdeter Spannstahl St 140/160 gemäß TGL 101-036, Bündelspannglieder BSG 25 und BSG 100
- Fund von Anrissen am Spannglied in Materialuntersuchungen gibt Hinweis auf eine Spannungsrisskorrosion

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Neigungssensoren
 - Messbereich Sensortechnik: $\pm 1,4$ °
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,0008 °
 - Temperaturkompensation: PT100-Fühler Genauigkeitsklasse A nach DIN IEC 751
 - Gesamttechnischer Umfang: Neigungssensoren, Temperatursensoren, Dehnungssensor, Datenlogger/Messcontroller, dezentraler Messverstärker, Server
2. **Grund des Monitorings:** Überwachungsmaßnahme als Kompensation bei bekannten Defiziten, Zeitnahe Detektion möglicher Rissbildung infolge eines Spanngliedausfalls durch Sprödbruchversagen, Reduzierung der zusätzlich erforderlichen handnahen visuellen Prüfungen zur Sicherstellung der vorhandenen Tragfähigkeit auf eine jährliche Sonderprüfung
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 7 Neigungssensoren
1 Dehnungssensor
5 Temperatursensoren
4. **Messort am Bauwerk:** verteilt über die Längsachse des Bauwerks
5. **Installationsbereich:** Überbauunterkante
6. **Installationsart:** Offener Anbau an der Brückenunterseite mittels Schrauben und Dübel
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 162.200,00 €
 - Planungskosten: 6.420,00 €
 - Installationskosten: 51.200,00 €
 - Betriebskosten: 17.430,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** ca. 3 Werktage
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, 2014 bis ENB
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Dienstleister für Bauwerksdiagnostik und Bauforschung*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro**)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (**)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung, Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

1. **Ziel der Messung:** Erfassung des Schädigungsfortschritt durch Spannungsrissskorrosion über die Überwachung von Neigungsänderungen
2. **Messgrößen:**
 - Neigungsmessung: $\pm 1,4$ °
 - Temperaturmessung: - 35 bis 105 °C
 - Dehnungsmessung: ± 1 mm
3. **Abtaste:**
 - Neigungsmessung: 100 Hz
 - Temperaturmessung: 10 min
 - Dehnungsmessung: 100 Hz
4. **Frequenz Datenaufzeichnung:**
 - Neigungsmessung: 100 Hz
 - Temperaturmessung: 10 min
 - Dehnungsmessung: 100 Hz
5. **Frequenz Datenauswertung:** Monatlich, quartalsweise
6. **Daten:**
 - Neigungsmessung: Momentanwert
 - Temperaturmessung: Momentanwert
 - Dehnungsmessung: Minimal-, Maximal-, Momentanwert
7. **Datenformat:** Binär, *.csv
8. **Datenerfassung:** Elektronische Speicherung der Messdaten vor Ort
9. **Datenübertragung:** Datenfernübertragung über Mobilfunk
10. **Datenmanagementsystem:** Firmenspezifisch
11. **Datenauswertung:**
 - Prozess: Firmenspezifisch, MS Excel
 - Ausgabe: Grafisch, Vorlage von Berichten beim Auftraggeber
12. **Datenverwendung:** Überwachung des Tragverhaltens, Alarmierung bei Veränderungen
13. **Alarmierungsplan:**
 - Grenzwert: Grenzwertfestlegung auf Basis einer Lernphase
 - Alarmierungskette: Monitoring nicht als sicherheitsrelevantes Alarmierungssystem ausgelegt, da von einem ausreichenden Ankündigungsverhalten mit Handlungsspielraum ausgegangen wird
 - Zuständigkeit im Alarmfall: Straßenbauverwaltung

Beschreibung des Monitorings

Im Spannbetonüberbau (Bild 1) wurde ein als stark gefährdet eingestuft spannungskorrosionsgefährdeter Spannstahl St 140/160 gemäß TGL 101-036 und Bündelspannglieder BSG 25 und BSG 100 verbaut. An dem Bauwerk wurde in Untersuchungen ein mögliches Sprödebruchversagen des Spannstahls mit fortschreitendem Schädigungsprozess festgestellt. Nach aktuellem Stand der Technik kann die Schädigung nicht behoben werden, weshalb zur Sicherung der Restnutzungsdauer ein Monitoringsystem zur Überwachung einer möglichen Zustandsverschlechterung, angekündigt durch Rissbildung bei Spanngliedausfall, vorgesehen wurde. In der Nachrechnung konnte ein Vorankündungsverhalten des Tragwerks bei Versagen von einzelnen Spanndrähten als Folge der Spannungsrissskorrosion prognostiziert werden. Die frühe Feststellung einer Vorankündigung soll über das Dauermonitoring sichergestellt und Informationen zur Zustandsveränderung dem Bauwerksbetreiber rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden. Durch die Dauerüberwachung können zusätzliche in kurzen Abständen erforderliche Sonderprüfungen auf eine jährliche Sonderprüfung (zusätzlich zu den nach DIN 1076 erforderlichen Brückenprüfungen) reduziert werden.

Insgesamt wurde nur das Mittelfeld mit Sensoren bestückt, da die Endfelder für die Sichtprüfung zugänglich sind. Aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit des Bahnfeldes unterhalb der Brücke konnte bisher nur eine Messung globaler Verformungen und keine Messung der Verformung mit Fixpunkt (unverschieblichem Referenzpunkt) erfolgen. Eine reine Messung der globalen Durchbiegung liefert keine ausreichende Aussagekraft über die Wirkung lokaler Veränderungen. Aus diesem Grund wurden Neigungssensoren zur Messung der Verdrehung längs der Stabachse installiert (Bild 3). Über die Ermittlung des Differenzsignals benachbarter Sensoren können Strukturveränderungen über die Auswertung der mittleren Krümmungswerte auf bestimmte Abschnitte eingegrenzt werden. Dies ermöglicht die Detektion von Biegerissen und Steifigkeitsveränderungen infolge

Spanndrahtbruchs. Die Neigungssensoren decken insgesamt fünf Krümmungsbereiche ab, wobei zwei Neigungssensoren nahe des Stützbereichs der Mittelstützen in den Endfeldern und fünf Neigungssensoren im Mittelfeld installiert wurden. Hierüber können Krümmungsänderungen im Stütz- und Feldbereich des Mittelfeldes überprüft werden. Bei Inbetriebnahme wurden Kalibrierfahrten unternommen zur Lastkalibrierung der Dehnungsmessung und zur Ermittlung des Einflusses der Fahrzeugüberfahrtgeschwindigkeit auf die Messung der Neigungssensoren (Bild 4). Zur Minimierung der temperaturbedingten Messungenauigkeit wurde die Außenlufttemperatur erfasst. Der Einfluss der Temperatur auf die Messung der Neigungssensoren wurde vorab im Labor kalibriert. Zur Ermittlung der temperaturabhängigen Bauwerksverformungen wurde zudem die Bauteiltemperatur an der Überbauober- und Überbauunterkante sowie die Außenlufttemperatur gemessen. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der umgesetzten Verkehrsbeschränkungen wurde in Feld- und Querschnittsmitteln ein Dehnungssensor zur Erfassung der lokalen Überbaudehnung installiert.

Da auf Grundlage der Nachrechnung von einem ausreichenden Vorankündungsverhalten mit ausreichend zeitlichem Handlungsspielraum ausgegangen wird, wurde das Monitoringsystem nicht als sicherheitsrelevantes Alarmierungssystem ausgelegt. Dementsprechend wurden keine Alarmierungsfunktion und Messerfassungsbzw. Datenübermittlungsredundanz in der Ausführung und im Betrieb vorgesehen. Eine detaillierte Beschreibung der Überwachungsmaßnahme kann dem folgenden Beitrag entnommen werden (Bolle et al., 2017):

Bolle, G., Mertzsch, O. and Marx, S. (2017), Messtechnische Dauerüberwachung zur Absicherung der Restnutzungsdauer eines spannungsrissskorrosionsgefährdeten Brückenbauwerks. Beton- und Stahlbetonbau, 112: 75-84. <https://doi.org/10.1002/best.201600067>

Folgerung

In den ersten zwei Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage konnte die Entstehung eines Biegerisses unter Gebrauchslast über die Krümmungsveränderung detektiert und das hiermit eintretende Riss-vor-Bruch Kriterium bzw. das Vorankündigungsverhalten bestätigt werden. Zur Überwachung der Rissentwicklung wurde nachträglich ein Wegaufnehmer am detektierten Riss angebracht (Bild 2).

Durch das Dauermonitoring konnten die Abstände der Bauwerksprüfung, neben den nach DIN 1076 erforderlichen Bauwerksprüfungen, auf eine Sonderprüfung im Jahr für das Mittelfeld reduziert werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Bauwerksansicht, Quelle: Landesamt für Straßenbau und Verkehr Mecklenburg-Vorpommern



Bild 2: Wegaufnehmer zur Überwachung der Risskontrolle eines detektierten Risses, Quelle: Landesamt für Straßenbau und Verkehr Mecklenburg-Vorpommern

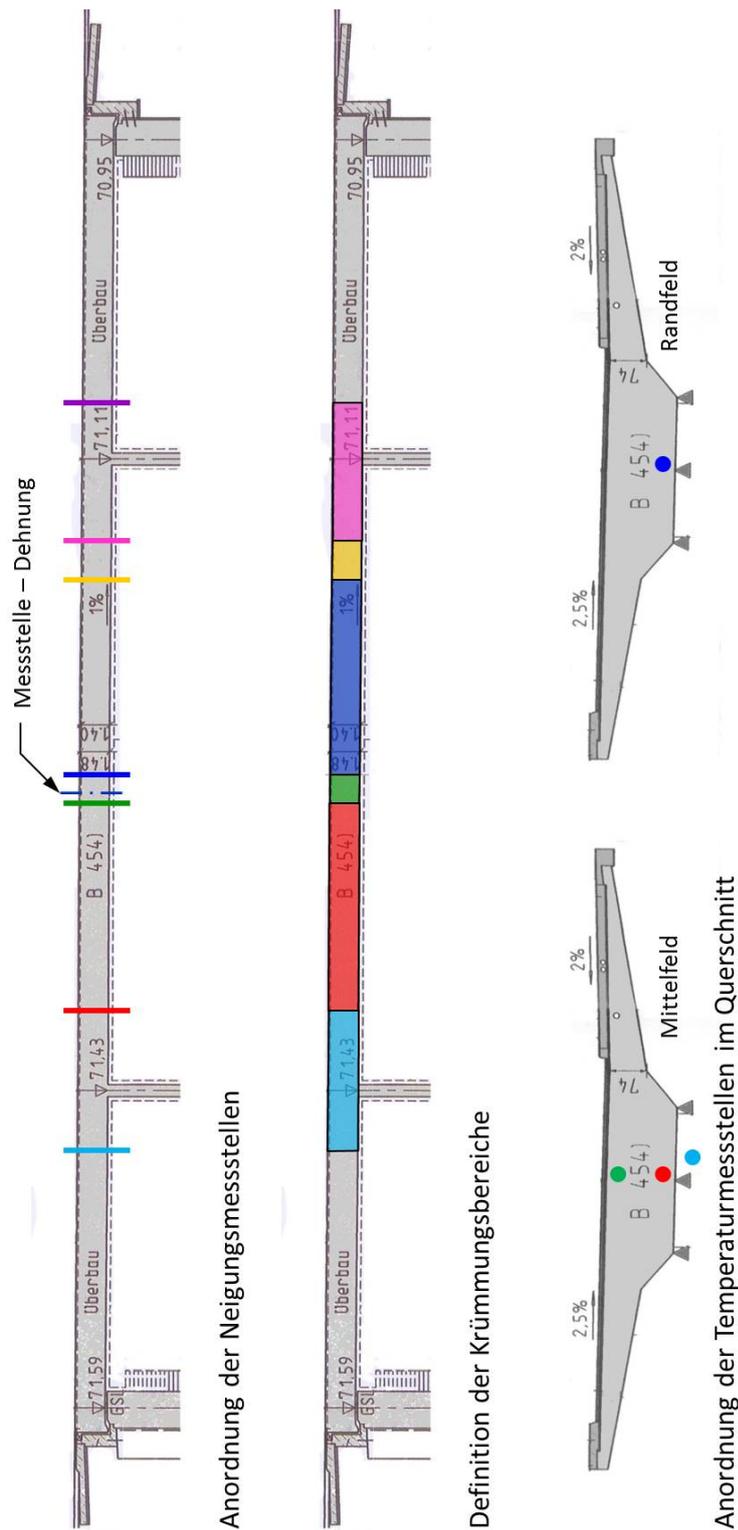


Bild 3: Anordnung der Messstellen am Bauwerk, Quelle: (Bolle et al., 2017)

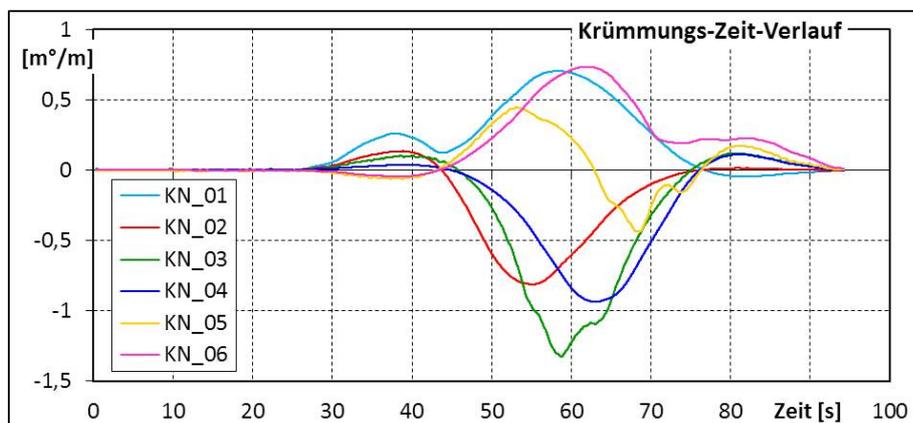
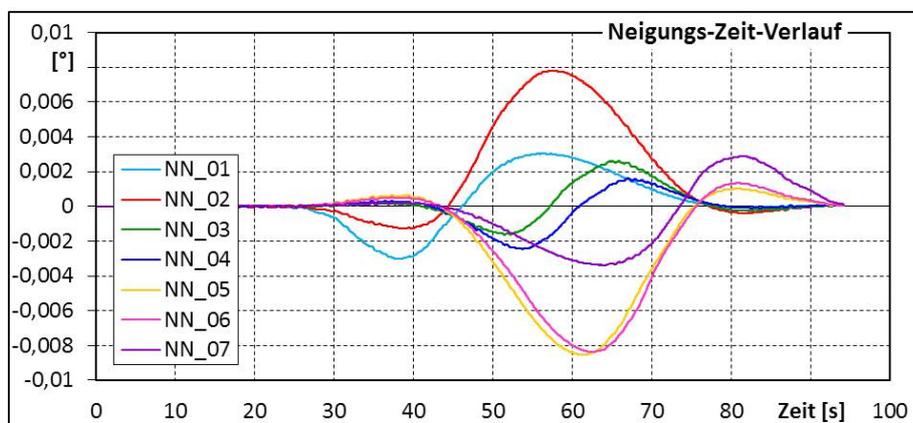
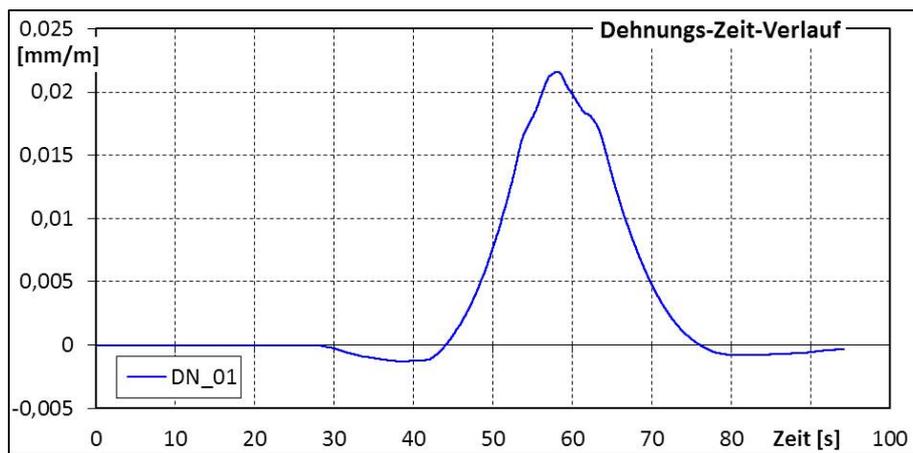


Bild 4: Messwertverlauf während einer LKW-Überfahrt, Quelle: (Bolle et al., 2017)

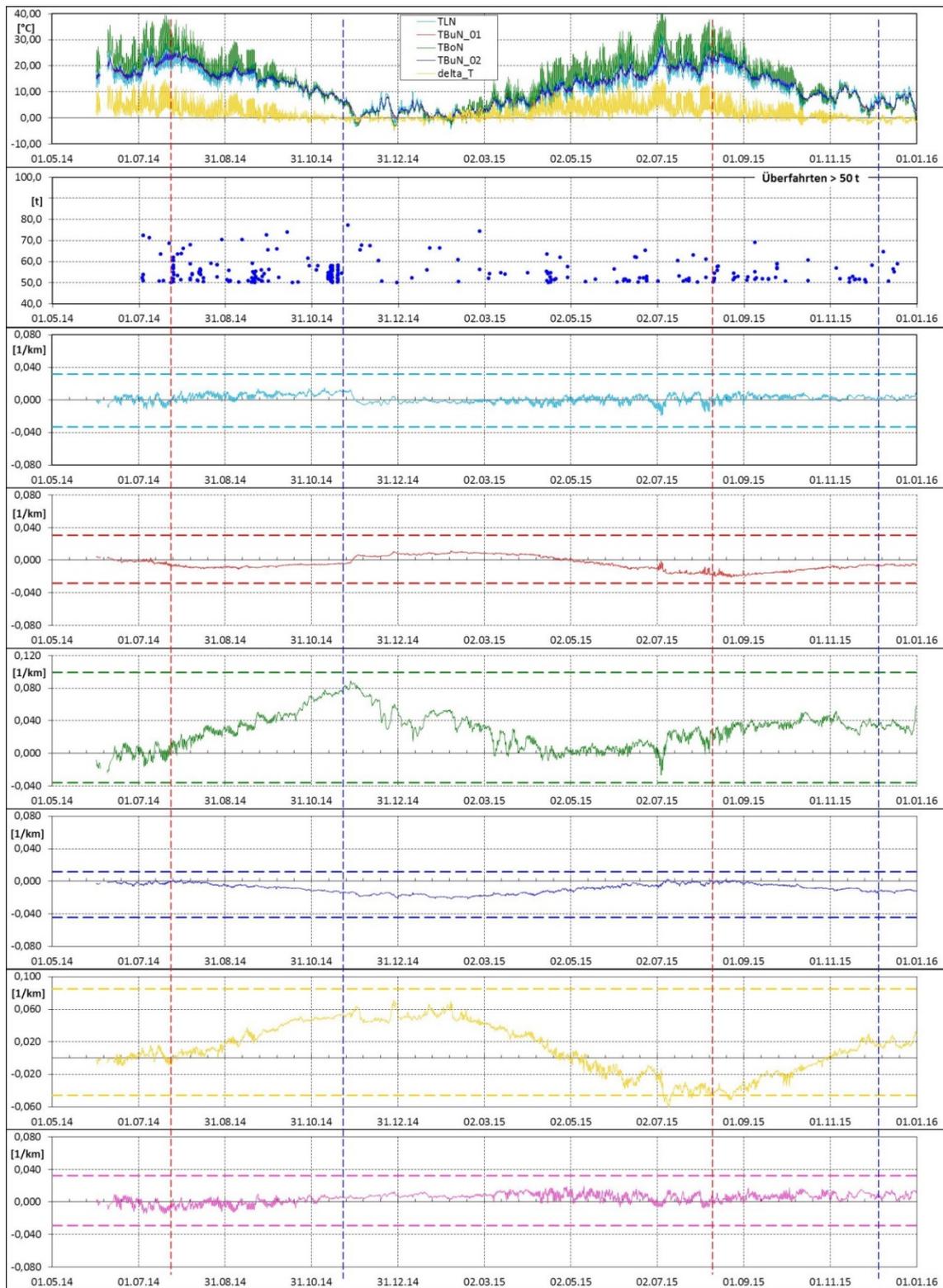


Bild 5: Langzeitverlauf ausgewählter Messdaten, Quelle: (Bolle et al., 2017)

8. Messung des Schwingverhaltens

Monitoring 8.1 **Modellverifizierung mittels Eigenfrequenzvergleich über die Messung des Schwingverhaltens mit Beschleunigungssensoren**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	55,00 – 57,60 – 29,60	m
1.2 Zahl der Felder:	3	
1.3 Brückenfläche:	1348	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1979	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Torsionssteifer Balken
2.4 System der Lagerung:	Elastomerlager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rundstütze
2.6 Widerlager:	Widerlager mit Flügelwänden
2.7 Gründung:	Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Feuerverzinkte Oberfläche

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: Spannstahl St1570/1770, Beton B 450 nach DIN 1045 bis 1972, Betonstahl BSt 42/50 RU (III U) nach DIN 488 Ausgabe 1972 und früher
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: Bn 250 bzw. B 25 nach DIN 1045 ab 1972
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: Bn 250 bzw. B 25 nach DIN 1045 ab 1972

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Spannbetonbauwerk mit rechnerischen Ermüdungsdefiziten

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Beschleunigungssensoren
 - Messbereich Sensortechnik: ± 10 m/s²
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,75 mm/s²
 - Temperaturkompensation: -
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, dezentrale Messverstärker, Auswerterechner, Speicher (NAS), Kommunikationsmodule
Stromversorgung und Sicherungskaten
- 2. Grund des Monitorings:** Unterstützung der Nachrechnung, Überprüfung der Bauwerkssteifigkeiten mittels Eigenfrequenzvergleich, Vergleich der rechnerischen Annahmen im Bemessungsmodell mit den gemessenen Bauwerksreaktionen
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 2 einaxiale Beschleunigungssensoren
2 dreiaxiale faseroptische Beschleunigungssensoren,
4 Magnetfeldsensoren (Monitoring 1.3),
10 DMS (elektrisch) (Monitoring 9.2),
18 Fiber Bragg Gitter
- 4. Messort am Bauwerk:** Feldmitte Überbau Ost, südl. Feld
- 5. Installationsbereich:** Unterseite Stege
- 6. Installationsart:** -
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme*:** *Gesamtkosten der in Monitoring 1.2, Monitoring 8.1 und Monitoring 9.2 beschriebenen Maßnahmen.*
 - Gesamtkosten: 186.000,00 €
 - Planungskosten: 94.000,00 €
 - Installationskosten: 91.000,00 €
 - Betriebskosten: 1.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Planungskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 3 Wochen (*Gesamtmaßnahme*)
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Kurzzeitmonitoring, 3 Monate in 2020
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro mit Tätigkeitsfeldern Strukturdynamik, Bauwerksdiagnose, Bauwerksmonitoring*)
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Messung der Bauwerksbeschleunigungen zur Berechnung der modalen Parameter |
| 2. Messgrößen: | |
| - Beschleunigung: | ± 10 m/s ² |
| 3. Abtastrate: | |
| - Beschleunigung: | 100 Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Beschleunigung: | 100 Hz |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Echtzeit Online-Ausgabe,
Gesamtauswertung nach 3 Monaten |
| 6. Daten: | |
| - Beschleunigung: | Momentanwert
(Oversampling, gemittelter Momentanwert) |
| 7. Datenformat: | Binär, *.csv |
| 8. Datenerfassung: | Eigenentwicklung, Gantner Testcommander,
Fos4X DPU |
| 9. Datenübertragung: | Kabel |
| 10. Datenmanagementsystem: | Eigenentwicklung Fachplaner |
| 11. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Eigenentwicklung Fachplaner Monitoring,
Octave, Matlab, Excel |
| - Ausgabe: | Messbericht und Ergebnispräsentation an Prüfer
und Straßenbauverwaltung |
| 12. Datenverwendung: | Verifizierung und Annäherung von FE-Modellen an
das tatsächliche Tragverhalten,
Übertragung von Messgrößen auf
Berechnungsgrößen in der Nachweisführung |
| 13. Alarmierungsplan: | Nicht erforderlich |
| - Grenzwert: | - |
| - Alarmierungskette: | - |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | - |

Beschreibung des Monitorings

Das Bauwerk besteht aus einer schlaff bewehrten Stahlbetonrampe und zwei längs- und quer vorgespannten Überbauten. In der Nachrechnung nach Stufe 1 und 2 der Nachrechnungsrichtlinie wurden rechnerische Spannungsüberschreitungen im Ermüdungsnachweis ausgewiesen. Zur Überprüfung der tatsächlich auftretenden Schwingbreite in der Längs- und Bügelbewehrung wurden eine messtechnische Ergänzung der Nachrechnung nach Stufe 3 und 4 der Nachrechnungsrichtlinie angestrebt. Die Ausschreibung des Monitoringsystems erfolgte als funktionale Ausschreibung und definierte die folgende Aufgabenstellung:

1. Messung der Beton- und Betonstahldehnungen an Längs- und Bügelbewehrung (Monitoring 9.2) sowie Beschleunigungen (Monitoring 8.1) unter laufendem Verkehr
2. Kalibrierüberfahrten zur Verifizierung der Berechnungsmodelle
3. Datenerfassung, Speicherung und Auswertung

Die Messungen wurden als Kurzzeitmonitoring über einen Zeitraum von 3 Monaten durchgeführt. Das Messsystem wurde so ausgelegt, dass der

Einsatz für ein Langzeit- bzw. Dauermonitoring möglich ist. Die Beschleunigungsmessung unter Gebrauchslast wurde zur Überprüfung der Steifigkeitsannahmen über den Vergleich der modalen Parameter im FE-Modell durchgeführt. Der Messort der Beschleunigungssensoren ergab sich aus den Eigenschwingformen des Modells über die Bauteilbereiche mit größter Auslenkung. Die Sensoren wurden an der Unterkante der Stege bei ca. 40% der Spannweite im Feld angebracht (Bild 1 und 3). Neben den 1-axialen piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern wurden faseroptische Beschleunigungsaufnehmer installiert (Bild 2). Die verwendeten faseroptischen Beschleunigungsaufnehmer weisen geringere Störeinflüsse (z. B. aus elektromagnetischen Feldern), ein geringeres Messrauschen und einen geringeren Verkabelungsaufwand auf. Zum Abgleich der Beschleunigungsereignisse (und Dehnungsereignisse Monitoring 9.2) mit den Verkehrseinwirkungen wurden Magnetfeldmessungen (Monitoring 1.3) und automatisierte Bildaufnahmen der überfahrenden Fahrzeuge (Bild 4) herangezogen.

Folgerung

Die messtechnisch erfassten Beschleunigungen des Bauwerks und deren Umrechnung in modale Parameter stehen in ausreichend genauer Übereinstimmung mit den rechnerisch ermittelten modalen Parametern des FE-Modells (Bild 5). Auf Grund der guten Übereinstimmung musste keine Steifigkeitskalibrierung des Rechenmodells für den Ermüdungsnachweis (siehe Monitoring 9.2) vorgenommen werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

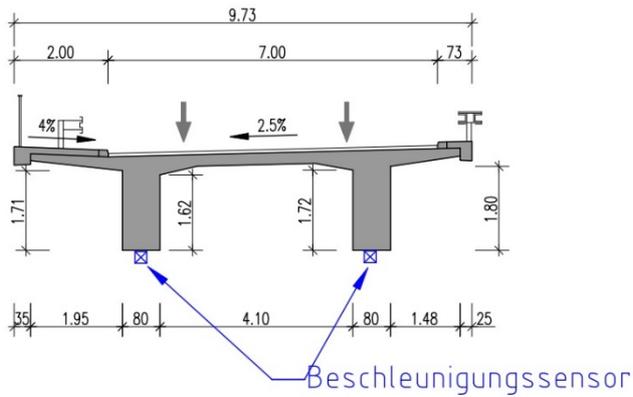


Bild 1: Lage der Beschleunigungssensoren im Querschnitt, Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

Bild 2: Installation des FBG-Beschleunigungssensors, Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

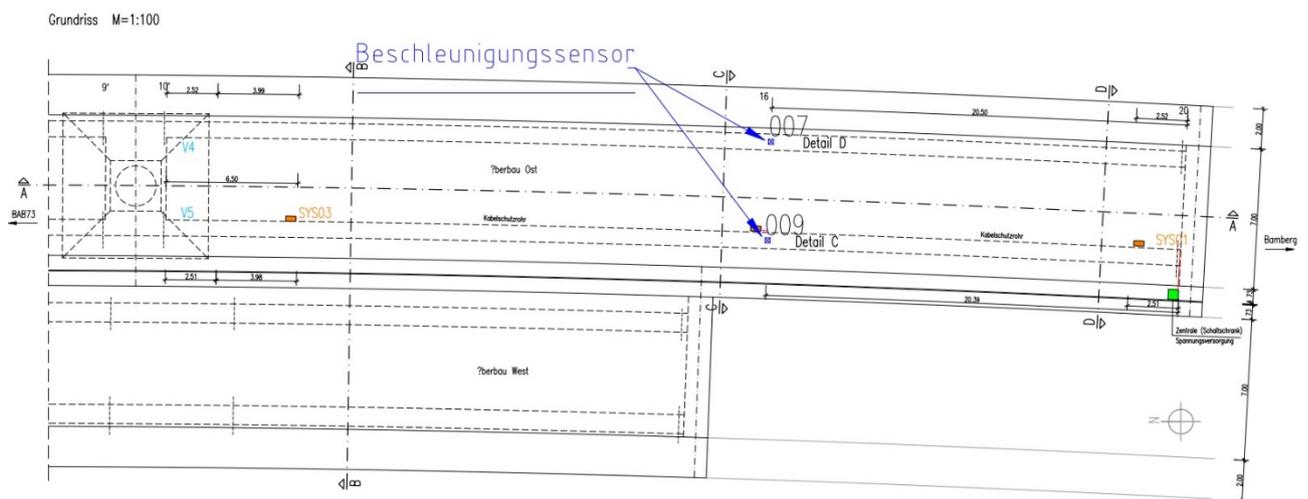


Bild 3: Lage der Beschleunigungssensoren in der Draufsicht, Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

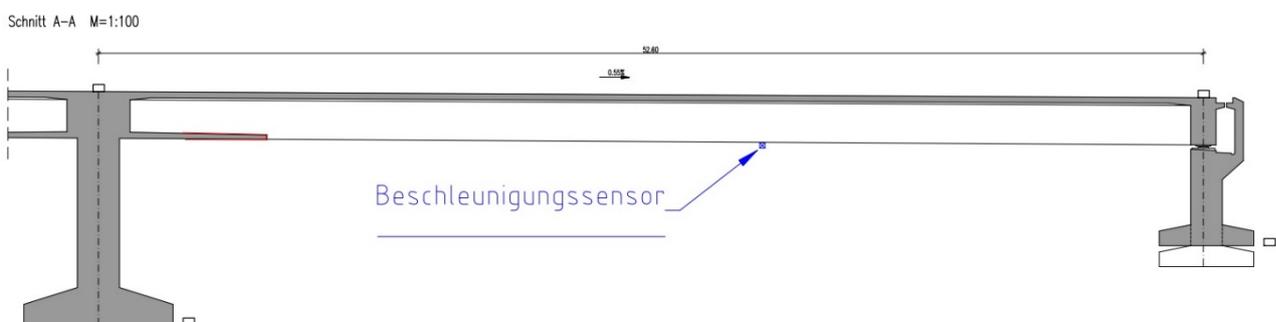


Bild 4: Lage der Beschleunigungssensoren in der Ansicht, Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

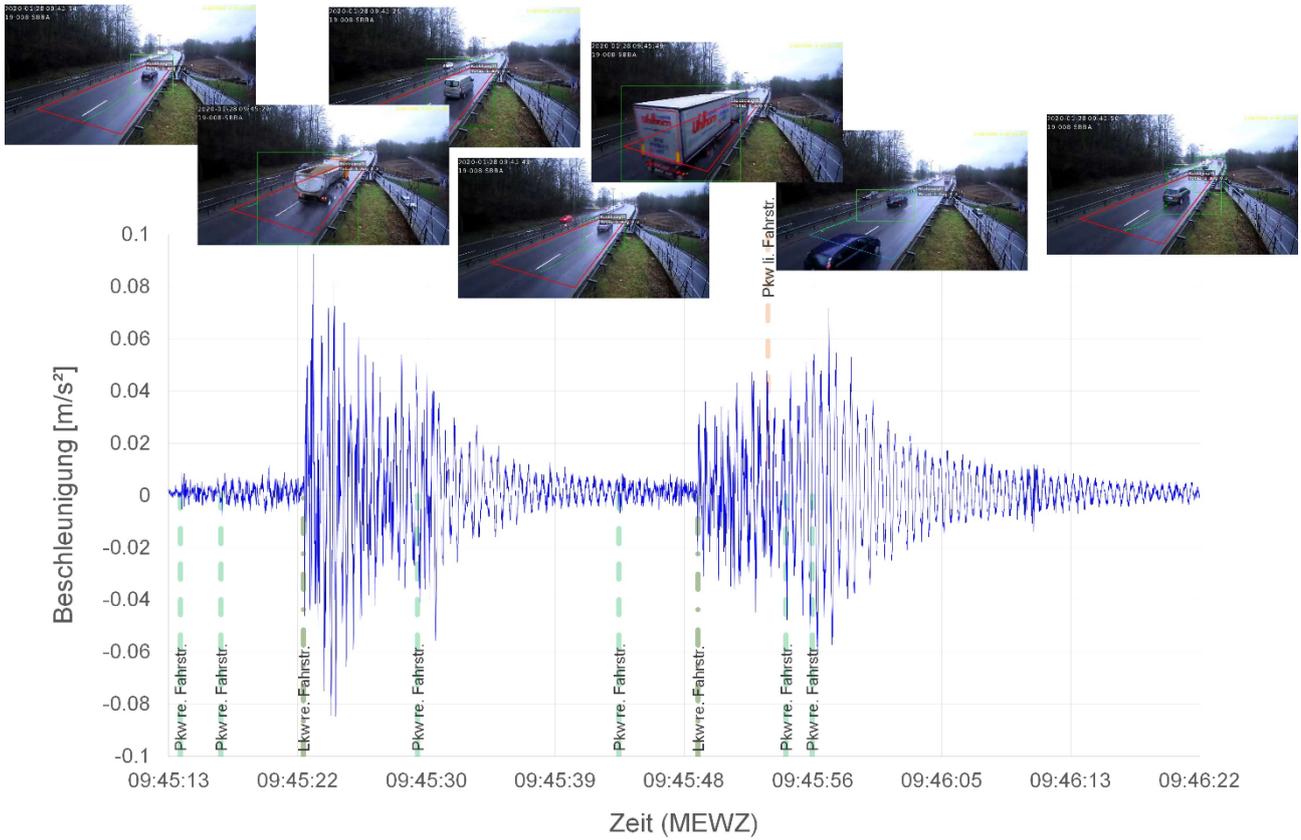


Bild 5: Exemplarischer Beschleunigungszeitverlauf bei Fahrzeugüberfahrt, Quelle: Büro für Strukturmehchanik GmbH

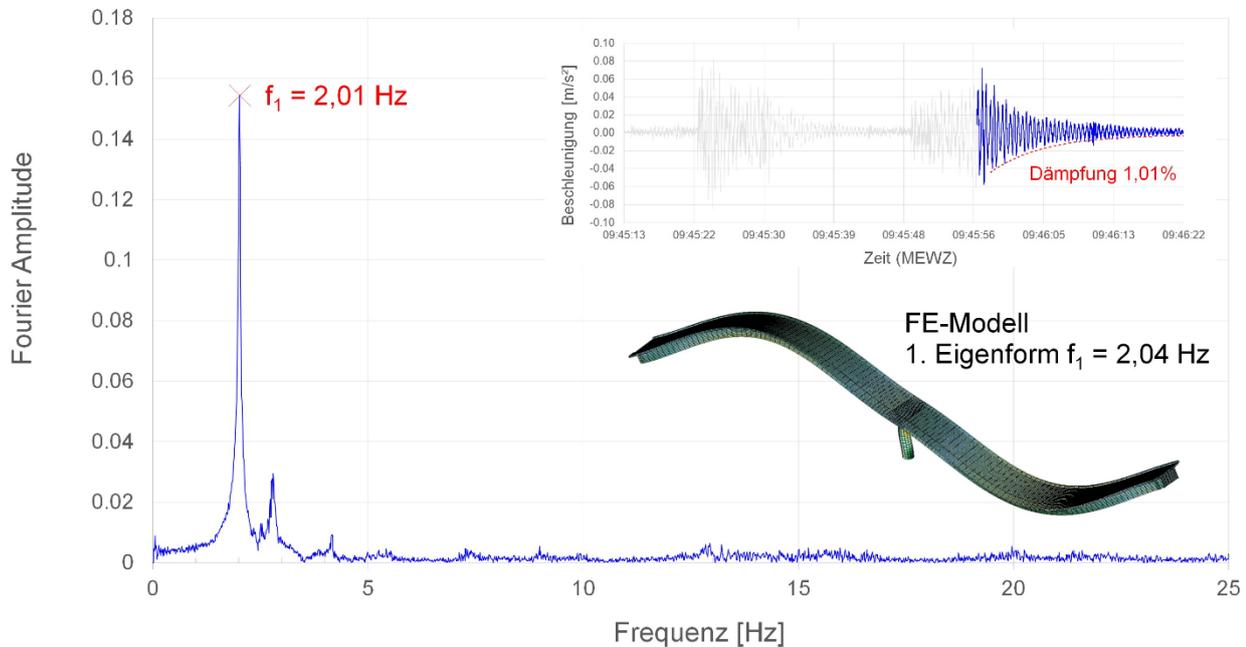


Bild 6: Vergleich des Frequenzgangs (Umrechnung der Beschleunigungsmessung mit Fast Fourier Transformationen) mit den Modalparametern des FE-Modells, Quelle: Büro für Strukturmehchanik GmbH

Monitoring 8.2

Erfassung der dynamischen Tragwerksantwort einer Spannbetonbrücke bei Schwerlastüberfahrten zur Zustandsüberwachung

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	21,35	m
1.2 Zahl der Felder:	1	
1.3 Brückenfläche:	160	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1953	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Einfeldrig freiaufliegend
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	-
2.4 System der Lagerung:	Rollenlager ohne besondere Kippvorrichtung
2.5 Pfeiler / Stützen:	-
2.6 Widerlager:	Massivwand
2.7 Gründung:	Tiefgründung, Pfahlgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Feuerverzinkte Oberfläche

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B300
3.2 Pfeiler/ Stützen:	-
3.3 Widerlager:	-

4. Baugrund

Gründung im Uferbereich

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Korrosionsschaden an der Quervorspannung des Mittelquerträgers
- Rechnerische Tragfähigkeitsdefizite in der Nachrechnung

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Beschleunigungssensoren, einachsige
 - Messbereich Sensortechnik: ± 0.25 bis ± 4 g
 - Erwartete Messunsicherheit: -
 - Temperaturkompensation: Kompensation der Eigenfrequenz über Bauteiltemperaturmessung
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Messpult, Speicher- und Steuerungseinheit, Verstärker- und Filtereinheit, Mess- und Auswertesoftware, Stromversorgungseinheit
- 2. Grund des Monitorings:** Überwachung des Tragwerkszustands, Funktionsüberwachung einer Instandsetzungsmaßnahme
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 3 einaxiale Beschleunigungssensoren
3 Bauteiltemperatursensoren
- 4. Messort am Bauwerk:** Bei 40% Spannweite im Feldbereich
- 5. Installationsbereich:** Unterkante Überbau
- 6. Installationsart:** Geschraubt an Winkelplatte
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: - €
 - Planungskosten: 1.500,00 €
 - Installationskosten: 23.000,00 €
 - Betriebskosten: 12.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 3 Werkzeuge
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2014 bis ENB
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Regierungspräsidium
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro für Tragwerksplanung und Bauwerksmonitoring*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1. Ziel der Messung: | Frühzeitige Detektion von Schadensfällen und Strukturveränderungen, Feststellung einer schädigungsbedingten Eigenfrequenzänderung des Bauwerks, Überwachung und Klassifizierung von Schwerlasttransporten |
| 2. Messgrößen: | |
| - Beschleunigung: | ± 0,0 bis ± 4,0 g |
| - Temperatur: | -40 bis + 60 °C |
| 3. Abtastrate: | |
| - Beschleunigung: | 500 Hz |
| - Temperatur: | 10 min |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Beschleunigung: | 500 Hz |
| - Temperatur: | 10 min |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Echtzeitauswertung (Schwingungsintensitäten, Eigenfrequenzen, Temperaturkompensation) |
| 6. Daten: | |
| - Beschleunigung: | Momentanwert |
| - Temperatur: | Momentanwert |
| 7. Datenformat: | Binär, Speicherung in relationaler Datenbank |
| 8. Datenerfassung: | BRIMOS® Bridge Monitoring System |
| 9. Datenübertragung: | Kontinuierliche Datenübertragung auf einen Server über Mobilfunk, LTE-Router |
| 10. Datenmanagementsystem: | BRIMOS® Bridge Monitoring System |
| 11. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Auswertung und Berechnung der Schwingungsintensitäten, Eigenfrequenzen, Temperaturkompensation, Trendanalyse im BRIMOS® Bridge Monitoring System |
| - Ausgabe: | Grafische Ausgabe, Abruf und Download über Web-User-Interface |
| 12. Datenverwendung: | Dokumentation der Schwerlastüberfahrten, Überwachung der 1. Eigenfrequenz |
| 13. Alarmierungsplan: | Vorhanden |
| - Grenzwert: | Feste Alarmgrenze: 5,4 Hz;
Gleitende Alarmgrenze: knapp unterhalb der Eigenfrequenz; Grenzwert bezogen auf die temperaturkompensierte Eigenfrequenz |
| - Alarmierungskette: | Messingenieur → Regierungspräsidium |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Messingenieur |

Beschreibung des Monitorings

Die Brücke wurde im Jahr 1953 als längs und quer vorgespannte Plattenbrücke mit Verdrängungskörpern und einer Spannweite von 21,35 m errichtet. Aufgrund von Korrosionsschäden an der Quervorspannung des Mittelquerträgers wurde das Tragwerk in Querrichtung mit nachträglichen Stahlträgern verstärkt (Bilder 1 und 2).

Das Bauwerk wird planmäßig einmal pro Woche von Schwertransporten mit bis zu 410 t Gesamtgewicht überfahren. In einer Nachrechnung des verstärkten Bauwerks mit den Lastmodellen für Schwerlasttransporte wurden Defizite in der rechnerischen Tragfähigkeit festgestellt. Zur Absicherung des Weiterbetriebs wurde ein Monitoringsystem zur Überwachung des Tragwerkverhaltens vorgesehen. Zustandsveränderungen des Bauwerks sollen über ein Monitoring mit Beschleunigungssensoren frühzeitig detektiert werden. Bei Änderung des Tragverhaltens und auftretender Schädigung ist mit einer Änderung der dynamischen Charakteristik des Bauwerks zu rechnen.

Insgesamt wurden drei einaxiale Beschleunigungssensoren an der Überbauunterkante bei ca. 40% der Spannweite im Feldbereich an der Unterkante des Überbaus (mittig und nahe den Außenkanten) angebracht (Bild 4). Zur Abschätzung temperaturbedingter Änderungen der Tragwerksreaktionen wurden drei Temperatursensoren zur Messung der Bauteiltemperatur an der Unterkante des Überbaus, am Außensteg nahe der Unterkante und unterhalb der Fahrbahnplatte angebracht. Die Sensoren wurden in Bohrlöcher eingeführt und versiegelt.

Zur Kalibrierung des Messsystems wurde ein Belastungstest mit Schwerlasttransporten unterschiedlicher Dimensionen, Gesamtgewichten und Achslasten sowie unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt. Mit dem Belastungstest wurde die dynamische Tragwerksantwort der Brücke zur späteren Identifizierung unterschiedlicher Fahrzeugklassen und Detektion möglicher Schädigungen erfasst.

Zur Bewertung von Zustandsveränderungen infolge der Einwirkungen aus Schwerlastverkehr wird ein Vergleich der Eigenfrequenz vor und nach der Schwerlastüberfahrt durchgeführt (Bild 5). Die Verschiebung der Eigenfrequenz nach der Überfahrt kann auf Veränderungen des Tragverhaltens hindeuten. Die Auswertung der Eigenfrequenz aus den Beschleunigungsmessungen erfolgt automatisch. Zur Identifikation von Überfahrtsereignissen werden die maximalen Beschleunigungsamplituden herangezogen (Bild 6). Bei Überschreitung von definierten Grenzwerten der Beschleunigung, welche auf die Überfahrt von sehr schweren Fahrzeugen hinweisen, wird eine Alarm-Email an den zuständigen Messingenieur versendet. Für die automatisch ausgewerteten Eigenfrequenzen ist ebenfalls eine Alarmgrenze eingerichtet, die im Fall einer plötzlich eintretenden Schädigung oder der Überfahrt eines sehr schweren Schwerlasttransport über eine Veränderung der automatisiert berechneten Eigenfrequenz ausgelöst wird.

Folgerung

Über das Dauermonitoring kann das Bauwerk trotz rechnerischer Defizite bis zum Ersatzneubau in Betrieb gehalten werden. Die Messdaten geben Rückschlüsse auf die Anzahl und die Art der Schwerlastüberfahrten sowie die zugehörige dynamische Tragwerksantwort. Im bisherigen Messzeitraum wurde keine Veränderung des dynamischen

Tragerhaltens (Eigenfrequenz) beobachtet. In einer dreimonatigen Messdatenanalyse der aufgezeichneten Schwingungsantwort des Tragwerks konnte festgestellt werden, dass annähernd jede Nacht zum Teil unangemeldete Schwerlasttransporte die Brücke überfahren.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Unteransicht des Bauwerks, Quelle: VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, BBV Systems GmbH



Bild 2: Ansicht der Verstärkungsmaßnahme, Quelle: VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, BBV Systems GmbH

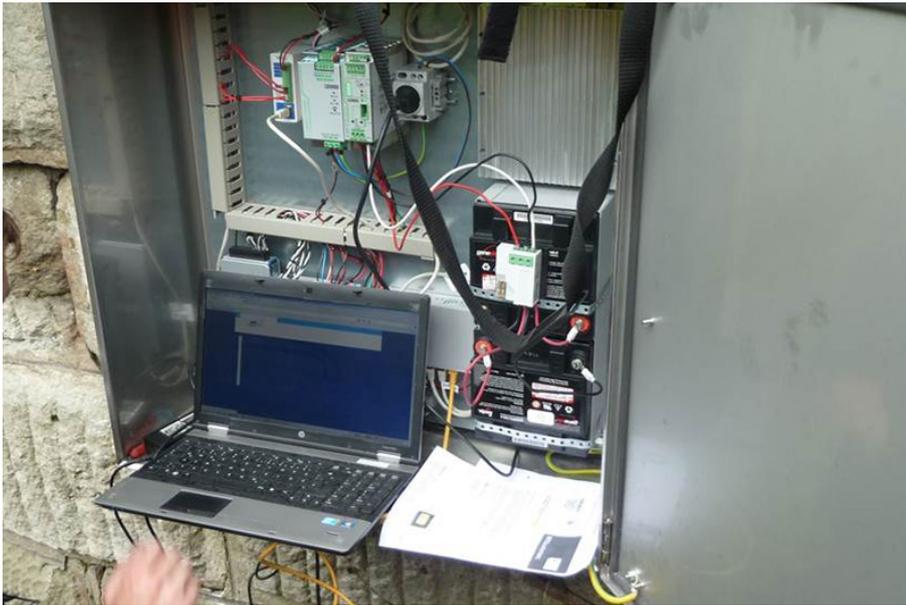


Bild 3: Messzentrale, Quelle: VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, BBV Systems GmbH



Bild 4: Installation des Beschleunigungssensors, Quelle: VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, BBV Systems GmbH

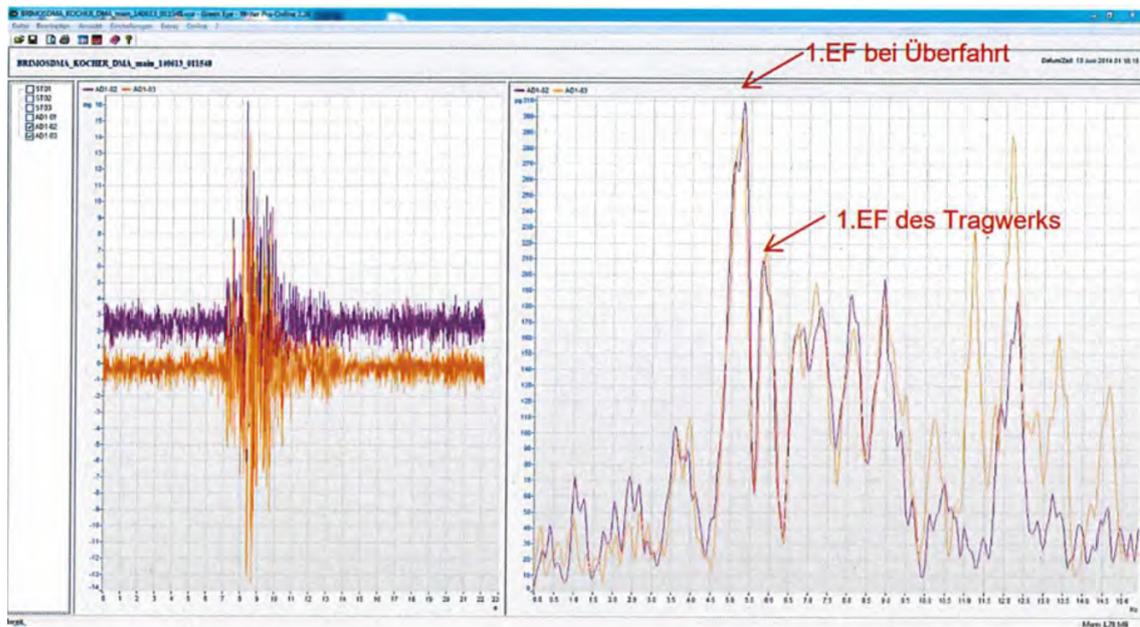


Bild 5: Exemplarisches Messsignal und Spektrum während der Kalibrierüberfahrt,
Quelle: VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, BBV Systems GmbH

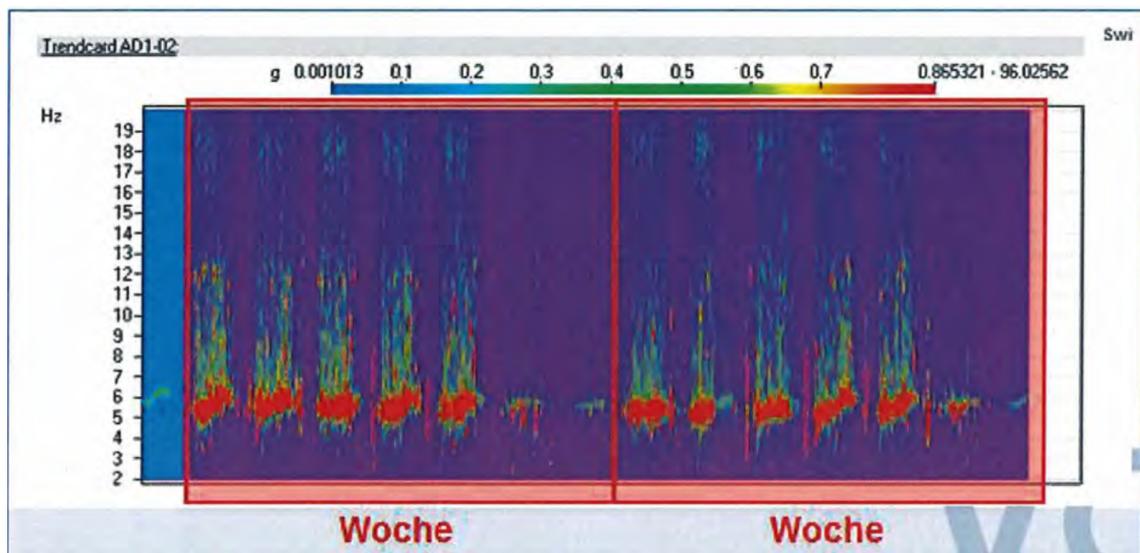


Bild 6: Exemplarische Trendkarte der Tages- und Wochengänge der Eigenfrequenz und
Schwingungsamplitude unter Verkehrsbelastung,
Quelle: VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, BBV Systems GmbH

Monitoringmaßnahme:	9. Messung der tatsächlichen Schwingbreite	Lfd. Nr.:	9.1	Blatt:	1
---------------------	--	-----------	-----	--------	---

9. Messung der tatsächlichen Schwingbreite

Monitoring 9.1 **Nachweis der Ermüdungsfestigkeit mittels einer messbasierten Überprüfung des Spannungsspiels in den Koppelfugen**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	29,10 – 38,06 – 21,15 – 21,15 – 17,71	m
1.2 Zahl der Felder:	5	
1.3 Brückenfläche:	2411	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1980	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Zweizelliger Betonhohlkasten
2.4 System der Lagerung:	Elastomerlager, Kalottenlager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rundstützen
2.6 Widerlager:	Widerlager mit Flügelwand
2.7 Gründung:	Tiefgründung, Flachgründung mit Bodenersatz
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtet

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton
3.3 Widerlager:	Stahlbeton

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Rechnerische Defizite im Ermüdungsnachweis der Koppelfugen für BK 60 trotz Verstärkung durch externe Längsvorspannung
- Rissentwicklung detektiert durch gerissene Gips-Markierungen
- vollgestoßene Spannglieder (100% Stoß)
- Lagerverschiebung durch schlechten Untergrund

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Induktive Wegaufnehmer
 - Messbereich Sensortechnik: $\pm 2,0$ mm
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,01 mm
 - Temperaturkompensation: Referenzsensoren, Bauteiltemperaturmessung, Außenlufttemperaturmessung
 - Gesamttechnischer Umfang: Wegaufnehmer inkl. Messverstärker, Datenlogger
- 2. Grund des Monitorings:** Messbasiertes Nachweisverfahren ab Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie, Koppelfugenmonitoring
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 18 Induktive Wegaufnehmer
26 Widerstandsthermometer (Bauteiltemperatur)
1 Außenlufttemperaturfühler
- 4. Messort am Bauwerk:** Koppelfugen
- 5. Installationsbereich:** Hohlkasten Unterkante
- 6. Installationsart:** Verdübelt
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 142.000,00 €
 - Planungskosten: 18.000,00 €
 - Installationskosten: 49.000,00 €
 - Betriebskosten: 75.000,00 €
 - Kosten Datenmanagement: *In Gesamtkosten enthalten* €
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 3 Tage
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, 1 Jahr
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Fachplaner Monitoring (Tragwerksplaner*)
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Messung des Schwingspiels zur Überwachung des Zustands der Dekompression |
| 2. Messgrößen: | |
| - Wegmessung: | -0,6 bis +2,0mm mm |
| - Temperatur: | -20 bis +80 °C |
| 3. Abtaste: | |
| - Wegmessung: | 100 Hz |
| - Temperatur: | 0,001 Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Wegmessung: | 15 min |
| - Temperatur: | 15 min |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Monatlich |
| 5. Daten: | |
| - Wegmessung: | Minimal-, Maximalwert
(je 2-minütiger Messperiode) |
| - Temperatur: | Momentanwert |
| 6. Datenformat: | *.xcl |
| 7. Datenerfassung: | Server |
| 8. Datenübertragung: | Ethernet Schnittstelle, automatischer E-Mail Versand |
| 9. Datenmanagementsystem: | - |
| 10. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | - |
| - Ausgabe: | Grafische und tabellarische Ausgabe in Form von Monats- und Jahresauswertungen, Bericht |
| 11. Datenverwendung: | Überwachung des Zustands der Dekompression über einen Jahreszyklus, Kompensation rechnerischer Defizite der Restnutzungsdauer durch messtechnische Überwachung |
| 12. Alarmierungsplan: | Nicht erforderlich |
| - Grenzwert: | - |
| - Alarmierungskette: | - |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | - |

Beschreibung des Monitorings

Die Nachrechnung der Autobahnbrücke (Bilder 1 und 2) ergab rechnerische Defizite bei den Nachweisen der Querkrafttragfähigkeit sowie den Ermüdungsnachweisen der voll gestoßenen Spannungsgliedkopplungen. Zudem wurden gerissene Gipsmarken an den Koppelfugen vorgefunden, welche in den letzten beiden Hauptprüfungen jedoch keine Veränderung zeigten. Aus der Nachrechnung wurde ein Konzept für eine Verstärkungsmaßnahme mit externer Vorspannung entwickelt. Mit der Ertüchtigungsmaßnahme sollte die Brückensklasse BK 60 erreicht werden, da die Brücke einen wichtigen Zubringer im Streckennetz darstellt. Aufgrund der speziellen Querschnittsgeometrie konnte die externe Vorspannung nur mit einer begrenzten Kraft aufgebracht werden, weshalb in den rechnerischen Nachweisen lediglich die Brückensklasse BK 45 nachgewiesen werden konnte. Neben der Koppelfugenproblematik wurde für Instandsetzungsmaßnahmen zudem eine 4+0 Verkehrsführung notwendig.

Für das Bauwerk standen die folgenden Entscheidungssituationen zur Verfügung:

1. Kein Monitoring und Neubau der Brücke mit verkehrseinschränkenden Maßnahmen während der Bauzeit
2. Monitoring und Verstärkung der Brücke

In einer Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden die bautechnischen Kosten, die Monitoringkosten und die volkswirtschaftlichen Kosten aus Verkehrseinschränkungen bewertet, aus welcher die Variante des Monitorings mit einem wirtschaftlichen Vorteil hervorging. Die detaillierte Beschreibung der Wirtschaftlichkeitsanalyse der Maßnahme kann dem folgenden BAST-Bericht entnommen werden:

Heft B 156 - Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen, Matthias Schubert et al., 2020

Die Freigabe für BK 60 kann über die messtechnische Überprüfung erfolgen, dass keine ermüdungsrelevanten Spannungsspiele in den Koppelfugen auftreten. Die Überprüfung erfolgte über ein Langzeitmonitoring im Zeitraum von November 2016 bis Oktober 2017 mit der Messung der tatsächlichen Rissentwicklung in den rechnerisch defizitären Koppelfugen. Primär sollten temperaturbedingter Rissentwicklungen in den Koppelfugen festgestellt und ermüdungsrelevante Schwerverkehrsüberfahrten erfasst werden.

Das Monitoringkonzept wurde aus den Ergebnissen der Nachrechnung und der anschließenden Planung der Verstärkung durch eine externe Vorspannung erstellt. Zur Überwachung der Rissentwicklung wurden Wegaufnehmer über den Koppelfugen an der Unterkante des Zellkastens appliziert und mit einer Referenzmessung an einem unmittelbar benachbarten ungerissenen Bereich verglichen. Mit Hilfe der Doppelmessung konnte eine direkte Temperaturkompensation der Wegmessung erfolgen (Bild 4). Für den Fall einer aufreißenden Koppelfuge stellt sich ein höherer Messwert im Vergleich zum Referenzwert ein.

Insgesamt wurden an drei maßgebenden Koppelfugen je ein Wegaufnehmer an der Unterkante des Hohlkastens unterhalb der Stege mit einem jeweiligem Referenzsensor im ungerissenen Bereich installiert (Messstellen in Bild 3).

Für das Bauwerk konnte aufgrund des Bauwerksalters von ca. 40 Jahren von einer abgeschlossenen zeitabhängigen Schnittgrößenumlagerung ausgegangen werden. Die Schwankungen der ermüdungsrelevanten Grundbeanspruchung werden unter dieser Annahme allein durch die Temperaturbeanspruchung hervorgerufen. Die tatsächliche Temperaturbeanspruchung wurde über die Anordnung von je 13 Temperatursensoren über den Querschnitt an der Hohlkasteninnenseite an 2 Messstellen ermittelt.

Monitoringmaßnahme:	9. Messung der tatsächlichen Schwingbreite	Lfd. Nr.:	9.1	Blatt:	5
---------------------	--	-----------	-----	--------	---

Folgerung

Durch das Monitoring wurde aufgezeigt, dass während aller Witterungsperioden eines vollständigen Jahreszyklus der Zustand der Dekompression in den Koppelfugen nicht überschritten wird und die Koppelfugen dauerhaft wirksam überdrückt sind. Die erwartbaren Spannungsschwingspiele in den Koppelankern sind gering mit vernachlässigbarer Schadensakkumulation.

Über die messtechnische Überprüfung konnte eine Freigabe der Brücke für die normative Tragfähigkeit der Brückenklasse 60 nach DIN 1072 gemäß Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie trotz verbleibender rechnerischer Defizite erfolgen.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Ansicht des Bauwerks, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Rheinland

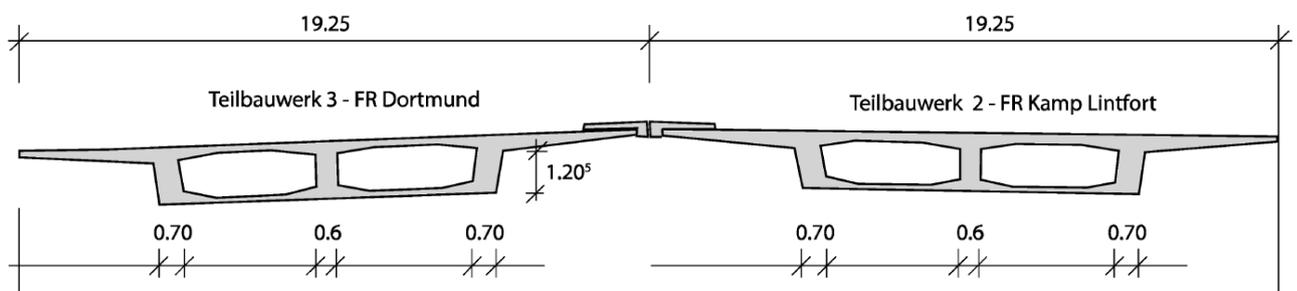


Bild 2: Querschnitt, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Rheinland

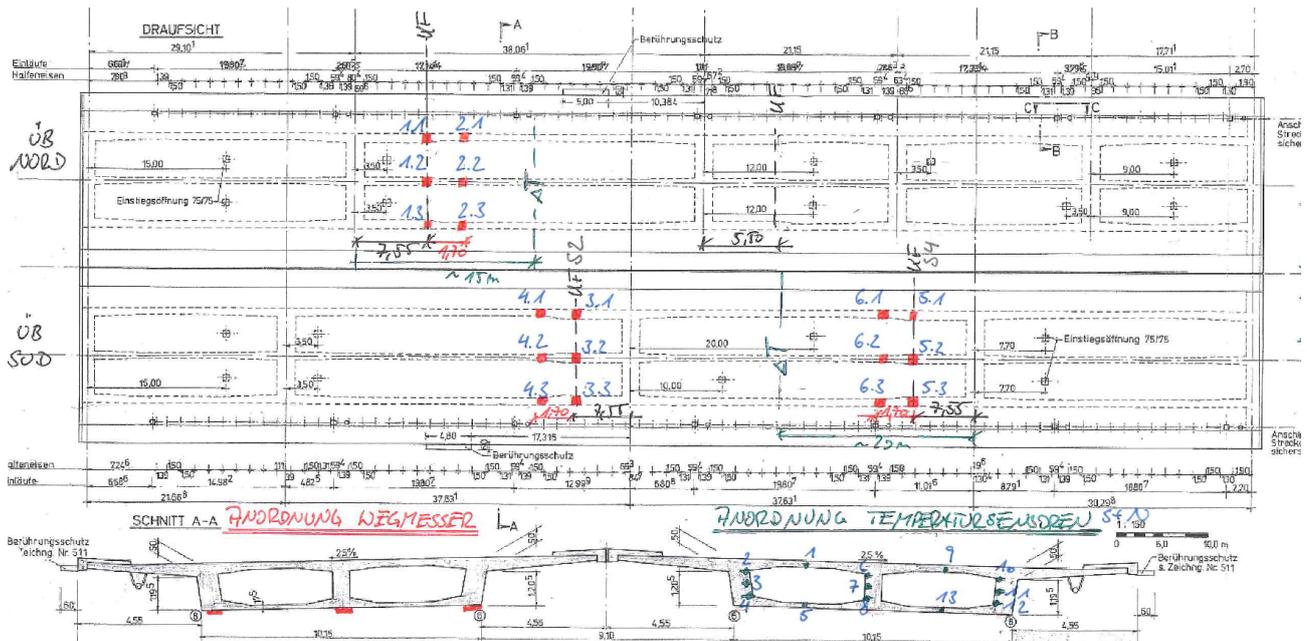


Bild 3: Anordnung der Wegaufnehmer und Temperatursensoren, Quelle: EHS beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH

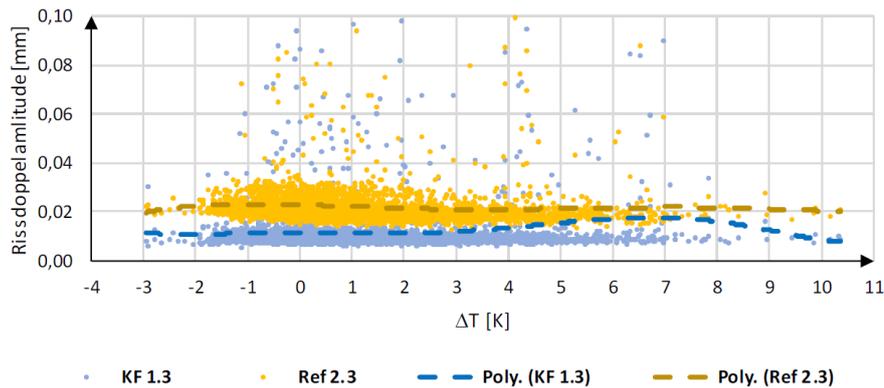


Bild 4: Exemplarischer Messwertgraph der Doppelamplituden und Referenzwerte in Abhängigkeit von der Temperaturbeanspruchung, Quelle: EHS beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH

Monitoring 9.2 **Messung der tatsächlichen Schwingbreite für den messbasierten Nachweis der Ermüdung**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	55,00 – 57,60 – 29,60	m
1.2 Zahl der Felder:	3	
1.3 Brückenfläche:	1348	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1979	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Torsionssteifer Balken
2.4 System der Lagerung:	Elastomerlager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rundstütze
2.6 Widerlager:	Widerlager mit Flügelwänden
2.7 Gründung:	Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Feuerverzinkte Oberfläche

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: Spannstahl St1570/1770, Beton B 450 nach DIN 1045 bis 1972, Betonstahl BSt 42/50 RU (III U) nach DIN 488 Ausgabe 1972 und früher
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: Bn 250 bzw. B 25 nach DIN 1045 ab 1972
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: Bn 250 bzw. B 25 nach DIN 1045 ab 1972

4. Baugrund -

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Spannbetonbauwerk mit rechnerischen Ermüdungsdefiziten
- vorgespannte Stege

Angaben zur Art des Monitorings

1. Messtechnik:

- Sensortechnik: Dehnungsmessstreifen und Fiber Bragg Gitter
- Messbereich Sensortechnik: 2% bzw. $\pm 20.000 \cdot 10^{-6}$ µm/m
- Erwartete Messunsicherheit: <0,02 µm/m
- Temperaturkompensation: Bauteiltemperaturmessung
- Gesamttechnischer Umfang: Dezentrale Messverstärker, Serverschrank mit Datenerfassungsmodul und Interrogator, Auswerterechner, Speicher (NAS), Kommunikationsmodule

2. Grund des Monitorings:

Stromversorgung und Sicherungskaten
Erfassung der Beton-, Bügeldehnung zum Nachweis der Ermüdungsspannungen, Laststatistik

3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:

Dehnung Beton:
*2 DMS (elektrisch),
* 6 Fiber Bragg Gitter (faseroptisch),
Dehnung Betonstahl:
* 8 DMS (elektrisch),
* 12 Fiber Bragg Gitter (faseroptisch),
2 einaxiale Beschleunigungssensoren, 2 dreiaxiale faseroptische Beschleunigungssensoren (Monitoring 8.1),
4 Magnetfeldsensoren (Monitoring 1.3)
Stege Überbau Ost, südl. Feld

4. Messort am Bauwerk:

5. Installationsbereich:

Betonstahl (angeschliffen), Betonoberfläche

6. Installationsart:

Geklebt

7. Kosten der Monitoringmaßnahme:

Gesamtkosten der in Monitoring 1.2, Monitoring 8.1 und Monitoring 9.2 beschriebenen Maßnahmen.

- Gesamtkosten: 186.000,00 €
- Planungskosten: 94.000,00 €
- Installationskosten: 91.000,00 €
- Betriebskosten: 1.000,00 €
- Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €

8. Zeitraum/ Dauer der Installation:

Gesamtmaßnahme: 3 Wochen

9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:

Kurzzeitmonitoring, 3 Monate in 2020

10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:

- Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro mit Tätigkeitsfeldern Strukturdynamik, Bauwerksdiagnose, Bauwerksmonitoring*)
- Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (*)
- Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
- Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
- Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)

Monitoringmaßnahme:	9. Messung der tatsächlichen Schwingbreite	Lfd. Nr.:	9.2	Blatt:	3
<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="260 185 1166 219">- Auswertung der Messergebnisse Fachplaner Monitoring (*) <li data-bbox="260 230 1166 264">- Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*) 					
Brücken- und Ingenieurbau			Erfahrungssammlung „Monitoring für Brückenbauwerke“		161

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | |
|-----|------------------------------------|---|
| 1. | Ziel der Messung: | Ermittlung der tatsächlichen Beton- und Betonstahldehnungen (Längs-/Bügelbewehrung), Unterstützung der Nachrechnung (messbasierter Ermüdungsnachweis) |
| 2. | Messgrößen: | |
| | - Dehnungsmessung (DMS): | 2 % |
| | - Dehnungsmessung (FBG): | 2 % |
| 3. | Abtastrate: | |
| | - Dehnungsmessung (DMS): | 100 Hz |
| | - Dehnungsmessung (FBG): | 100 Hz |
| 4. | Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| | - Dehnungsmessung (DMS): | 100 Hz |
| | - Dehnungsmessung (FBG): | 100 Hz |
| 5. | Frequenz Datenauswertung: | Echtzeit Online-Ausgabe,
Gesamtauswertung nach 3 Monaten |
| 6. | Daten: | h |
| | - Dehnungsmessung (DMS): | Momentanwert
(Oversampling, gemittelter Momentanwert) |
| | - Dehnungsmessung (FBG): | Momentanwert
(Oversampling, gemittelter Momentanwert) |
| 7. | Datenformat: | binär, *.csv |
| 8. | Datenerfassung: | Eigenentwicklung, Gantner Testcommander (DMS), Fos4X DPU (FBG) |
| 9. | Datenübertragung: | Kabel |
| 10. | Datenmanagementsystem: | Eigenentwicklung Fachplaner Monitoring |
| 11. | Datenauswertung: | |
| | - Prozess: | Eigenentwicklung Fachplaner Monitoring, Octave, Matlab, Excel |
| | - Ausgabe: | Messbericht und Ergebnispräsentation an Prüfer und Straßenbauverwaltung |
| 12. | Datenverwendung: | Ermüdungsnachweis |
| 13. | Alarmierungsplan: | Nicht notwendig |
| | - Grenzwert: | - |
| | - Alarmierungskette: | - |
| | - Zuständigkeit im Alarmfall: | - |

Beschreibung des Monitorings

Das Bauwerk besteht aus einer schlaff bewehrten Stahlbetonrampe und zwei längs- und quer vorge-spannten Überbauten. In der Nachrechnung nach Stufe 1 und 2 der Nachrechnungsrichtlinie wurden rechnerische Spannungsüberschreitungen im Ermüdungsnachweis und Querkraftdefizite aufgrund unzureichender Querkraftbewehrung und offenen Bügelformen ausgewiesen. Zur Überprüfung der tatsächlich auftretenden Schwingbreite in der Längs- und Bügelbewehrung wurden eine messtechnische Ergänzung der Nachrechnung nach Stufe 3 und 4 der Nachrechnungsrichtlinie angestrebt. Die Ausschreibung des Monitoringsystems erfolgte als funktionale Ausschreibung und definierte die folgende Aufgabenstellung:

1. Messung der Beton- und Betonstahldehnungen an Längs- und Bügelbewehrung sowie Beschleunigungen (Monitoring 8.1) unter laufendem Verkehr
2. Kalibrierüberfahrten zur Verifizierung der Berechnungsmodelle
3. Datenerfassung, Speicherung und Auswertung

Die Messungen wurden als Kurzzeitmonitoring über einen Zeitraum von 3 Monaten durchgeführt. Das Messsystem wurde so ausgelegt, dass der Einsatz für ein Langzeit- bzw. Dauermonitoring möglich ist.

Zur Überprüfung der tatsächlichen Schwingbreite wurden an der Biegezugbewehrung Dehnmessstreifen (Bild 1) und an der Bügelbewehrung Fiber Bragg Gitter (Bild 2) appliziert. Die Bewehrungsstäbe wurden hierzu freigelegt, vorbehandelt und nach dem Applizieren der Sensoren wieder verschlossen. Als Messstellen wurden die rechnerisch höchst ausgelasteten Bauwerksbereiche gewählt. Zur Temperaturkalibrierung der faseroptischen Messergebnisse wurde die Bauteiltemperatur nahe den Sensoren erfasst. Zusätzlich wurden an der Betonoberfläche der Stegunterkanten Dehnmessstreifen und Fiber Bragg Gitter zur Erfassung der tatsächlichen Betondehnung unter Gebrauchslast installiert.

Zur Kalibrierung des Messsystems und Zuordnung der Dehnungsmessergebnisse zu unterschiedlichen Fahrzeugklassen wurden Kalibrierfahrten mit Fahrzeugen unterschiedlicher Dimensionen und Achslasten vorgenommen (Bild 5). Die Plausibilisierung der Dehnungsmessergebnisse unter laufendem Verkehr erfolgt über die Dokumentation der Fahrzeugüberfahrten mittels Magnetfeldsensoren und automatisierten Bildaufnahmen (Bilder 3 und 4) (siehe Monitoring 1.3).

Folgerung

Die Dehnungsmessung ergab eine geringere tatsächliche Spannungsschwingbreite als in den normativen Ermüdungsnachweisen rechnerisch ermittelt. Die Steifigkeitsannahmen des Rechenmodells wurden über einen Eigenfrequenzvergleich (siehe Monitoring 8.1) messtechnisch überprüft. Der Ermüdungsnachweis konnte auf Basis messtechnischer Ergebnisse nach Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie erbracht werden.

Auf Basis der messtechnisch unterstützten Nachrechnung konnte eine Verlängerung der Nutzung über die Restnutzungsdauer hinaus erzielt und kostenintensive Sanierungsmaßnahmen bzw. ein erforderlicher Ersatzneubau vermieden werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Messstelle zur Erfassung der Betonstahl-Längsdehnung (DMS) während der Installation (li), Bauwerksansicht (re), Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH



Bild 2: Messstelle zur Erfassung der Bügeldehnungen (FBG) während der Installation, Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

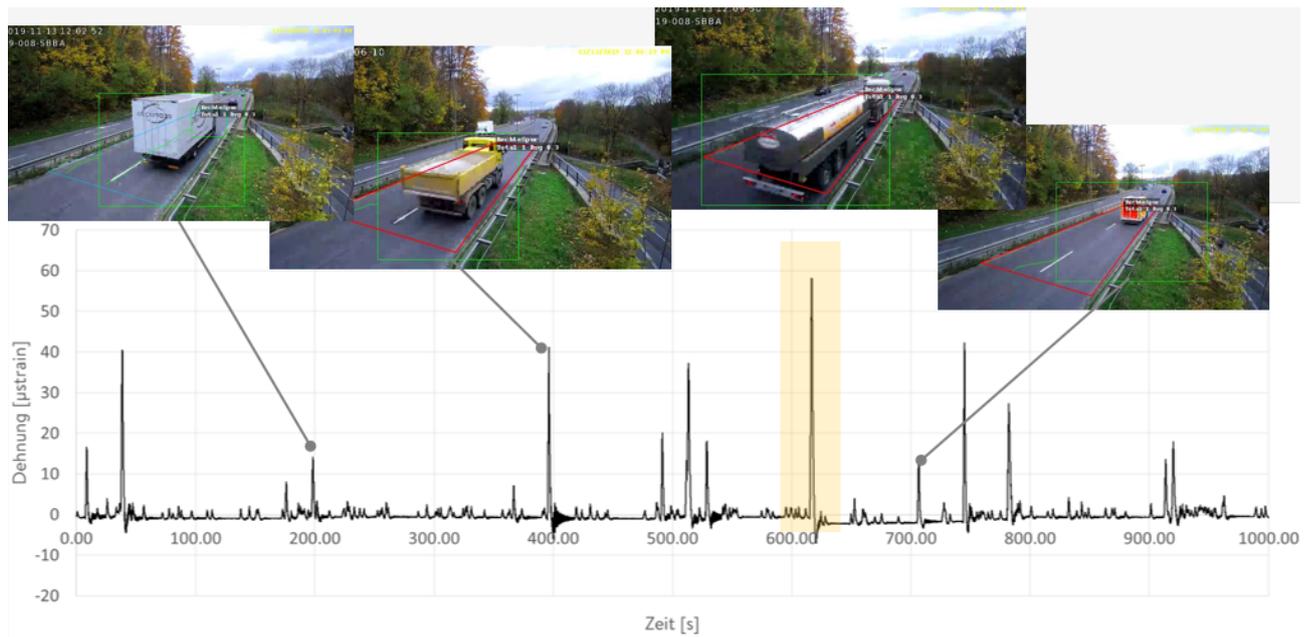


Bild 3: Exemplarische Auswertung der faseroptischen Betondehnungsmessung in Feldmitte, Unterkante Steg außen und zugehörigen Fahrzeugen, Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

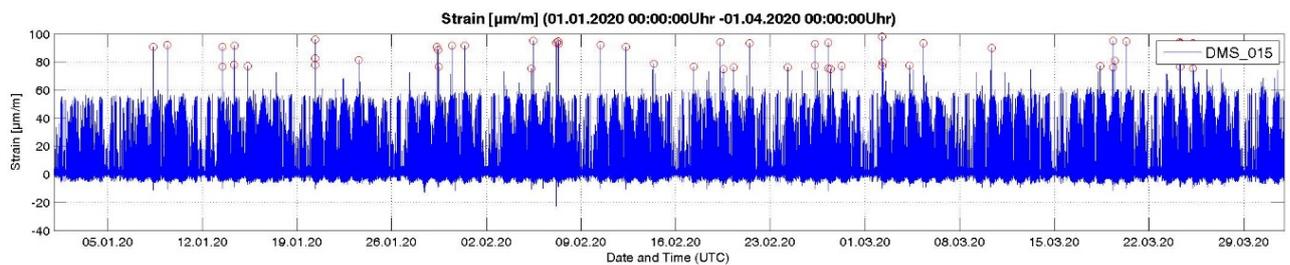


Bild 4: Temperaturbereinigter Zeitverlauf der Betondehnung (DMS Messung) in Feldmitte, Unterkante Steg außen für eine Messperiode von 3 Monaten, Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

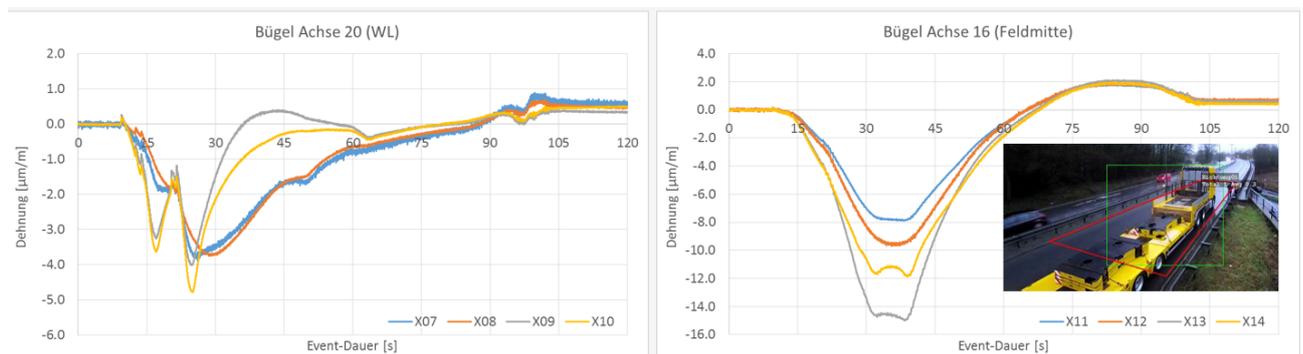


Bild 5: Bügeldehnungen (FBG Messung) während der Kalibrierfahrt am Widerlager (li) und in Feldmitte (re), Quelle: Büro für Strukturmechanik GmbH

Monitoringmaßnahme:	10. Rissbreitenmessung	Lfd. Nr.:	10.1	Blatt:	1
---------------------	------------------------	-----------	------	--------	---

10. Rissbreitenmessung

Monitoring 10.1 **Koppelfugenmonitoring mit Wegaufnehmern bei Defiziten der rechnerischen Restnutzungsdauer**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	61,80 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,64 – 48,07 – 48,30 – 48,54 – 32,38 – 74,19 – 53,10 – 43,91 – 55,14	m
1.2 Zahl der Felder:	20	
1.3 Brückenfläche:	15444	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60/30 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1968	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken / Trägerrost (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Widerlager: querfest, Pfeiler: schwimmend
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rundstütze
2.6 Widerlager:	Widerlager mit Flügelwand
2.7 Gründung:	Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: C35/45
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: C20/25
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: C35/45

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Verstärkung mit einer externen Vorspannung aufgrund rechnerischer Defizite
- Schadensfall eines herabfallenden Endverankerungsblocks
- Notunterstützung in Bereichen rechnerisch kritischer Koppelfugen

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Induktive Wegaufnehmer mit freiem Kern
 - Messbereich Sensortechnik: ± 5 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,1 %
 - Temperaturkompensation: Bauteiltemperatur und Lufttemperaturmessung nahe Bauwerksmitte
 - Gesamttechnischer Umfang: Wegaufnehmer inkl. Messverstärker, Messzentrale, Temperaturfühler
- 2. Grund des Monitorings:** Überwachung der Koppelfugen, Überwachungsmaßnahme als Kompensation bei bekannten Defiziten (der rechnerischen Restnutzungsdauer), Unterstützung bei der Erhaltungsplanung, Erfassung der Reaktionen des Bauwerks, Wirksamkeitsuntersuchung einer Notunterstützung
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 36 Wegaufnehmer, 4 Temperaturfühler
- 4. Messort am Bauwerk:** Koppelfugen an den Außenstegen, vereinzelt Messungen an kritischen Innenstegen
- 5. Installationsbereich:** Stegunterkante
- 6. Installationsart:** Geklebt, Methylmethacrylat
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 192.000,00 €
 - Planungskosten: 10.000,00 €
 - Installationskosten: 182.000,00 €
 - Betriebskosten: 10.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: 20.000,00 €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 4 Monate, 4. Quartal 2017
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2017 laufend bis ENB
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Fachplaner (Ingenieurbüro, Universität*)
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner (*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Messtechniker)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Messtechniker)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner (*)

Monitoringmaßnahme:	10. Rissbreitenmessung	Lfd. Nr.:	10.1	Blatt:	3
----------------------------	-------------------------------	------------------	-------------	---------------	----------

- Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner (*)
- Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

1. **Ziel der Messung:** Kontrolle und frühzeitige Detektion von Änderungen des Bauwerkverhaltens durch die messtechnische Überwachung der Rissentwicklung in den Koppelfugen
2. **Messgrößen:**
 - Wegmessung: ± 5 mm mm
 - Temperaturmessung: -20 bis 60 °C
3. **Abtastrate:**
 - Wegmessung: 100 Hz
 - Temperaturmessung: 0,1 Hz
4. **Frequenz Datenaufzeichnung:**
 - Wegmessung: 10 sec
 - Temperaturmessung: 10 sec
5. **Frequenz Datenauswertung:** 24 h
6. **Daten:**
 - Wegmessung: Minimal-, Maximal-, Momentanwert
 - Temperaturmessung: Momentanwert
7. **Datenformat:** *.xls
8. **Datenerfassung:** Speicherung vor Ort
9. **Datenübertragung:** Automatischer Mailversand
10. **Datenmanagementsystem:** Wachsende Datenbank aus automatisierter VBA basierter Auswertung
11. **Datenauswertung:**
 - Prozess: Manuell, makrobasiert in Excel
 - Ausgabe: Grafisch und tabellarisch, Quartalsbericht
12. **Datenverwendung:** Kompensation rechnerischer Defizite der Restnutzungsdauer durch die messtechnische Überwachung der Koppelfugen, Warnsystem
Vorhanden
13. **Alarmierungsplan:**
 - Grenzwert: Dynamische Grenzwertbetrachtung, hohe Rissbreitenänderung in 24 h
 - Alarmierungskette: Fachplaner plausibilisiert Alarm, informiert im Alarmfall Ansprechpartner Straßenbauverwaltung
 - Zuständigkeit im Alarmfall: Fachplaner, Straßenbauverwaltung

Beschreibung des Monitorings

Gemäß den erfolgten Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass sich eine Änderung, insbesondere eine Verschlechterung des Tragverhaltens über Rissentwicklungen (Rissöffnungen) in den Koppelfugen ankündigt. Aus diesem Grund wurden an den Koppelfugen Wegaufnehmer zur Überwachung der Rissentwicklungen angebracht. Aktuell sind der äußere und innere Steg des südlichen Überbaus und der äußere Steg des nördlichen Überbaus mit Wegaufnehmern ausgestattet (Bilder 1 bis 5). Bei Rückbau des südlichen Überbaus werden die Wegaufnehmer an den Koppelfugen des inneren Stegs des nördlichen Überbaus zur Überprüfung der Bauwerksreaktion i.F. der 4+0 Verkehrsführung montiert.

Für die Planung und Umsetzung des Monitorings wurde folgende Fragestellung definiert:

1. Zugewinn an Erkenntnissen bezüglich des Tragverhaltens des Bauwerks und einer daraus möglichen Anpassung der theoretischen Analysen für eine verbesserte Beschreibung und Abschätzung, z.B. Vergleich der ermüdungsrelevante Beanspruchung der inneren Koppelfugen bzw. äußeren Koppelfugen (Potential der Querverteilung) und die daraus resultierenden Konsequenzen in der Bewertung bzw. einer Notunterstützung
2. Kenntnis des Zeitpunktes, ab welchem es zu einer Änderung des Tragverhaltens kommt, um geeignete Maßnahmen entsprechend ergreifen zu können und eine Umsetzung des Nutzungskonzepts über die angestrebte verbleibende Nutzungsdauer des Bauwerks zu ermöglichen.

Im Zuge der Machbarkeitsempfehlung wurden die Randbedingungen und die konkrete Aufgabenstellung des Monitorings wie folgt festgelegt:

1. Echtzeitmessungen der dynamischen Rissöffnung mit entsprechender Genauigkeit der ermüdungstechnisch stark beanspruchten Koppelfugen
2. Messung der Lufttemperatur und der Bauteiltemperatur in unterschiedlichen Höhenlagen
3. Alarmmeldung bei einer plötzlichen Veränderung der messtechnisch festgestellten Größen
4. Möglichkeit eines visuellen Abgleichs der verkehrlichen Situation
5. Monitoring im Außenbereich (Dauer ungefähr 10 Jahre) bei möglichst wartungsarmem Aufbau der gesamten Anlage, mit Fernzugriff auf alle messtechnischen Daten bzw. die Steuerung der messtechnischen Anlage zu einem beliebigen Zeitpunkt und Ort
6. Unterbrechungsfreie Stromversorgung der Anlage im Falle eines Stromausfalles
7. Möglichkeit, den Umfang der Messstellen in einem bestimmten Rahmen zu verändern, ohne große strukturellen Veränderungen an der messtechnischen Infrastruktur
8. Standardisierte, systematische und automatisierte Aufbereitung der messtechnischen Rohdaten für eine einfache und schnelle Auswertung bzw. Bewertung der Messergebnisse, insbesondere im Falle einer detektierten Überschreitung der definierten Alarmwerte

Folgerung

Die Nutzung des Bauwerks konnte durch die messtechnische Überwachung ermüdungskritischer Bereiche über das Ende der rechnerischen Restnutzungsdauer hinaus verlängert werden. Die Wirk-

samkeit der Notunterstützung an den kritischen Koppelfugen konnte über die Messung der Rissbreite bestätigt werden (Bild 6).

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

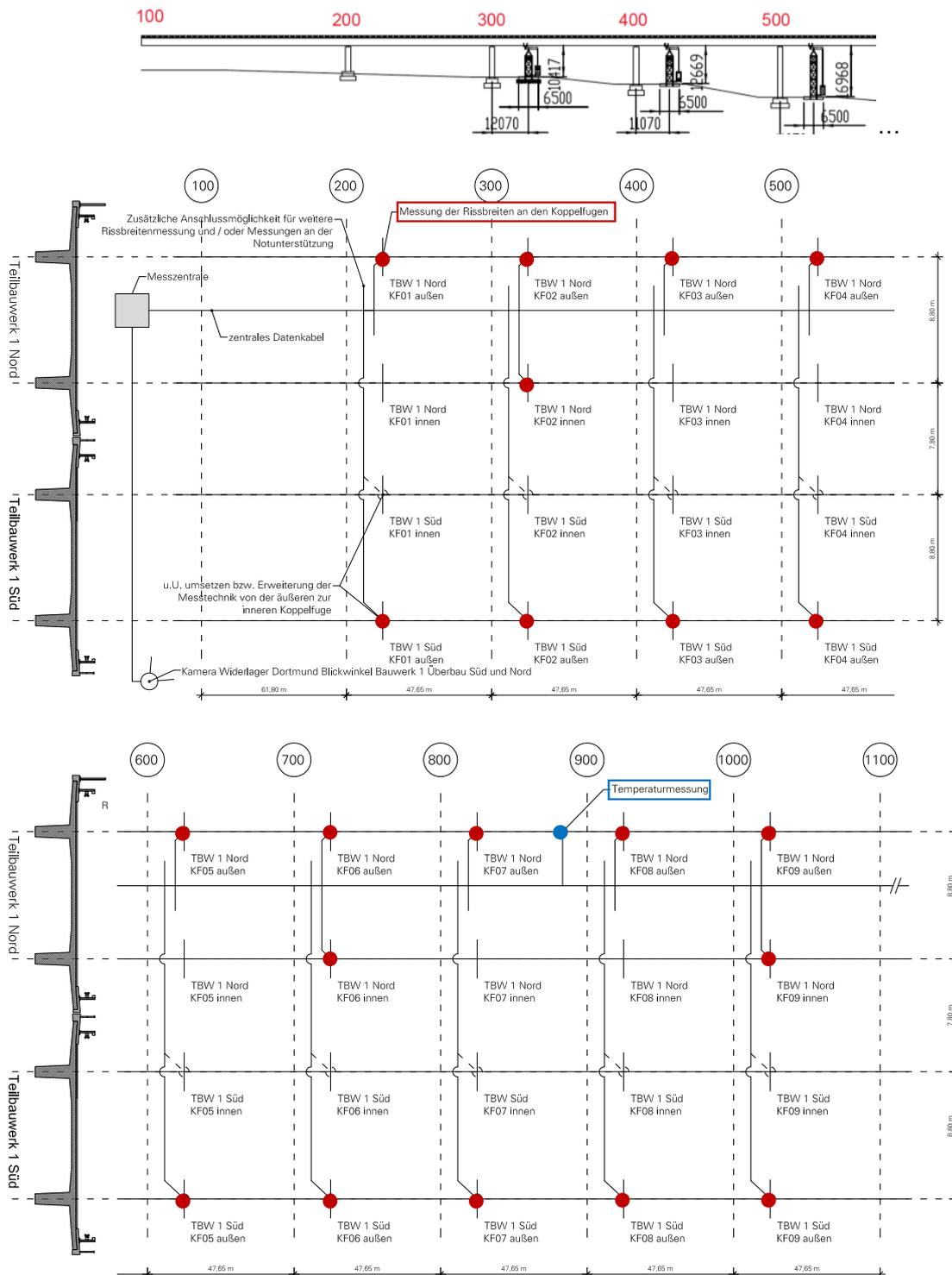


Bild 1: Installationsskizze Draufsicht, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart



Bild 2: Ansicht Talbrücke und Notunterstützung, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

Messung der Rissbreitenöffnungen an den Koppelfugen - äußere Stege
Schnitt an der Unterkante im Bereich der Koppelfugen

Äußerer Steg

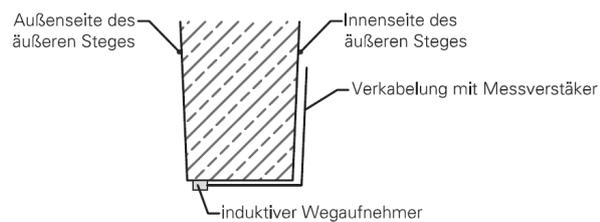


Bild 3: Installationsskizze Querschnitt, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

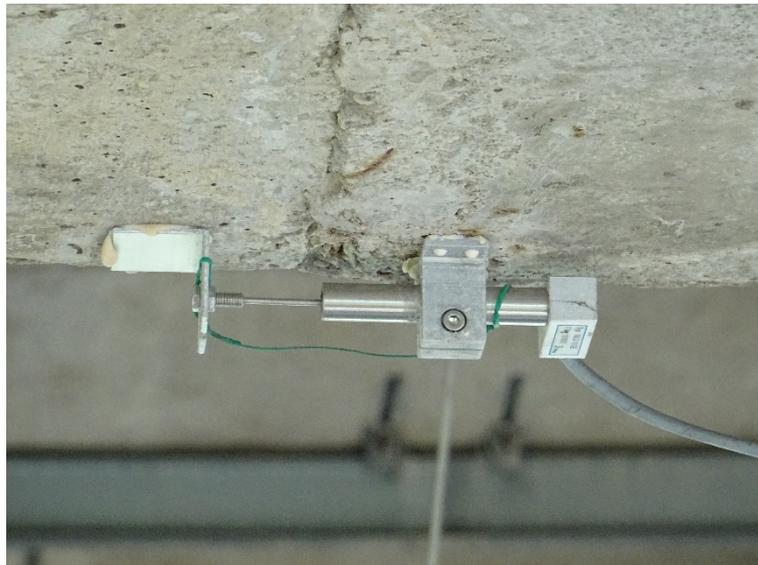


Bild 4: Klebung Wegaufnehmer, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

Detail dezentrale(r) Messverstärker bzw. Anschluss an zentralen Kabelstrang

(Darstellung beispielhaft für die Messung der Rissbreitenöffnung Bereich Koppelfuge 02 Teilbauwerk 1 Nord bzw. Süd)

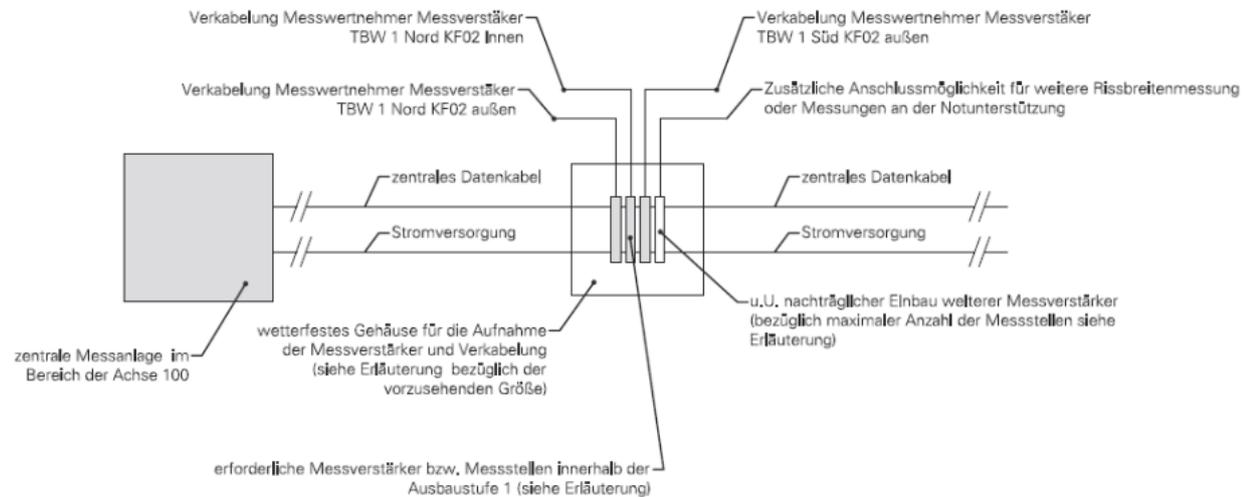


Bild 5: Messsystemarchitektur, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

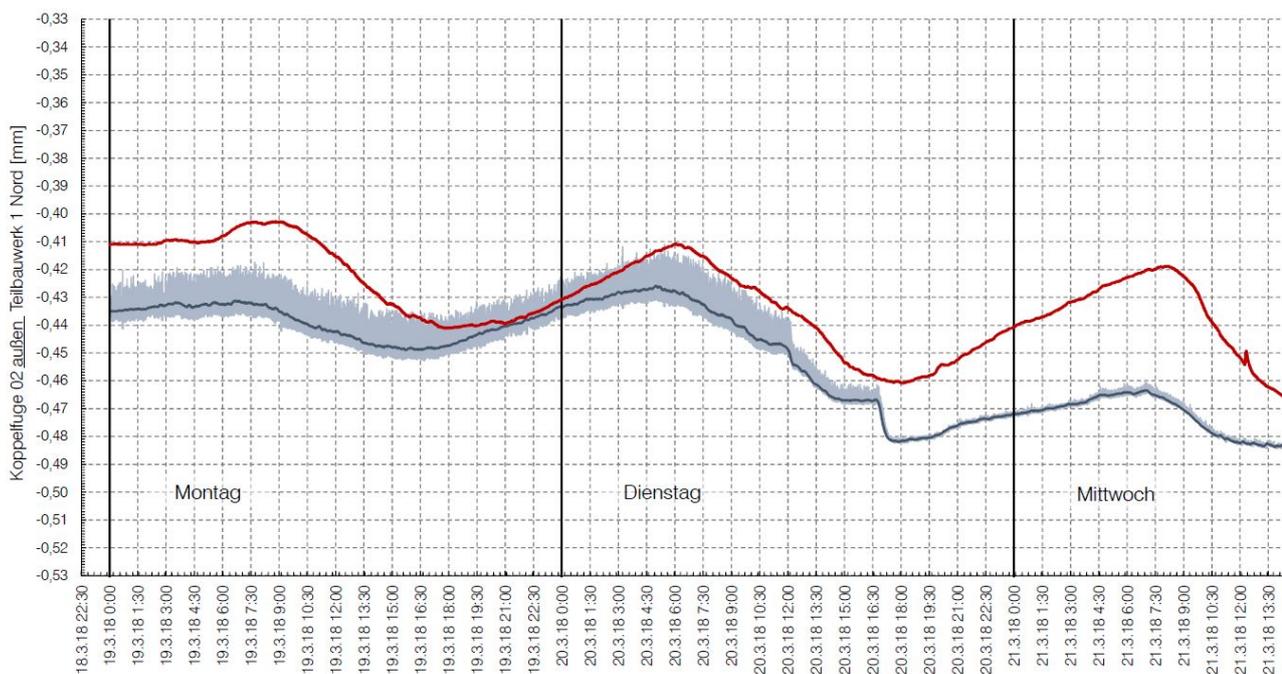


Bild 6: Ausschnitt grafische Messauswertung – Rissbreitenentwicklung an den Koppelfugen während der Aktivierung der Notunterstützung (blau) und Temperaturkurve (rot), Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

Monitoring 10.2 Koppelfugenmonitoring mit Wegaufnehmern bei Defiziten der rechnerischen Restnutzungsdauer

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	33,80 – 35,40 – 35,40 – 35,40 – 35,40 – 35,40 – 35,40 – 35,40 – 35,40 – 35,40 – 35,40 – 34,40 – 47,50 – 34,65 – 35,40 – m 35,40 – 35,40 – 35,40 – 35,40 – 35,40 – 30,00	
1.2 Zahl der Felder:	24	
1.3 Brückenfläche:	10395	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1966	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken Vollquerschnitt
2.4 System der Lagerung:	Rollenlager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rundstütze
2.6 Widerlager:	Kastenwiderlager
2.7 Gründung:	Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	/

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: C35/45
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: C30/37
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: C30/37

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Überschreitung der rechnerischen Restnutzungsdauer
- Verstärkung mit externer Vorspannung
- Notunterstützung für plötzliche Überbauabsenkungen
- Setzungsempfindlicher Baugrund

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Induktive Wegaufnehmer mit freiem Kern
 - Messbereich Sensortechnik: ± 5 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,1 %
 - Temperaturkompensation: Bauteiltemperatur und Lufttemperaturmessung, PT100
 - Gesamttechnischer Umfang: Wegaufnehmer inkl. Messverstärker, Messzentrale mit Industrie-PC, Temperaturfühler, Kamera
- 2. Messort am Bauwerk:** Überwachung Koppelfugen
Unterstützung bei der Erhaltungsplanung
Überwachungsmaßnahme als Kompensation bei bekannten Defiziten
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 24 Wegaufnehmer,
4 Bauteiltemperaturfühler,
1 Lufttemperaturfühler,
1 Kamera
- 4. Messbereich:** Koppelfugen an den Außenstegen
- 5. Installationsbereich:** Stegunterkante
- 6. Installationsart:** Geklebt, Methylmethacrylat
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 77.750,00 €
 - Planungskosten: 11.000,00 €
 - Installationskosten: 66.750,00 €
 - Betriebskosten: 10.700,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: 20.000,00 €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 5 Tage
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2018 laufend bis ENB
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Fachplaner (Ingenieurbüro, Universität*)
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner (*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Messtechniker)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Messtechniker)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | |
|---------------------------------------|---|-----|
| 1. Ziel der Messung: | Kontrolle und frühzeitige Detektion von Änderungen des Bauwerkverhalten durch die messtechnische Überwachung der Rissentwicklungen in den Koppelfugen | |
| 2. Messgrößen: | | |
| - Wegmessung: | ± 5 | mm |
| - Temperaturmessung: | -20 bis +250 | °C |
| 3. Abtastrate: | | |
| - Wegmessung: | 100 | Hz |
| - Temperaturmessung: | 0,1 | Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | | |
| - Wegmessung: | 10 | min |
| - Temperaturmessung: | 10 | min |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | 24 | h |
| 6. Daten: | | |
| - Wegmessung: | Minimal-, Maximal-, Mittelwert | |
| - Temperaturmessung: | Momentanwert | |
| 7. Datenformat: | *.xls, *.csv | |
| 8. Datenerfassung: | Speicherung vor Ort | |
| 9. Datenübertragung: | Upload auf den Server über das Mobilfunknetz | |
| 10. Datenmanagementsystem: | Excel | |
| 11. Datenauswertung: | | |
| - Prozess: | Manuell, Makrobasiert in Excel | |
| - Ausgabe: | Grafisch und tabellarisch, Dokumentation der Messergebnisse in Quartalsberichten | |
| 12. Datenverwendung: | Kompensation rechnerischer Defizite der Restnutzungsdauer, Warnsystem | |
| 13. Alarmierungsplan: | Vorhanden | |
| - Grenzwert: | Dynamische Grenzwertbetrachtung, hohe Rissbreitenänderung innerhalb von 24h | |
| - Alarmierungskette: | Fachplaner plausibilisiert Alarm, informiert im Alarmfall Ansprechpartner Straßenbauverwaltung | |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Fachplaner, Straßenbauverwaltung | |

Beschreibung des Monitorings

Im Rahmen einer Analyse der rechnerischen Restnutzungsdauer des Spannbetonbauwerks (Bild 1) erfolgte die Festlegung der als kritisch zu betrachtenden Stellen auf Basis von relativen Vergleichen der ermittelten rechnerischen Schädigungsgrade und der rechnerischen Ergebnisse mit dem realen Zustand der Teilbauwerke. In den Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei ermüdungsbedingtem Versagen der unteren Spanngliedlage mit keinem direkten Versagen der nächsten Spanngliedlage zu rechnen ist. Bei Eintreten eines Spanngliedausfalls kann von ausreichend Zeit zur Ergreifung entsprechender Maßnahmen ausgegangen werden kann. Dies setzt jedoch voraus, dass der exakte Zeitpunkt eines möglichen Ausfalles und die expliziten Stellen durch eine entsprechende Überwachung festgestellt werden kann. Als Folge wurde ein Rissmonitoring an den rechnerisch kritischen Koppelfugen mit induktiven Wegaufnehmern und entsprechender Temperaturkompensation vorgesehen. Folgende Fragestellungen sollen über das Monitoring abgedeckt werden:

1. Absicherung der theoretischen Analysen des Zustandes bezüglich der ermittelten rechnerischen Restnutzungsdauer
2. Zugewinn an Erkenntnissen bezüglich des Tragverhaltens des Bauwerks und einer daraus möglichen Anpassung der theoretischen Analysen für eine verbesserte Beschreibung und Abschätzung, z.B. Vergleich der Rissbreitenöffnungen der Innenträger mit den Rissbreitenöffnungen der Randträger bzw. Potenzial des Überbaus hinsichtlich Querverteilung und die daraus resultierenden Konsequenzen in der Bewertung.

3. Kenntnis des Zeitpunktes, ab welchem es zu einer Änderung des Tragverhaltens kommt, um geeignete Maßnahmen entsprechend ergreifen zu können und eine verkehrliche Nutzung des Bauwerks über die angestrebte verbleibende Nutzungsdauer zu ermöglichen.

Mit dem Monitoringsystem soll die Rissentwicklung in den ermüdungstechnisch stark beanspruchten Koppelfugen mit entsprechender Genauigkeit erfasst werden (Bilder 2, 4 und 5). Zur Abschätzung thermisch bedingter Rissentwicklungen wird die Bauteiltemperatur gestaffelt über die Steghöhe und die Lufttemperatur an einem Messort nahe der Bauwerkmitte erfasst (Bilder 3 und 6). Im Fall einer schlagartigen Veränderung der Messgrößen oberhalb eines definierten Grenzwerts wird eine automatisierte Alarmmeldung per E-Mail an den Monitoringverantwortlichen gesendet. Je Fahrtrichtung wird der Verkehrsbereich durch Kameras überwacht, um Messereignisse mit der Verkehrssituation auf den Bildaufnahmen abgleichen zu können. Die Messdaten werden als aggregierte Daten (Minimal-, Maximal- und Mittelwert von 10 Minuten Messabschnitten) stündlich in einem Web-Portal hochgeladen und dem Auftraggeber grafisch in Berichten zur Verfügung gestellt (Bild 7).

Folgerung

Die Nutzung des Bauwerks konnte durch die messtechnische Überwachung ermüdungskritischer Bereiche über das Ende der rechnerischen Restnutzungsdauer hinaus verlängert werden.

Bis zum aktuellen Zeitpunkt konnte keine Verschlechterung des Tragverhaltens und kein plötzliches Eintreten eines Spanngliedausfalls messtechnisch festgestellt werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Ansicht der Vorlandbrücke, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

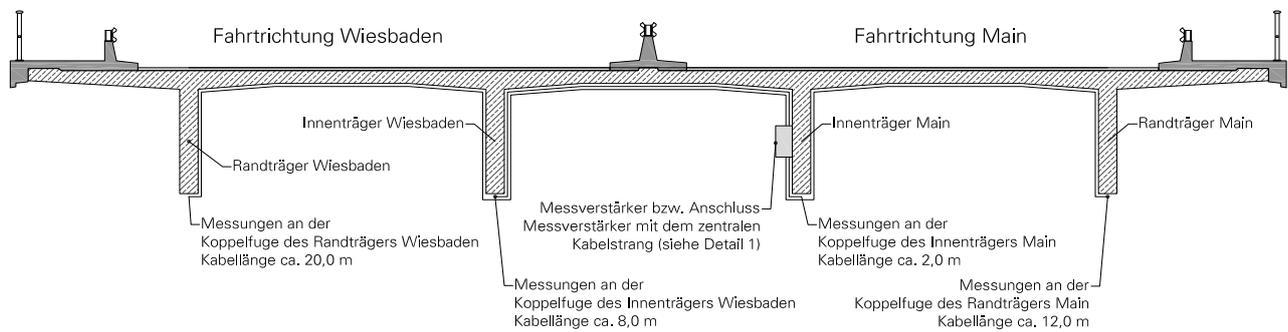


Bild 2: Installationsskizze der Sensorpositionierung und Kabelverlegung am Querschnitt, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

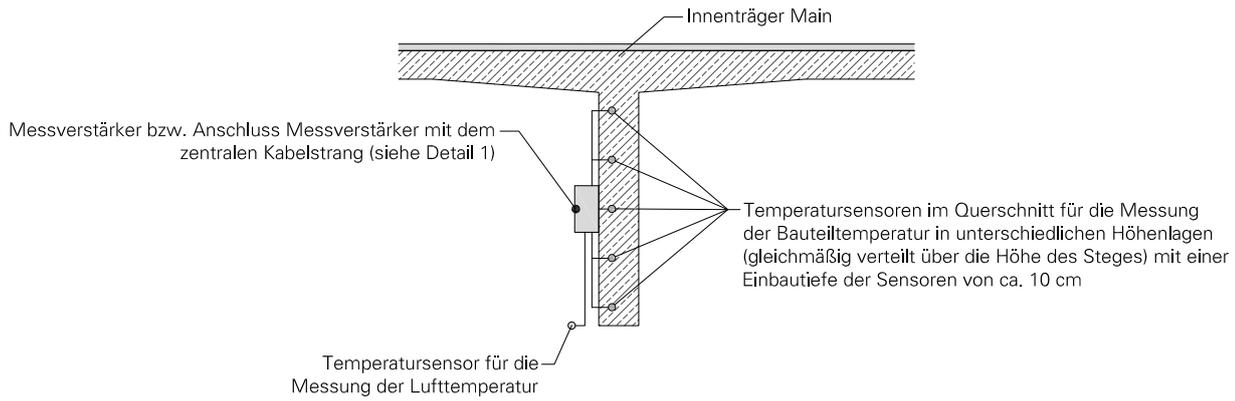


Bild 3: Installationskizze der Bauteiltemperaturmessung am Bauwerk, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

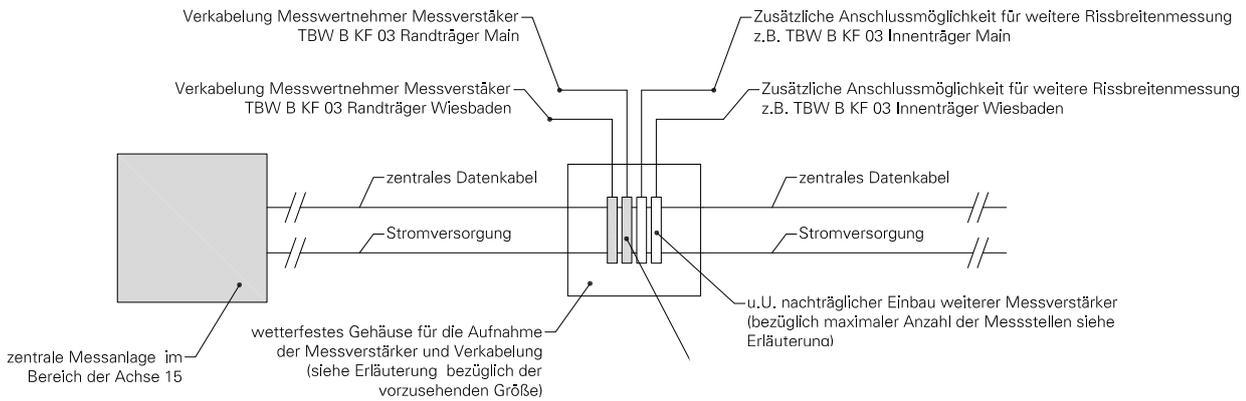


Bild 4: Messsystemarchitektur, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart.



Bild 5: Installation Wegaufnehmer an Unterkante Steg, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

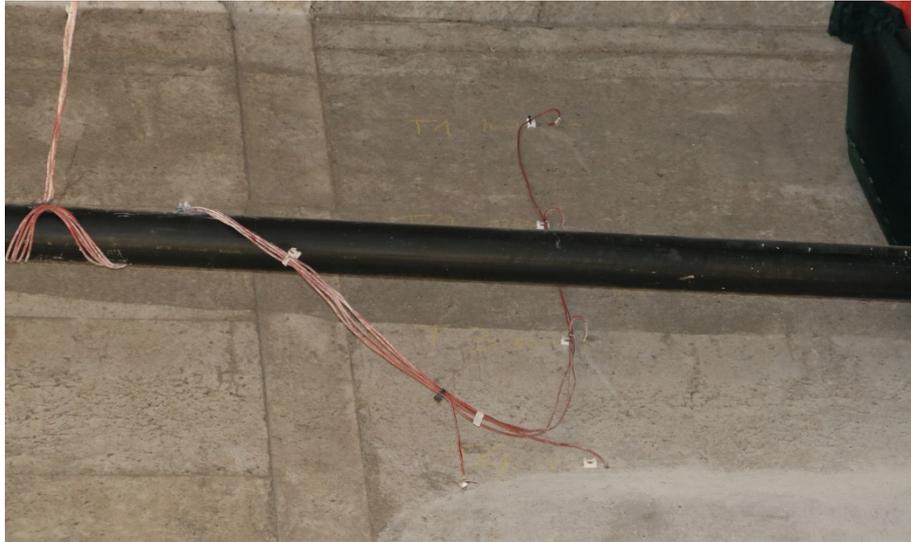


Bild 6: Installation Bauteiltemperaturfühler am Innensteg, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

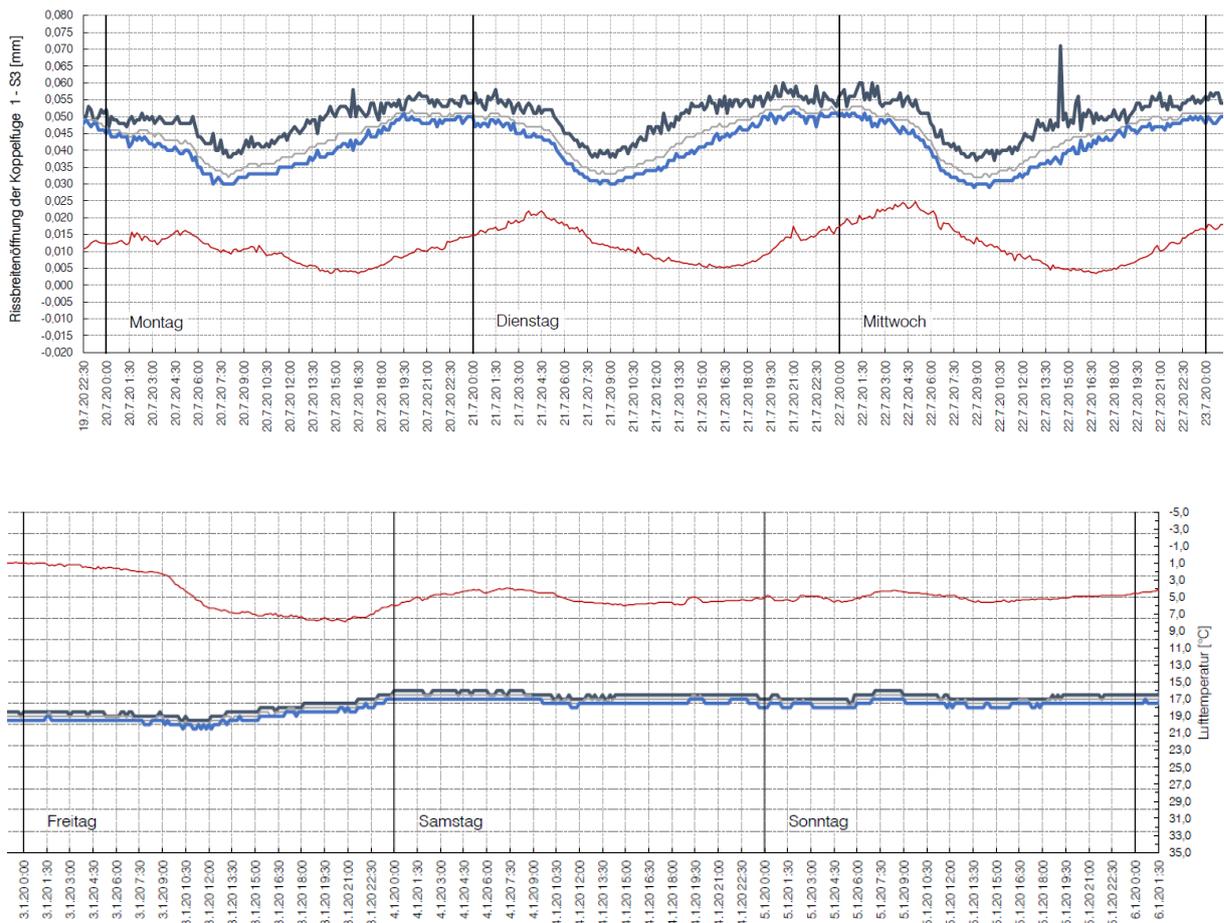


Bild 7: Exemplarische Rissentwicklung über den Messzeitraum von einer Woche, Quelle: ILEK, Universität Stuttgart

Monitoringmaßnahme:	10. Rissbreitenmessung	Lfd. Nr.:	10.3	Blatt:	1
---------------------	------------------------	-----------	------	--------	---

Monitoring 10.3 **Rissmonitoring und integrale Dehnungsmessung mit Wegaufnehmern als Schadensüberwachung**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	38,15 -78,00 – 33,65	m
1.2 Zahl der Felder:	3	
1.3 Brückenfläche:	3625	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	80	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 45 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1954	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	3-feldriges semi-integrales Spannbetonbauwerk
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Hohlkastenbrücke (Freivorbau), Trägerrost im Feldbereich
2.4 System der Lagerung:	Monolithisch in Feldmitte, Elastomerlager am Widerlager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Verjüngende Pfeiler
2.6 Widerlager:	Kastenwiderlager
2.7 Gründung:	Tiefgründung, Pfahlgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Ca. 6 cm Asphaltbelag, bituminöse Abdichtung (alukaschiert)

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450 laut urspr. Berechnung, C70/85 gemäß Messung 2020 an Betonkernen, DYWIDAG Spannstäben Ø26 St 80/105
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B450 laut urspr. Berechnung, C70/85 gemäß Messung 2020 an Betonkernen, gemäß Plan: 300kg Zement/m ³ Beton
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B450 laut urspr. Berechnung, C70/85 gemäß Messung 2020 an Betonkernen, gemäß Plan: 300kg Zement/m ³ Beton
4. Baugrund	Gründung im Uferbereich

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- dokumentiertes Schädigungsbild im Feldbereich
- vorhandene Risse am Spannbetonüberbau
- Verpressfehler, freiliegende Hüllrohre und Korrosion an Spannstäben

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Wegaufnehmer
 - Messbereich Sensortechnik: 5 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: < 0,1 %
 - Temperaturkompensation: Bauteiltemperaturmessung mittels Tauchfühler zur Temperaturkompensation und Abschätzung temperaturbedingter Bauteilverformungen
 - Gesamttechnischer Umfang: Wegaufnehmer, Temperatursensoren, Verkabelung, Messverstärker, Server, Anschluss an das Mobilnetz
- 2. Grund des Monitorings:** Unterstützung der Nachrechnung, Kompensation bei Defiziten
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** Identifikation fortschreitender Schädigung
4 integrale Dehnungsmessungen mit Messlänge von 2m,
4 Rissensoren,
2 Wegmessungen als Temperaturkompensation,
2 Temperatursensoren (Tauchfühler),
Feldbereich
- 4. Messort am Bauwerk:**
- 5. Installationsbereich:** Integrale Dehnung: Unterkante Hohlkasten
Rissmonitoring: seitenflächen Hohlkasten
- 6. Installationsart:** Integrale Dehnungsmessung: Feste Halterung
Rissmonitoring: aufgeschraubte Halterung
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 230.000,00 €
 - Planungskosten: 20.000,00 €
 - Installationskosten: 51.500,00 €
 - Betriebskosten: 24.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** Sukzessive Inbetriebnahme von 2015 bis 2017
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, 2005-2015 mit faseroptischer Messung der Dehnung
Dauermonitoring, 2015 (Ersatz des Monitorings) bis ENB
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Tragwerksplaner und Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Tragwerksplaner
 - Ausführungsplanung Messsystem: Tragwerksplaner und Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen (Dienstleister für Bauwerksprüfung*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Datenaufbereitung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*), Tragwerksplaner

Monitoringmaßnahme:	10. Rissbreitenmessung	Lfd. Nr.:	10.3	Blatt:	3
----------------------------	-------------------------------	------------------	-------------	---------------	----------

- Bewertung der Messergebnisse:
 - Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*):
 - Kontrolle der Messwerte innerhalb vorgegebener Grenzen,
 - Tragwerksplaner:
 - vertiefte Auswertung

Informationsgewinn und Datenmanagement

1. **Ziel der Messung:** Überwachung von Verformungen und Rissentwicklungen bei bekannter Schädigung (Spannstahlkorrosion und Rissbildung) zur frühzeitigen Detektion von Zustandsveränderungen
2. **Messgrößen:**
 - Integrale Wegmessung (Feld): 10 mm
 - Wegmessung (Riss): 5 mm
 - Temperatur: -30 bis +80 °C
3. **Abtastrate:**
 - Integrale Wegmessung (Feld): 100 Hz
 - Wegmessung (Riss): 100 Hz
 - Temperatur: 100 Hz
4. **Frequenz Datenaufzeichnung:**
 - Integrale Wegmessung (Feld): Innerhalb Monat 1-2:
* 10 Hz zur Bestimmung des Verkehrsprofils, Dauermonitoring:
* 10 min (Mittel)
 - Wegmessung (Riss): *Gemäß Integraler Wegmessung (Feld)*
 - Temperatur: *Gemäß Integraler Wegmessung (Feld)*
5. **Frequenz Datenauswertung:** Nach Monat 1-2 zur Bestimmung des Verkehrsprofils, danach jährlich (sofern keine Alarmmeldung erfolgt)
5. **Daten:**
 - Integrale Wegmessung (Feld): Innerhalb Monat 1-2:
* Momentanwerte bei 10 Hz Abtastrate; Dauermonitoring:
* 10 min Minimal-, Maximal-, Mittelwerte; Überprüfung der Restnutzungsdauer vom 10.09.2020 - 12.10.2022:
* Momentanwerte bei 10 Hz Abtastrate
 - Wegmessung (Riss): *Gemäß Integrale Wegmessung (Feld)*
 - Temperatur: *Gemäß Integrale Wegmessung (Feld)*
6. **Datenformat:** ASCII
7. **Datenerfassung:** Firmeneigene Datenmanagementstruktur
8. **Datenübertragung:** Automatische Übertragung der Daten an eine externe Stelle über Funk oder Internet, Upload auf Online Plattform
9. **Datenmanagementsystem:** TÜV-Rheinland Datenbankserver
10. **Datenauswertung:**
 - Prozess: Excel, Auswertung nach Rainflow-Methode und Fourierreihenanalyse der 10 Hz Messdaten durch Tragwerksplaner
 - Ausgabe: Grafische Ausgabe, Diagramme

Monitoringmaßnahme:	10. Rissbreitenmessung	Lfd. Nr.:	10.3	Blatt:	5
<p>11. Datenverwendung:</p> <p>12. Alarmierungsplan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Grenzwert: - Alarmierungskette: - Zuständigkeit im Alarmfall: 	<p>Bestimmung des Verkehrsprofils, Abgleich der rechnerischen Annahmen der Nachrechnung, Identifikation fortschreitender Schädigung</p> <p>Vorhanden</p> <p>Intergrale Wegmessung: ± 0,3mm / Eingreifwert ± 0,5mm; Rissweite: ± 0,2mm / Eingreifwert ± 0,4mm</p> <p>Spezialdienstleister für Bauwerksmessung → Tragwerksplaner → Regierungspräsidium</p> <p>Spezialdienstleister für Bauwerksmessung → Tragwerksplaner → Regierungspräsidium</p>				
184	Brücken- und Ingenieurbau	Erfahrungssammlung „Monitoring für Brückenbauwerke“			

Beschreibung des Monitorings

Bei der semiintegralen Spannbetonbrücke (Bild 1) konnten im Zuge der Bauwerksprüfung Risse festgestellt werden, welche sich auf die Unterschätzung der Kriechzahl (Rechnung =1,0; EN1992-~2.5) beim Freivorbau und der damit verbundenen Lastumlagerung in Feldmitte, den Fortschritt der Korrosionsschädigung des Spannstahls und daraus resultierende mögliche Spannstahlbrüche zurückführen lassen. Zur Überwachung der vorhandenen Schäden bzw. zur Überwachung der Rissentwicklung wurden an den Schadensstellen Wegsensoren installiert. Bei maßgebender Schadensentwicklung bspw. durch den Ausfall einzelner Spannstäbe wird von einer Zunahme der Verformung im Feldbereich ausgegangen. Zur Überwachung der Verformungen des Feldbereichs wurden an den Hohlkästen in Feldmitte integral verlängerte Wegaufnehmer installiert (Bilder 3 bis 6). Die integrale Dehnungsmessung ersetzt seit dem Jahr 2015 die faseroptische Dehnungsmessung (Bild 2).

Die Bewegungen des Bauwerks werden über einen einseitig fest mit dem Bauwerk verbundenen 2 m langen Stab aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff auf den Wegaufnehmer übertragen. Die Dehnung des über 2 m überbrückten Messbereichs wird als integrale Dehnung erfasst. Die Rissentwicklung der bekannten Risse in den rechnerisch kritischen Bereichen werden mit Wegaufnehmern mit einem Messbereich von 5 mm überwacht (Bild 6).

Für die integrale Dehnungsmessung und Überwachung der Rissweite wurden Grenzwerte definiert, bei deren Überschreitung ein automatisierter Alarm per E-Mail und SMS an den Betreiber der Messanlage versandt wird. Nach Plausibilisierung des Alarms in Rücksprache mit dem Tragwerksplaner erfolgt eine Benachrichtigung des Regierungspräsidiums.

Folgerung

Durch die Messung der integralen Dehnung in Feldmitte und Überwachung der Rissentwicklung konnte eine Ermittlung der tatsächlichen Verkehrsbelastung durch Abgleich der Kalibrierwerte aus den Probeüberfahren erfolgen. Infolge dessen wurde das Verkehrsprofil des Ermüdungsnachweises im Zuge der Nachrechnung angepasst.

Über die integrale Dehnungsmessungen und Rissweitenmessung konnte zusätzlich die Mitwirkung der einzelnen Hohlkästen ermittelt werden. Über die Messergebnisse folgte ein Abgleich des rechnerischen Tragwerksverhaltens mit den tatsächlichen Tragwerksverformungen im Feldbereich.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Unteransicht Bauwerk und Positionierung Messzentrale,
Quelle: Konstruktionsgruppe Bauen AG, Kempten, Projekt-ID 12-1-432



Bild 2: Messeinrichtung bis 2015 (ohne Verkleidung), Quelle: Konstruktionsgruppe
Bauen AG, Kempten, Projekt-ID 12-1-432



Bild 3: Seitenansicht integraler Dehnungsmessung mit CFK-Stange, Quelle: Konstruktionsgruppe Bauen AG, Kempten, Projekt-ID 12-1-432



Bild 4: Ansicht integraler Dehnungsmessung mit CFK-Stange, Quelle: Konstruktionsgruppe Bauen AG, Kempten, Projekt-ID 12-1-432



Bild 5: Integrale Messung, Anschluss Wegaufnehmer an CFK-Stange,
Quelle: LGA Bautechnik GmbH, Niederlassung Nürnberg



Bild 6: Integrale Messung, Anschluss Wegaufnehmer an Carbonstange,
Quelle: Konstruktionsgruppe Bauen AG, Kempten, Projekt-ID 12-1-432

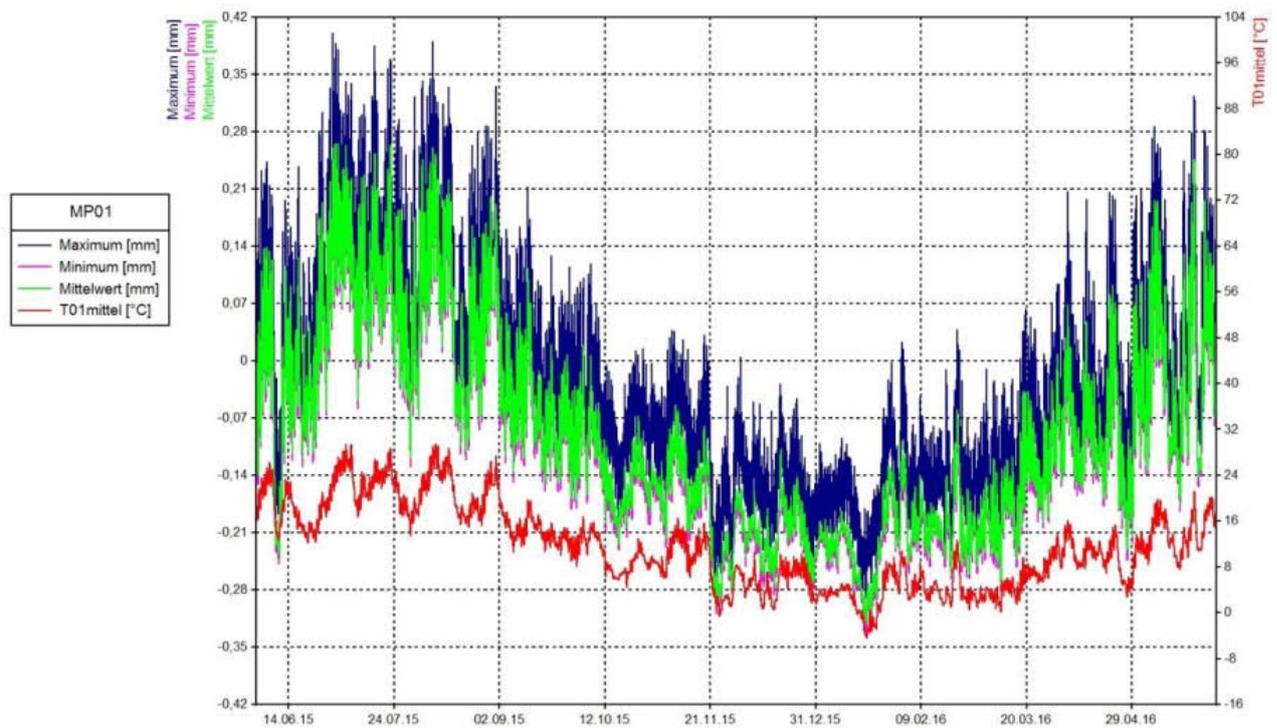


Bild 7: Exemplarischer Messwertgraph der integralen Dehnung,
Quelle: LGA Bautechnik GmbH, Niederlassung Nürnberg

Monitoringmaßnahme:	10. Rissbreitenmessung	Lfd. Nr.:	10.4	Blatt:	1
---------------------	------------------------	-----------	------	--------	---

Monitoring 10.4 Koppelfugenmonitoring mit Wegaufnehmern bei plötzlich auftretender Rissbildung

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	63,00 – 86,00 – 63,00	m
1.2 Zahl der Felder:	3	
1.3 Brückenfläche:	2440	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	36	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 45 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1977	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Hohlkastenbrücke gevoutet
2.4 System der Lagerung:	Gleitlager mit Topflager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rundstützen, massiv
2.6 Widerlager:	Massivwand
2.7 Gründung:	Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtet

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B250
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B250
4. Baugrund	Gründung im Uferbereich

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Rissbildung an den Koppelfugen

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Induktiver Wegaufnehmer (Linear Potentiometer)
 - Messbereich Sensortechnik: ± 25 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: $\pm 0,25$ %
 - Temperaturkompensation: Temperatursensor an Innen- und Außenbereich des Querschnitts
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensor, 12-Kanal Datenlogger mit internem Messwertspeicher und Fernabfragemodul, Schaltschrank
- 2. Grund des Monitorings:** Unterstützung der Nachrechnung, Kompensation bei Defiziten, Identifikation fortschreitender Schädigung
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 8 Wegaufnehmer
2 Temperatursensoren
- 4. Messort am Bauwerk:** Koppelfugen
- 5. Installationsbereich:** Innen- und Außenseiten der Hohlkastenstege
- 6. Installationsart:** Geschraubt
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 15.000,00 €
 - Planungskosten: *In Installationskosten enthalten* €
 - Installationskosten: 10.000,00 €
 - Betriebskosten: 5.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** Februar 2020
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, seit 2020 bis voraussichtlich 2023
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Dienstleister für Bauwerksmonitoring und Bauwerksprüfung*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1. Ziel der Messung: | Messung der Rissentwicklung im Bereich der Koppelfugen |
| 2. Messgrößen: | |
| - Wegmessung: | 50 mm |
| - Temperatur: | -30 bis +60 °C |
| 3. Abtastrate: | |
| - Wegmessung: | 100 Hz |
| - Temperatur: | 10 min |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Wegmessung: | 10 min |
| - Temperatur: | 10 min |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Stündliche automatisierte Auswertung und Upload auf das Webportal |
| 5. Daten: | |
| - Wegmessung: | Momentanwert |
| - Temperatur: | Momentanwert |
| 6. Datenformat: | *.csv und *.xlsx |
| 7. Datenerfassung: | Datenlogger |
| 8. Datenübertragung: | Automatische Übertragung der Daten an eine externe Stelle über Funk oder Internet, Upload auf Webportal |
| 9. Datenmanagementsystem: | Interner Server und Webportal des Auftragnehmers |
| 10. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Programmentwicklung des Betreibers |
| - Ausgabe: | Grafische Ausgabe, Diagramme |
| 11. Datenverwendung: | Überwachung vorhandener Schäden |
| 12. Alarmierungsplan: | |
| - Grenzwert: | - |
| - Alarmierungskette: | - |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Spezialdienstleister für Bauwerksmessung |

Beschreibung des Monitorings

Mit einem aktuellen Bauwerksalter von 45 Jahren befindet sich das Bauwerk (Bild 1) in der zweiten Nutzungsphase. An den Koppelfugen im Mittelfeld sind in der Vergangenheit Risse aufgetreten. Um einen Rückschluss auf deren Ursache ziehen zu können, sollte messtechnisch beobachtet werden, ob und in welchem Umfang weitere Verformungen an den Koppelfugen auftreten. Als mögliche Schadensursachen wurden im Vorfeld durch ein Ingenieurbüro folgende Möglichkeiten in Betracht gezogen:

1. Zwängungen durch Temperatur
2. Zwängungen durch behinderte Lagerreibung
3. Ermüdung und Ausfall von Spanngliedern im Bereich der Koppelfugen
4. Ausfall der schlaffen Bewehrung im Bereich der Koppelfuge

Je Koppelfuge wurden 2 Sensoren an den Innen- und Außenseiten der jeweiligen Hohlkastenstege installiert (Bilder 2 und 3). Zusätzlich wurde im Hohlkasten und außerhalb des Hohlkastens jeweils ein Lufttemperatursensor installiert. Das Monitoring wurde als Langzeitmonitoring für ca. 3 Jahre ausgelegt.

Folgerung

Ein signifikanter Schadensfortschritt oder Bauteilversagen konnte ausgeschlossen werden (Bild 4).

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Seitenansicht Bauwerk, Quelle: Regierungspräsidium Stuttgart



Bild 2: Wegaufnehmer an Koppelfuge, Quelle: Regierungspräsidium Stuttgart

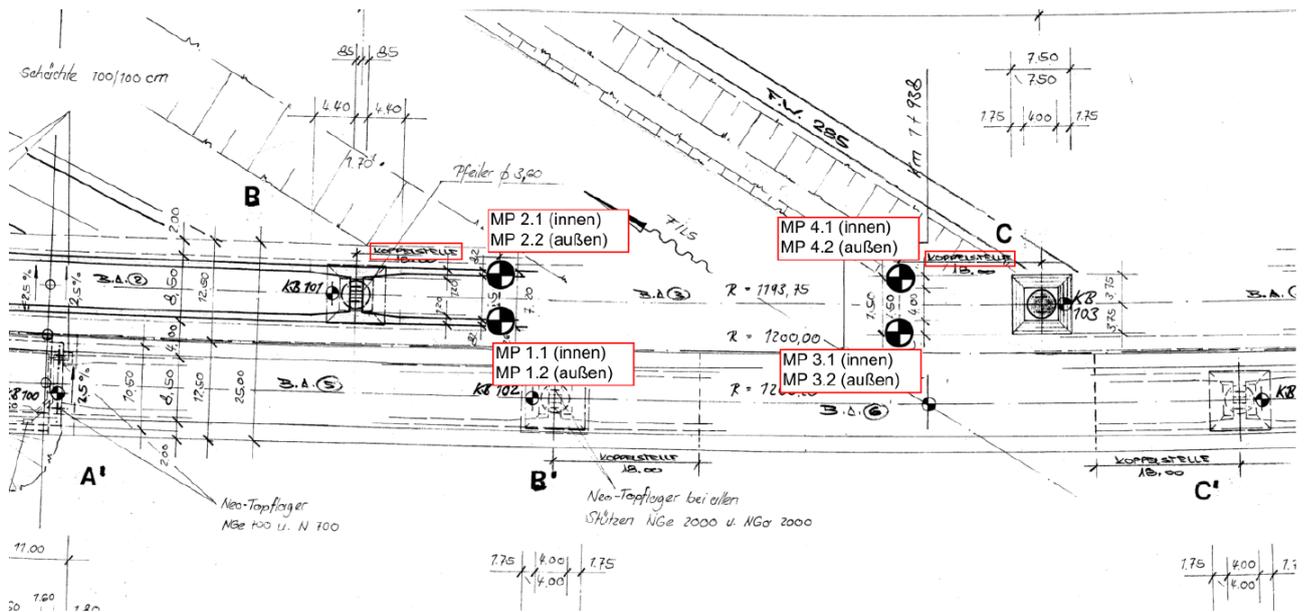


Bild 3: Skizze Installation Messsystem, Quelle: intermetric GmbH

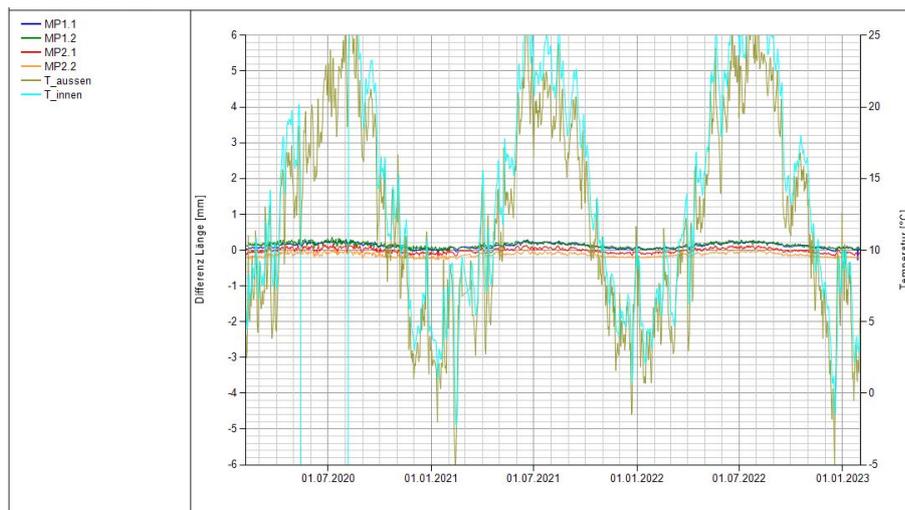


Bild 4: Exemplarischer Messwertgraph der Weg- und Temperaturmessung über eine Messperiode von ungefähr 2,5 Jahren, Quelle: intermetric GmbH

Monitoringmaßnahme:	10. Rissbreitenmessung	Lfd. Nr.:	10.5	Blatt:	1
---------------------	------------------------	-----------	------	--------	---

Monitoring 10.5 Schadensmonitoring zweier markanter Risse mit Wegaufnehmern

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	16,07 – 31,62 – 16,07	m
1.2 Zahl der Felder:	3	
1.3 Brückenfläche:	1600	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	90,8	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1962	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Stahlbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken
2.4 System der Lagerung:	Rollenlager, Beton-Pendelstütze, Linienkipplager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rundstützen
2.6 Widerlager:	-
2.7 Gründung:	Tiefgründung, Rammfähle (Frankipfahl)
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Stahlbeton: B450 nach DIN 1045 bis 1972
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B450 nach DIN 1045 bis 1972
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B225 nach DIN 1045 bis 1972

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Defizite in der Querkrafttragfähigkeit (Bewehrungsdefizit) nach heutigen Bemessungsnormen
- Defizite in der konstruktiven Ausführung (Längenverhältnis von Randfeld zu Mittelfeld)
- Bestätigung der Ergebnisse der Nachrechnung anhand beidseitig verlaufende Schrägrisse in den Hauptträgern
- Feststellung eines Risswachstums im Zuge von Sonderprüfungen von 0,4 mm auf 0,6 mm innerhalb von 1 bis 2 Jahren

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Induktiver Wegaufnehmer (Linear Potentiometer)
 - Messbereich Sensortechnik: ± 5 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: - %
(Messauflösung 0,001 mm)
 - Temperaturkompensation: Messung der Außenlufttemperatur
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Monitoringstation, UMTS-Router, VPN-Verbindung, Datenbankserver, Solarpanel zur Stromversorgung, Schutz gegen Vandalismus
Überwachung von zwei markanten Rissen
- 2. Grund des Monitorings:**
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 2 Wegaufnehmer
1 Temperatursensoren (Außenlufttemperatur)
- 4. Messort am Bauwerk:** Schrägrisse an den Hauptträgern
- 5. Installationsbereich:** Seitenfläche Hauptträger
- 6. Installationsart:** Mittels Schrauben und Dübeln verankert
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 12.000,00 €
 - Planungskosten: - €
 - Installationskosten: 8.000,00 €
 - Betriebskosten: 4.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 1 Werktag, 2012
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, Dezember 2012 bis Januar 2016
(durch ENB ersetzt)
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung
(*Dienstleister für Bauwerksprüfung)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Datenaufbereitung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | | |
|-----|------------------------------------|--|-----|
| 1. | Ziel der Messung: | Überwachung zweier markanter Risse | |
| 2. | Messgrößen: | | |
| | - Wegmessung: | ± 5 | mm |
| | - Temperatur: | 20 bis +60 | °C |
| 3. | Abtastrate: | | |
| | - Wegmessung: | 100 | Hz |
| | - Temperatur: | 100 | Hz |
| 4. | Frequenz Datenaufzeichnung: | | |
| | - Wegmessung: | 1 | min |
| | - Temperatur: | 1 | min |
| 5. | Frequenz Datenauswertung: | Stündliche automatisierte Auswertung und Upload auf das Webportal | |
| 5. | Daten: | | |
| | - Wegmessung: | Minimal-, Maximal- und Mittelwert | |
| | - Temperatur: | Minimal-, Maximal- und Mittelwert | |
| 6. | Datenformat: | *.csv, *.xlsx | |
| 7. | Datenerfassung: | Datensicherung vor Ort | |
| 8. | Datenübertragung: | Stetig wachsende Datenbank, Upload auf Webportal | |
| 9. | Datenmanagementsystem: | Interner Server und Webportal des Auftragnehmers | |
| 10. | Datenauswertung: | | |
| | - Prozess: | Programmentwicklung des Betreibers | |
| | - Ausgabe: | Quartalsberichte | |
| 11. | Datenverwendung: | Kontrolle und frühzeitige Detektion von Änderungen im Tragwerksverhalten | |
| 12. | Alarmierungsplan: | | |
| | - Grenzwert: | 1,0 mm Rissbreite | |
| | - Alarmierungskette: | Per E-Mail und SMS → Spezialdienstleister für Bauwerksmessung → Straßenbauverwaltung | |
| | - Zuständigkeit im Alarmfall: | Straßenbauverwaltung, Spezialdienstleister für Bauwerksmessung | |

Beschreibung des Monitorings

Das Bauwerk (Bild 1) wurde 1961 errichtet und gehört damit zu den frühen Spannbetonbauwerken in Deutschland. Im Rahmen einer Nachrechnung im Jahr 2011 wurde nach den derzeitigen Erkenntnissen und Berechnungsverfahren neben der Feststellung eines Defizites in der konstruktiven Ausführung (Längenverhältnis von Randfeld zu Mittelfeld) zusätzlich auch ein Bewehrungsdefizit für Schubbeanspruchung festgestellt. Die Ergebnisse der Nachrechnung konnten anhand von bereits bekannten Bauwerksschäden aus der einfachen Prüfung aus dem Jahr 2009 (beidseitig verlaufende Schrägrisse an den Hauptträgern) bestätigt werden. Aufgrund der bereits bekannten Schäden und der verbleibenden rechnerischen Restnutzungsdauer von 10 Jahren wurde eine Sonderprüfung veranlasst. Dabei konnte innerhalb von ein bis zwei Jahren ein Risswachstum von 0,4 mm auf 0,6 mm festgestellt werden.

Die Erkenntnisse aus der Nachrechnung, der durchgeführten Bauwerksprüfungen und einer wirt-

schaftlichen Betrachtung von geeigneten Maßnahmen führten dazu, dass der Entschluss gefasst wurde, das Bauwerk bis Ende 2013 durch einen Ersatzneubau zu ersetzen.

Zusätzlich wurde aufgrund des schnellen Risswachstums eine halbjährliche Sonderprüfung und ein Rissmonitoring veranlasst, um zum einen die Entstehung weiterer Risse zu überprüfen und zum anderen durch die Überwachung der Rissentwicklung die Verkehrssicherheit zu gewährleisten (Bilder 2 und 3). Es handelte sich hierbei um eine Langzeitmessung bis zur Außerbetriebnahme des Bauwerkes.

Die messtechnische Anlage wurde für eine Nutzungsdauer von einem Jahr ausgelegt. Die Straßenbauverwaltung hat über ein Internetportal Zugriff auf die Messdaten und Datenvisualisierung.

Folgerung

Über die Rissüberwachung konnte die Verkehrssicherheit bis zur Außerbetriebnahme gewährleistet werden. Die Entwicklung bekannter Defizite und Schäden konnten über das Verhalten des Risses aufgrund von temporären verkehrs- und temperaturbedingten Lasten, sowie die daraus folgenden dauerhaften Veränderung (Rissbreitenwachstum)

beschrieben werden. Hierbei lieferte das Monitoring eine Ergänzung der Bauwerksprüfung, da das Monitoringsystem eine detailliertere Dokumentation der Rissentwicklung bietet, als es durch die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 möglich ist.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Seitenansicht des Bauwerkes, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes Niederlassung West



Bild 2: Montierter Dehnmessstreifen am Schrägriss, Quelle: TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH

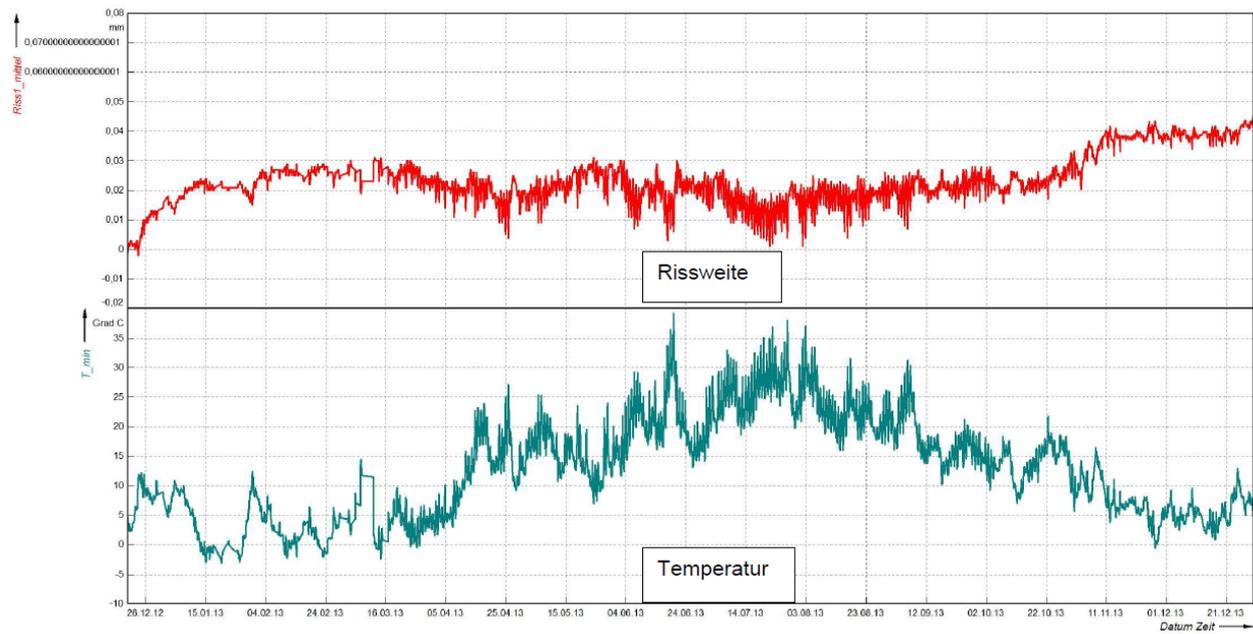


Bild 3: Rissentwicklung über die Messperiode von einem Jahr, Quelle: TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH

Monitoringmaßnahme:	10. Rissbreitenmessung	Lfd. Nr.:	10.6	Blatt:	1
---------------------	------------------------	-----------	------	--------	---

Monitoring 10.6 Schadensmonitoring kritischer Rissentwicklungen bei rechnerischen Defiziten und Überprüfung der Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	22,00 – 22,50 – 23,50 – 25,00 – 27,00 – 29,50 – 32,50 – 36,00 – 40,00 – 56,00 – 40,00 – 36,00 – 30,00 – 25,00 – 21,00 – 18,00	m
1.2 Zahl der Felder:	16	
1.3 Brückenfläche:	6679	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 30/30 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1960	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Hohlkasten, Torsionssteifer Balken
2.4 System der Lagerung:	Gleitlager mit Topflager; Rollenlager ohne besondere Kippvorrichtung; Gelenke; Feste Lager an Auflagerbank
2.5 Pfeiler / Stützen:	Vollquerschnitt
2.6 Widerlager:	Widerlager, Massivwand
2.7 Gründung:	Flachgründung, Streifenfundamente
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450 nach DIN 1045 bis 1972
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B450 nach DIN 1045 bis 1972
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B225 nach DIN 1045 bis 1972

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Feststellung von Rissweitenänderungen im Zuge der Bauwerksprüfung

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Induktive Wegaufnehmer
 - Messbereich Sensortechnik: ± 10 mm
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,01 mm
 - Temperaturkompensation: Messung der Luft- und Bauteiltemperatur
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren inkl. Messverstärker, Datenlogger mit Schutzgehäuse
- 2. Grund des Monitorings:** Überwachung der Rissentwicklung
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 14 Induktive Wegaufnehmer
4 Widerstandsthermometer (Bauteiltemperatur)
3 Widerstandsthermometer (Lufttemperatur)
- 4. Messort am Bauwerk:** Kritische Risse im Stütz- und Feldbereich
- 5. Installationsbereich:** Bodenplatte und Innen- und Außenstege des Hohlkastens, Außenbereich Hohlkasten
- 6. Installationsart:** Geschraubt, geklebt
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 70.110,34 €
 - Planungskosten: - €
 - Installationskosten: - €
 - Betriebskosten: - €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: - €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 5 Werktage, 2013
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2013
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Straßenbauverwaltung
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (Ingenieur- und Vermessungsbüro*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Straßenbauverwaltung

Informationsgewinn und Datenmanagement

1. **Ziel der Messung:** Erfassung der Rissweitenänderungen, Bewertung von Anomalien und Schäden, Frühzeitige Detektion von Schadensfällen und Strukturveränderungen
2. **Messgrößen:**
 - Wegmessung: $\pm 0,1$ mm
 - Temperatur: -50 bis 200 °C
3. **Abtastrate:**
 - Wegmessung: 1/900 Hz
(im Rahmen der Kalibrierung bis 10 Hz)
 - Temperatur: 1/900 Hz
4. **Frequenz Datenaufzeichnung:**
 - Wegmessung: Datenspeicher 1:
für 24 Stunden alle 15 sec/Messwert
Datenspeicher 2:
für 168 Stunden alle 10 min/Messwert
Datenspeicher 3:
alle Daten, Intervall 4 Std. /Messwert
 - Temperatur: entsprechend Wegmessung min
5. **Frequenz Datenauswertung:** 15 min
5. **Daten:**
 - Wegmessung: Minimal-, Maximal-, Mittelwert
 - Temperatur: Minimal-, Maximal-, Mittelwert
6. **Datenformat:** *.csv
7. **Datenerfassung:** Messwarterfassung über Datenlogger
8. **Datenübertragung:** Datenübertragung per Mobilfunk in Web-Portal und auf FTP-Server
9. **Datenmanagementsystem:** Stetig wachsende Datenbank
10. **Datenauswertung:**
 - Prozess: Darstellung der Messwerte im Trendchart YX, Tabelle und CSV Export
 - Ausgabe: Wöchentliche Berichte im PDF-Format, graphische und tabellarische Ausgabe der Messwerte
11. **Datenverwendung:** Überwachung von Schäden, Messtechnische Ergänzung der Nachrechnung
12. **Alarmierungsplan:**
 - Grenzwert: $\Delta 0,1$ mm im Tagesverlauf
 - Alarmierungskette: In Melde- und Alarmplan geregelt
 - Zuständigkeit im Alarmfall: Rufbereitschaft des externen Ingenieurbüros, Straßenbauverwaltung

Beschreibung des Monitorings

Die Brücke (Bild 1) ist aufgrund der festgestellten rechnerischen Defizite in der Tragfähigkeit im Zuge einer statischen Nachrechnung seit Juli 2012 für den genehmigungspflichtigen Schwertransport gesperrt. In Untersuchungen konnten Bauwerksschäden wie Trennrisse im Beton in der Bodenplatte des Hohlkastens festgestellt werden. Seit Anfang Juni 2013 wird der Verkehr je Richtungsfahrbahn nur noch einstreifig befahren. Gleichzeitig erfolgte zur Überwachung des Tragwerkszustands und des Schädigungsfortschritts die Installation eines kontinuierlichen Rissmonitorings mit 14 induktiven Wegaufnehmern inkl. Temperaturkompensation. Die Wegaufnehmer wurden an den dokumentierten kritischen Rissen zur Überwachung der Rissentwicklung an der Bodenplatte und den Stegen des Hohlkastens installiert (Bild 3). Zur Abschät-

zung temperaturbedingter Rissentwicklungen wird die Bauteiltemperatur an 4 verschiedenen Stellen an der Innenseite der Stege mit Widerstandsthermometern gemessen (Bilder 2 und 3). Die Widerstandsthermometer sind 6 cm tief in das Bauteil eingelassen.

Die Monitoringleistung wurde in der Ausschreibung in einem detaillierten Leistungskatalog definiert. Als Gesamtleistung wurde der Betrieb des Monitoringsystems und die Bereitstellung der Messdaten festgelegt. Die Bewertung der Messdaten erfolgt durch die Straßenbauverwaltung. Der Monitoringdienstleister stellt hierzu die ausgewerteten Daten in Form von Wochenberichten zur Verfügung.

Folgerung

Zur Gewährleistung der Tragfähigkeit und sicheren Nutzung während des Planungs- und Bauzeitraumes bis zur Inbetriebnahme des Ersatzneubaus wurde die Brücke mit einer externen Vorspannung verstärkt. Die Rissweitenänderungen bzw. das Schließen der Risse bei Aufbringen der externen Vorspannung konnte durch das Monitoringsystem aufgezeichnet werden, so dass die Wirksamkeit

der Maßnahme eindeutig nachgewiesen wurde (Bilder 4 und 5).

Das Monitoring wird auch nach erfolgter Verstärkung zur frühzeitigen Erkennung von Veränderungen des Tragverhaltens der Brücke weiter in Betrieb gehalten.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Ansicht des verstärkten Bauwerks, Quelle: Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr

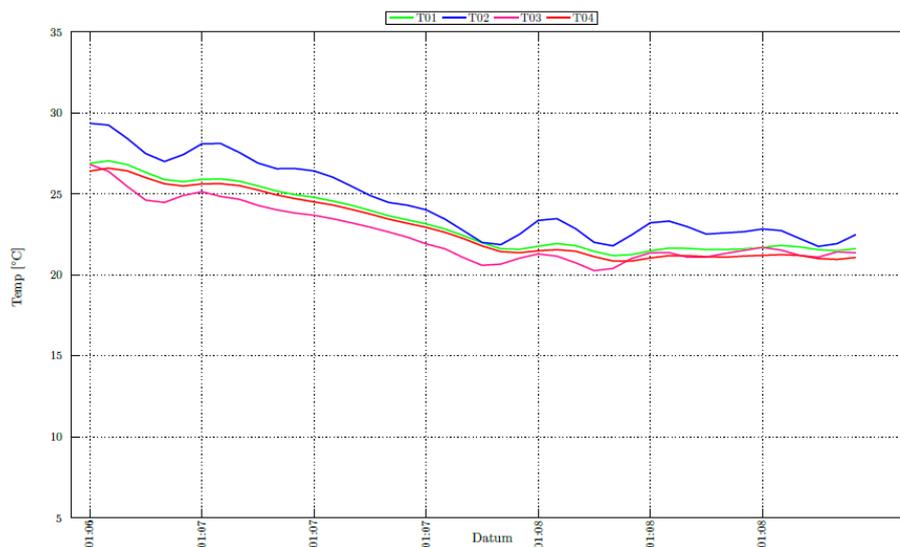


Bild 2: Exemplarischer Messwertgraph der Bauteiltemperatur für die Messperiode von einer Woche, Quelle: Ingenieurbüro Drecoll

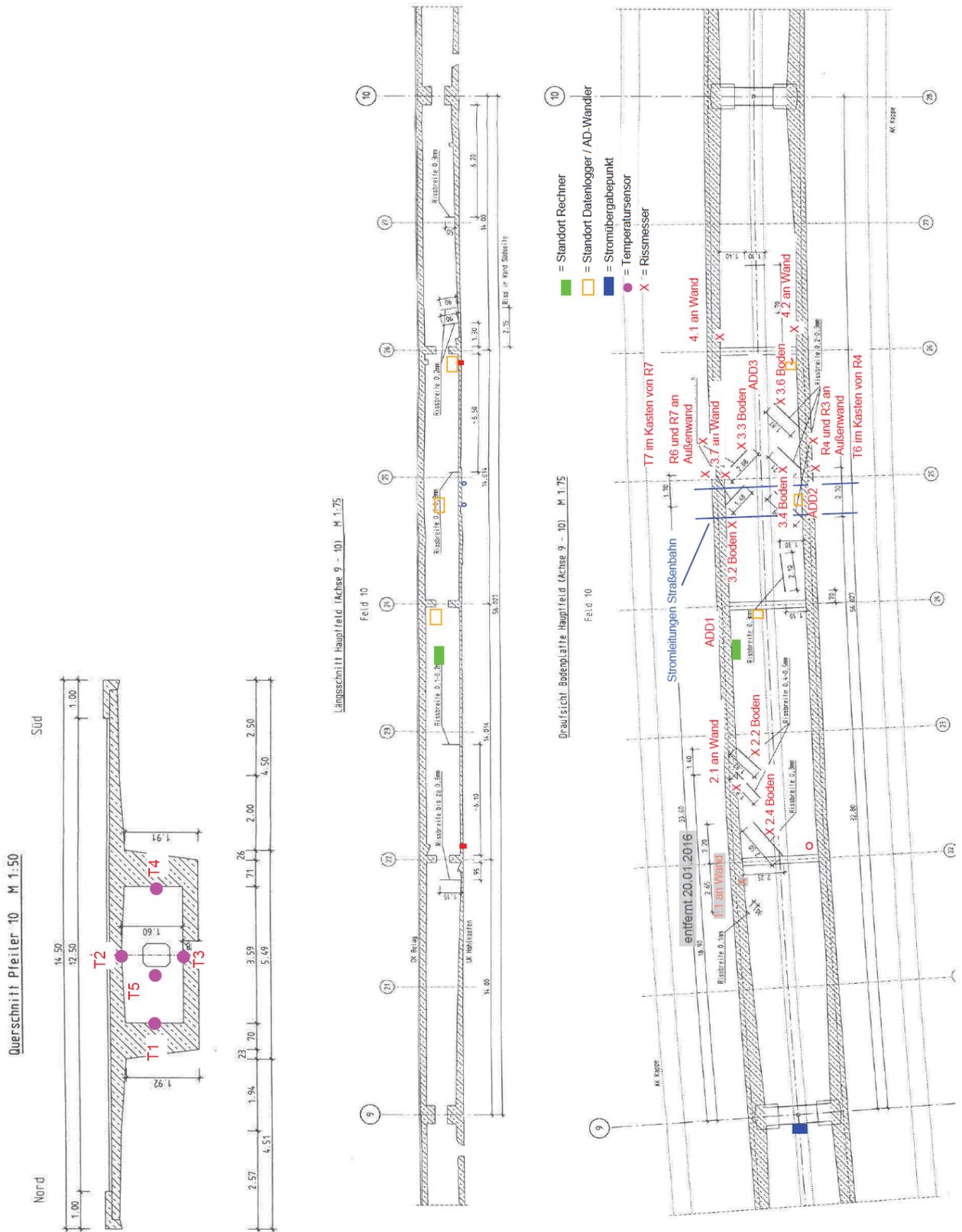


Bild 3: Längsschnitt, Querschnitt und Draufsicht der Anordnungsskizze der Messtechnik, Quelle: Ingenieurbüro Drecoll

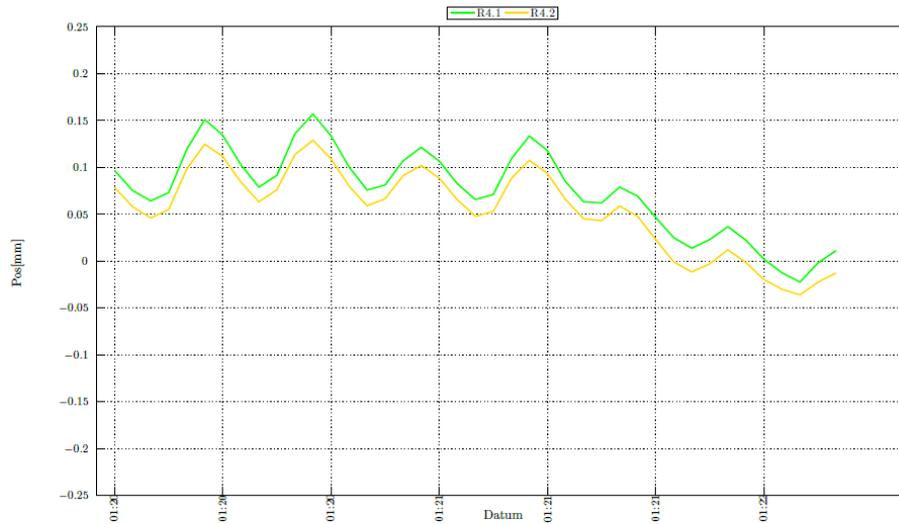


Bild 4: Exemplarischer Messwertgraph der Rissentwicklung vor der Verstärkungsmaßnahme über eine Messperiode von einer Woche, Quelle: Ingenieurbüro Drecoll

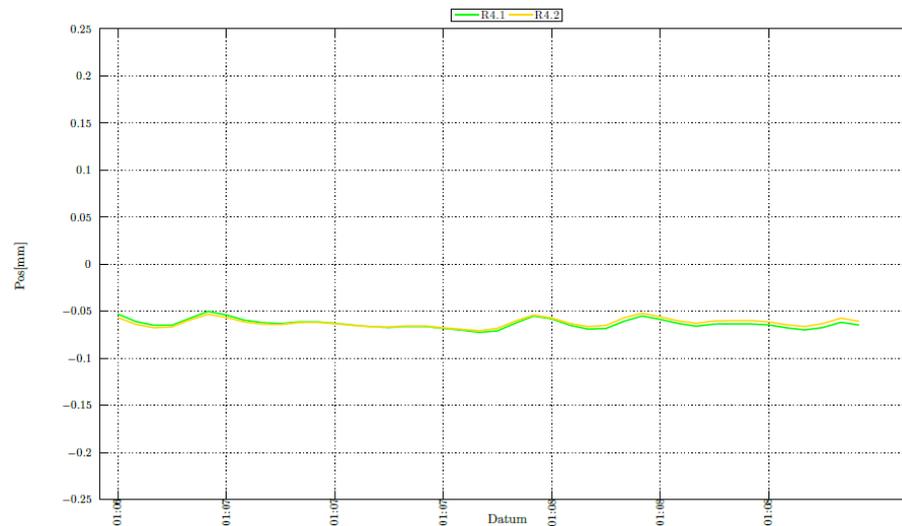


Bild 5: Exemplarischer Messwertgraph der Rissentwicklung nach der Verstärkungsmaßnahme über eine Messperiode von einer Woche, Quelle: Ingenieurbüro Drecoll

Monitoring 10.7 Koppelfugenmonitoring als Kompensationsmaßnahme bei rechnerischen Defiziten

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	26,00 – 36,00 – 36,00 – 36,00 – 36,00 – m 36,00 – 36,00 – 36,00 – 36,00 – 36,00 – 36,00 – 30,00 – 30,00 – 38,00 – 28,00 – 27,00	
1.2 Zahl der Felder:	16	
1.3 Brückenfläche:	7981	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 45 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1976	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Hohlkasten
2.4 System der Lagerung:	Gleitlager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Stützenreihe
2.6 Widerlager:	Widerlager mit Flügelwand
2.7 Gründung:	Flachgründung Widerlager, Tiefgründung Pfeiler
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Überbau beschichtet, Lager aus verchromtem Stahl

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450 nach DIN 1045 bis 1972
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: Bn350 bzw. B35 nach DIN 1045 ab 1972 bzw.1978
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: Bn250 bzw. B25 nach DIN 1045 ab 1972 bzw.1978

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Rechnerische Defizite in der Nachrechnung
- Detektion mehrere gerissene Koppelfugen in Sonderprüfung
- Nicht ausreichender Bauwerkszustand (je Überbau: 3,4)
- Verstärkungsmaßnahme in Planung

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Linearpotentiometrischer Wegaufnehmer
 - Messbereich Sensortechnik: ± 5 mm mm
 - Erwartete Messunsicherheit: 0,0025 mm mm
 - Temperaturkompensation: Bauteiltemperaturmessung
 - Gesamttechnischer Umfang: Wegaufnehmer inkl. Datenlogger, Datenfernübertragungsbasis, Autobatterie
2. **Grund des Monitorings:** Überwachung zur Kompensation von Defiziten, Überwachungen von Einwirkungen und Betriebsparametern
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 30 Wegaufnehmer
30 Datenlogger mit integrierten Luftfeuchte- und Temperatursensoren
4. **Messort am Bauwerk:** Koppelfugen
5. **Installationsbereich:** Hohlkasten Unterkante
6. **Installationsart:** Geklebt
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 85.000,00 €
 - Planungskosten: 4.500,00 €
 - Installationskosten: 16.000,00 €
 - Betriebskosten: 30.000,00 €
 - Kosten Datenmanagement: 32.000,00 €
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** 8 Tage, 2019
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, 3 Jahre seit 2019
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | | |
|---------------------------------------|--|--|-----|
| 1. Ziel der Messung: | Koppelfugenmonitoring als Überwachungsmaßnahme | | |
| 2. Messgrößen: | | | |
| - Wegmessung: | ± 5,0mm | | mm |
| - Temperatur: | -40 bis +125 | | °C |
| - Luftfeuchtesensor: | 0 bis 100 | | %rF |
| 3. Abtastrate: | | | |
| - Wegmessung: | 4 | | min |
| - Temperatur: | 4 | | min |
| - Luftfeuchtesensor: | 4 | | min |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | | | |
| - Wegmessung: | 20 | | min |
| | Bei Grenzwertüberschreitung: 4 | | min |
| - Temperatur: | 20 | | min |
| - Luftfeuchtesensor: | 20 | | min |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Wöchentliche Auswertung,
Monatlicher Zwischenbericht | | |
| 5. Daten: | | | |
| - Wegmessung: | Minimal- und Maximalwert | | |
| - Temperatur: | Momentanwert | | |
| - Luftfeuchtesensor: | Momentanwert | | |
| 6. Datenformat: | *.xcl, tabellarisch | | |
| 7. Datenerfassung: | Datenlogger | | |
| 8. Datenübertragung: | Sensor zur lokalen Basis:
Funkverbindung im lizenzfreien 433/868 MHz
Frequenzband (Reichweite > 0,5 km);
lokaler Basis zum Webserver:
MQTT -Mobilfunkverbindung
Webserver | | |
| 9. Datenmanagementsystem: | Webserver | | |
| 10. Datenauswertung: | | | |
| - Prozess: | Excel | | |
| - Ausgabe: | Grafische und tabellarische Ausgabe in Form von
Berichten im PDF-Format, Webserver zur Echt-Zeit
Überwachung | | |
| 11. Datenverwendung: | Bewertung einer möglichen Verformung im Bereich
der Koppelfugen | | |
| 12. Alarmierungsplan: | | | |
| - Grenzwert: | Individuelle dynamische Bewertung
(wöchentlich) | | |
| - Alarmierungskette: | Ingenieurbüro → Baulastträger (frei per Mail) | | |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Baulastträger | | |

Beschreibung des Monitorings

Die Spannbetonbrücke aus dem Jahr 1976 besteht aus zwei getrennten Überbauten mit annähernd gleichmäßig verteilten Felder mit Stützweiten von ca. 36 m. Eine Nachrechnung des Bestands ergab Defizite in den Ermüdungsnachweisen, im Nachweis der Dekompression und der Rissbreitenbeschränkung. Eine Verstärkung des Bestands mit externer Vorspannung ist in Planung (Stand 2019). Zur Überbrückung der Nutzungsdauer bis zur Verstärkungsmaßnahme wurden auf Basis der Ergebnisse der Nachrechnung Kompensationsmaßnahmen in Form eines LKW Überholverbots, LKW-Mindestabstands, Sonderprüfung und eines Rissmonitorings aufgestellt. In einer Sonderprüfung im Jahr 2019 konnten mehrfach aufgerissene Koppelfugen erkannt werden.

Im Zuge der Kompensationsmaßnahmen wurde zur Überprüfung der Rissentwicklung an den Koppelfugen ein Rissmonitoring als Langzeitmonitoring von 36 Monaten vorgesehen.

Auf Grund der großen Distanzen zwischen den einzelnen Messpunkten wurde sich für ein batteriebetriebenes Monitoringsystem auf Basis eines lokalen Funknetzwerks entschieden. Insgesamt wurden 30 Wegaufnehmer mit Datenlogger und einer Basis zum Empfangen und Versenden von Daten installiert. Die Wegaufnehmer inkl. Datenlogger wurden an den Koppelfugen beider Überbauten (15 Koppelfugen je Überbau) montiert (Bilder 1 und 2). Die Datenbasis wurde an einem Pfeiler installiert und dient zum Empfangen der Daten im 868 MHz Frequenzband, zur Datenübertragung auf eine Cloud via MQTT Verbindung über das Mobilfunknetz und zum Versand der Daten per E-Mail. Bei Grenzwertüberschreitung besteht die Möglichkeit einer automatisierten Alarmierung per E-Mail und SMS. Zusätzlich wird die Temperatur und Luftfeuchte aufgezeichnet, um einen Zusammenhang zwischen klimatischen Einwirkungen und Rissentwicklungen herstellen zu können.

Folgerung

In dem Messzeitraum wurden keine auffälligen Rissentwicklungen festgestellt. Die beobachteten Rissentwicklungen konnten auf klimatische Schwankungen zurückgeführt werden (Bild 3). Das Monitoring liefert einen nachhaltigen Beitrag zur Verlängerung der Nutzungsdauer der Bestandsbrücke.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

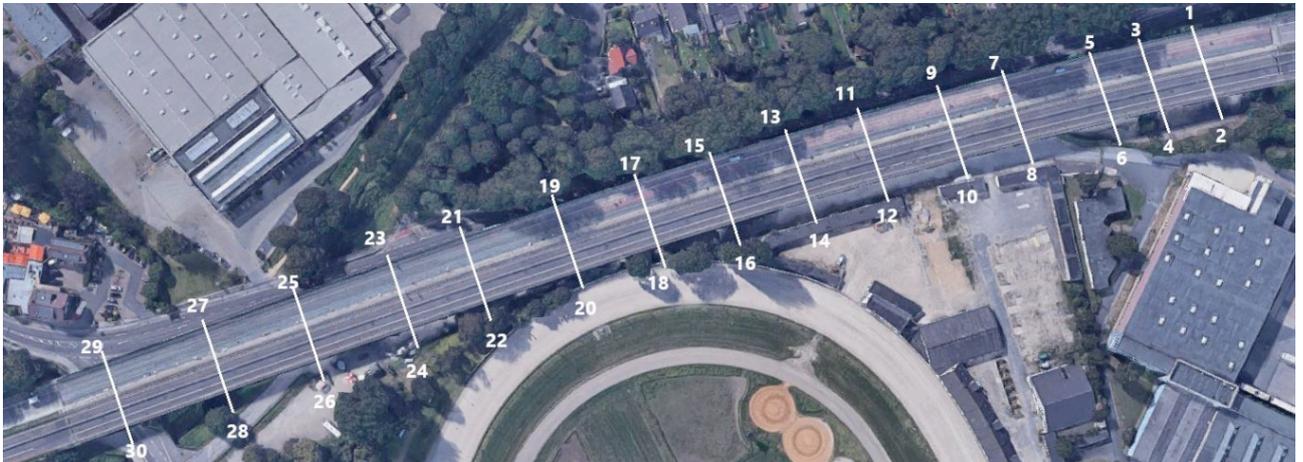


Bild 1: Draufsicht des Bauwerks und Skizze der Koppelfugen und Messstellen,
Quelle: Kempen Krause Ingenieure GmbH



Bild 2: Riss an der Koppelfuge (li) und installierter Wegsensor mit Datenlogger (re),
Quelle: Kempen Krause Ingenieure GmbH

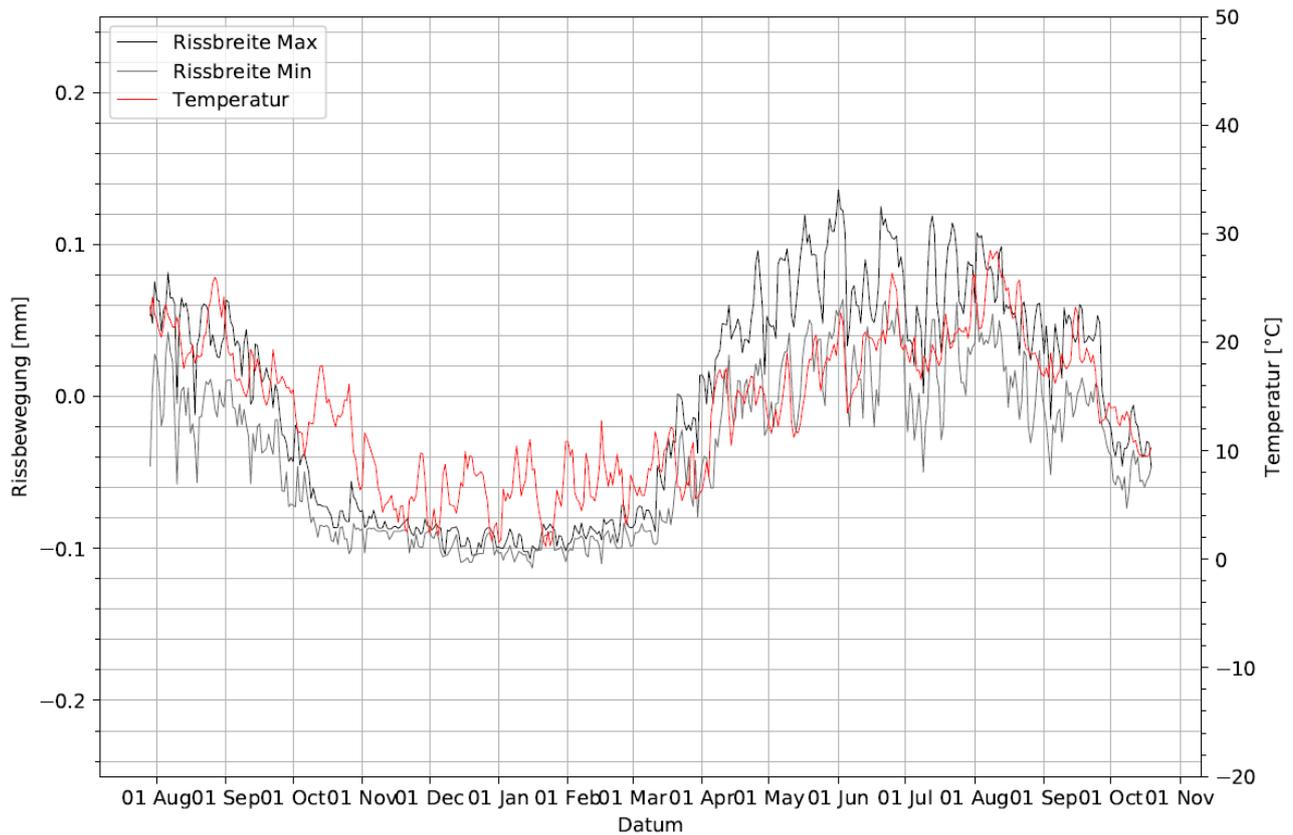


Bild 3: Exemplarischer Messwertgraph der Rissentwicklung für einen Messzeitraum von über einem Jahr, Quelle: Kempen Krause Ingenieure GmbH

Monitoringmaßnahme:	11. Dehnungsmessung Stahl	Lfd. Nr.:	11.1	Blatt:	1
---------------------	---------------------------	-----------	------	--------	---

11. Dehnungsmessung Stahl

Monitoring 11.1 Überwachung der Querspannstäbe der Endverankerungsblöcke der externen Vorspannung

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	61,80 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,65 – 47,64 – 48,07 – 48,30 – 48,54 – 32,38 – 74,19 – 53,10 – 43,91 – 55,14	m
1.2 Zahl der Felder:	20	
1.3 Brückenfläche:	15444	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60/30 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1968	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken / Trägerrost (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Widerlager: querfest, Pfeiler: schwimmend
2.5 Pfeiler / Stützen:	Rundstütze
2.6 Widerlager:	Widerlager mit Flügelwand
2.7 Gründung:	Flachgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: C35/45
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: C20/25
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: C35/45

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Verstärkung mit einer externen Vorspannung aufgrund rechnerischer Defizite
- Schadensfall eines herabfallenden Endverankerungsblocks an einer Brücke mit ähnlichem Verstärkungssystem

Monitoringmaßnahme:	11. Dehnungsmessung Stahl	Lfd. Nr.:	11.1	Blatt:	2
----------------------------	----------------------------------	------------------	-------------	---------------	----------

Blattnummerierung (ausgeblendet)

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Dehnungsmessstreifen, 350 Ohm
 - Messbereich Sensortechnik: ± 30.000 $\mu\text{m/m}$
 - Erwartete Messunsicherheit: -
 - Temperaturkompensation: Vollbrückenschaltung
 - Gesamttechnischer Umfang: Dehnmessstreifen inkl. Messverstärker, Messzentrale mit Industrie-PC
- 2. Grund des Monitorings:** Überwachung der Endverankerungsblöcke nach Schadensfall
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 12 Dehnungsmessstreifen
- 4. Messort am Bauwerk:** Vorderer und hinterer Bereich der Schubfuge
- 5. Installationsbereich:** Querspannstab
- 6. Installationsart:** geklebt, Methylmethacrylat
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:** *Gesamtkosten der in Monitoring 6.2 und Monitoring 11.1 beschriebenen Maßnahmen*
 - Gesamtkosten: 92.000,00 exklusive Betrieb €
 - Planungskosten: 6.000,00 €
 - Installationskosten: 86.000,00 €
 - Betriebskosten: 9.500,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 2011 bis 2014
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2011 laufend bis ENB
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro, Tragwerksplaner*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Ingenieurbüro für Messtechnik**)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (**)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Messtechnische Überwachung der Dehnung in den Querspannstäben zur Detektion von Veränderungen in der Spannkraft |
| 2. Messgrößen: | |
| - aktives Messgitter: | 3 mm |
| 3. Abtastrate: | |
| - Dehnungsmessung: | 100 Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Dehnungsmessung: | 10 sec |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | 24 h |
| 6. Daten: | |
| - Dehnungsmessung: | Momentanwert |
| 7. Datenformat: | *.xls |
| 8. Datenerfassung: | Speicherung vor Ort |
| 9. Datenübertragung: | Automatischer Mailversand über Mobilfunknetz |
| 10. Datenmanagementsystem: | Excel |
| 11. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Manuell, makrobasiert in Excel |
| - Ausgabe: | Grafisch und tabellarisch, Quartalsberichte |
| 12. Datenverwendung: | Kontrolle der Spannstahtspannungen in den Querstäben, Theoretische Ermittlung der Wirksamkeit der externen Vorspannung in Abhängigkeit der Anpressung der Ankerblöcke
Vorhanden |
| 13. Alarmierungsplan: | |
| - Grenzwert: | Dynamische Grenzwertüberschreitung innerhalb von 24 h |
| - Alarmierungskette: | Fachplaner plausibilisiert Alarm, informiert im Alarmfall Ansprechpartner Straßenbauverwaltung |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Fachplaner → Straßenbauverwaltung |

Beschreibung des Monitorings

Die Talbrücke wurde mit einer externen Vorspannung verstärkt. Nach dem Schadensfall eines herabfallenden Endverankerungsblocks wurden die Ortbetonkonsolen mit Wegaufnehmern zur frühzeitigen Erkennung von Verschiebungen (Monitoring 6.2) und Dehnmesstreifen an den Querspannstäbe (Monitoring 11.1) zur kontinuierlichen Überwachung der Stahlspannung ausgestattet.

Die Befestigung der Ortbetonkonsolen erfolgte mit jeweils etwa 15 bis 20 Querspannstäben, welche die Kontaktfuge kreuzen. Die Spannstäbe konnten nicht in einem symmetrischen Raster angeordnet werden, denn ihre Lage musste so gewählt werden, dass keines der im Steg verlaufenden und im Auflagerbereich aufgefächerten Längsspannglieder durch die Bohrungen beschädigt wird. Die Auswahl der beiden Spannstäbe, an denen Dehnungsmessstreifen zur Kontrolle der Spannstahtspannungen installiert wurden, erfolgte innerhalb dieser Randbedingungen so, dass jeweils einer aus dem vorderen und einer aus dem hinteren Bereich der Schubfuge bestückt wurde. Dies ermöglicht die Detektion von einer eventuellen Verdrehung der Konsole. An jedem der untersuchten Spannstäbe wurden insgesamt vier Dehnungsmessstreifen an-

gebracht, jeweils einer in Längs- und Querrichtung auf den gegenüberliegenden Seiten des Spannstabs (Bilder 1 und 2). Dadurch, dass diese zu einer Vollbrücke verbunden wurden, konnte der Einfluss der Temperaturschwankung auf die Messrichtung minimiert werden. Die installierten Dehnungsmessstreifen wurden anschließend mit einer Dämmung geschützt. Zudem wurden die mit Dehnungsmessstreifen bestückten Spannstäbe im Gegensatz zu den anderen nicht verpresst.

Das Ziel dieses Monitorings ist die kontinuierliche Überwachung der Endverankerungsblöcke und automatische Alarmierung bei Auffälligkeiten der Messwerte. Für jeden Messkanal wurde ein statischer und dynamischer Warngrenzwert definiert. Bei Überschreiten der jeweiligen Ober- und Untergrenzen der Warnwerte bzw. einer festgelegten Differenz aufeinander folgender Werte wird eine automatische Warnung über das Mobilfunknetz versendet. Die Analyse und Plausibilisierung der Messungen und Entscheidung ob Handlungsbedarf durch bspw. eine Begutachtung vor Ort besteht, erfolgt durch den Fachplaner Monitoring bzw. das zuständige Ingenieurbüro.

Folgerung

Mittels der Dehnungsmessung an den Querspanngliedern konnten alle wesentlichen Veränderungen in den jeweiligen Bauphasen wie bspw. während des Nachspannens der Querspannstäbe beobachtet werden. Aus den Ergebnissen des Dauermonitorings lässt sich eine kontinuierliche Dehnungsabnahme in den Querspannstäben aus Kriechen und Schwinden ableiten. Auch kann eine starke Zunahme der Spannungsverluste in den Sommermonaten bei anhaltend hohen Bauwerkstemperaturen festgestellt werden (Bilder 3 und 4). Das Relaxationsverhalten von Spannstahl ist normativ geregelt. Über die kontinuierliche Messung der Spannungsverluste wird das Verhalten erfasst und verglichen.

Das Monitoring liefert insgesamt wichtige Erkenntnisse zur Überwachung und den Besonderheiten bzw. Unbekannten bei der nachträglichen Endverankerung von externen Spanngliedern an Bestandsbrücken mittels nachträglich angebrachter Verankerungsblöcke.

Vertiefende Informationen können dem folgenden Beitrag entnommen werden:

Boros, V., Novák, B., Pelke, E. and Koster, G. (2016), Messtechnische Überwachung extern vorgespannter Betonbrücken. Bautechnik, 93: 725-729. <https://doi.org/10.1002/bate.201600066>

Bilder, Installationskizzen und Messwertgraphen

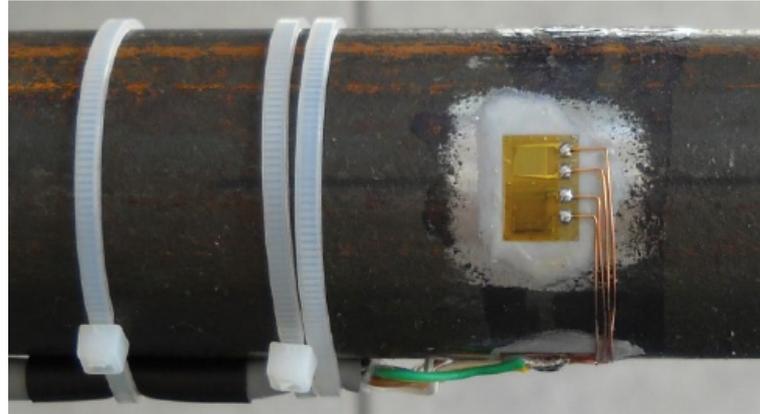


Bild 1: Installation der Dehnmessstreifen (noch ohne Schutzabdeckung), Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

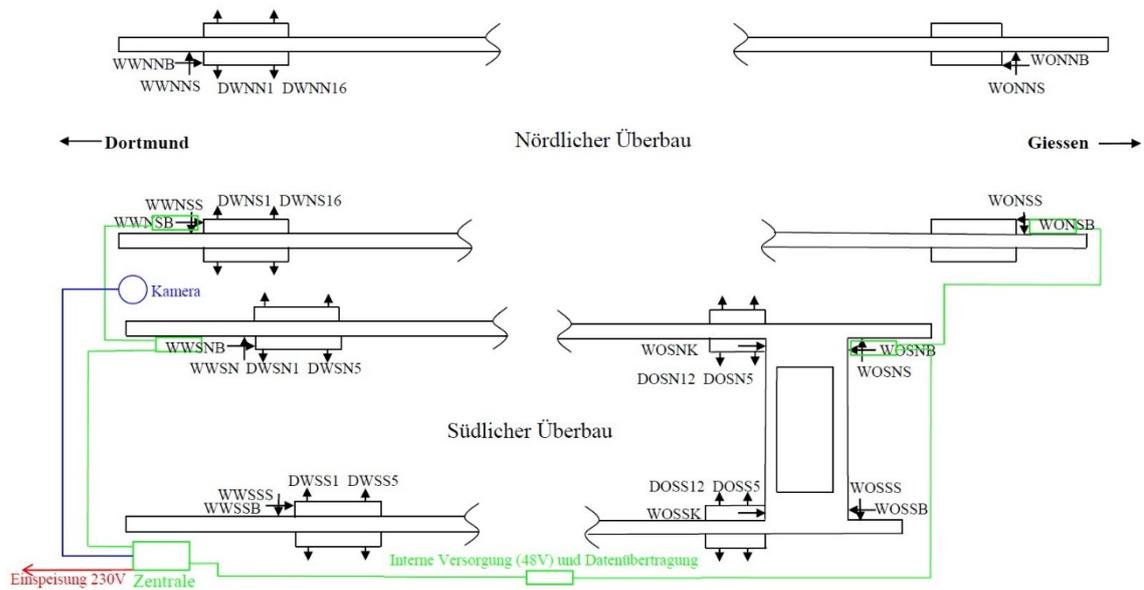


Bild 2: Installationskizze, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

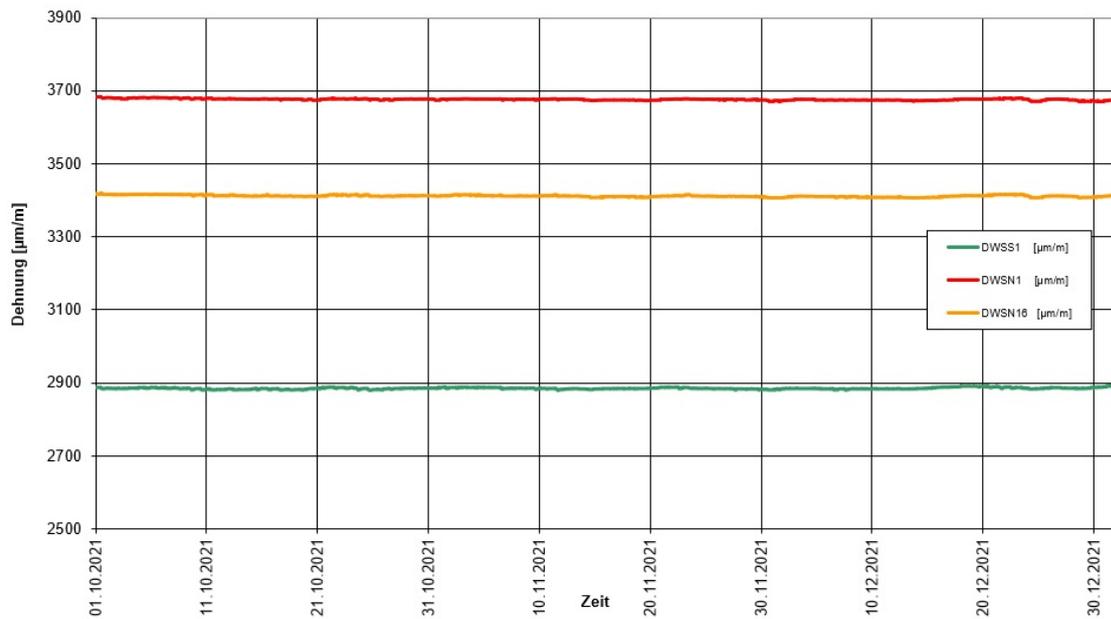


Bild 3: Exemplarischer Messwertgraph der Dehnung der Querspannglieder in einem Quartal, Quelle: Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

Dauerüberwachung Talbrücke Sechshelden

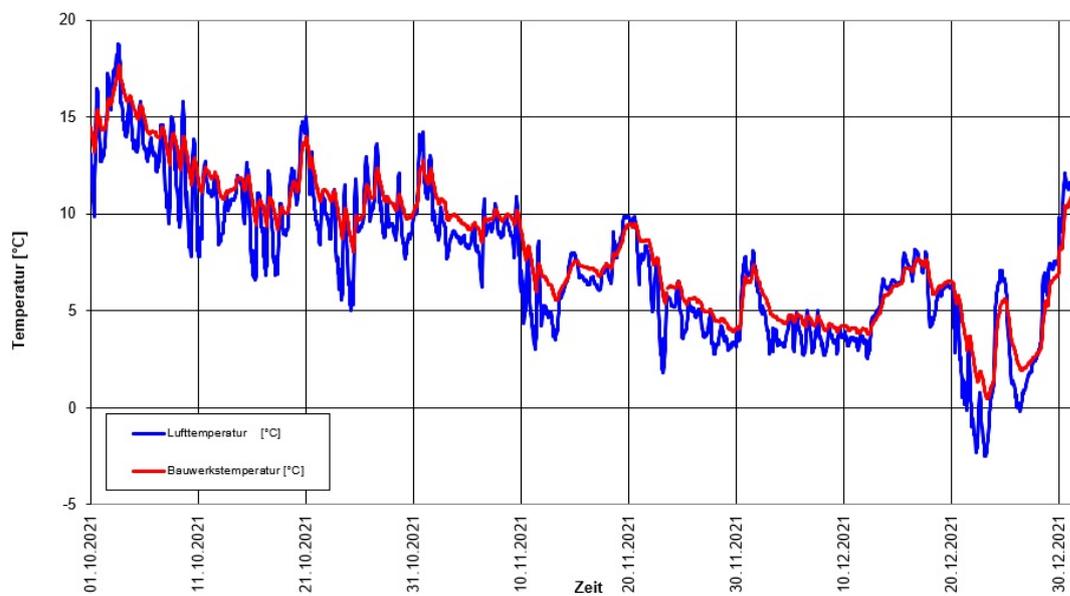


Bild 4: Messwerte für DMS und Bauwerkstemperatur über einen Zeitraum von 45 Monaten, Quelle: (BOROS et al. 2016)

Monitoring 11.2 Messung der Stahldehnung zur Überwachung von Änderungen im Tragverhalten

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1	Einzel- und Gesamtstützweiten:	77.00 - 110.00 - 77.00	m
1.2	Zahl der Felder:	3	
1.3	Brückenfläche:	3604	m ²
1.4	Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5	Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6	Baujahr:	1979	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1	Hauptbaustoff:	Stahl/Leichtmetall
2.2	Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3	Bauwerkssystem in Querrichtung:	Echte Platte quer biegesteif, Flächentragwerk
2.4	System der Lagerung:	Festpunkt Pfeiler C (nördlicher Mittelpfeiler); alle Lager querfest
2.5	Pfeiler / Stützen:	Flusspfeiler, im Unterwasserbereich Senkkästen
2.6	Widerlager:	Widerlager mit Flügelwand, auf Unterwasserbeton im Spundwandkasten flach gegründet
2.7	Gründung:	Senkkastengründung, Flachgründung
2.8	Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtet

3. Baustoffe

3.1	Überbau:	Stahl/Leichtmetall
3.2	Pfeiler/ Stützen:	Schweißprofil
3.3	Widerlager:	Stahlbeton

4. Baugrund

Widerlager: Mittelsand, feinsandig
Pfeiler: ca. 12 m Mudde; 3 – 5 m Feinsand

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Orthotrope Fahrbahnplatte
- Stahllängsträger mit Terrassenbruchgefahr

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Dehnungsmessstreifen
 - Messbereich Sensortechnik: ± 200 µm/m
 - Erwartete Messunsicherheit: -
 - Temperaturkompensation: Dehnungsentkoppelte Dehnmessstreifen, Oberflächentemperaturmessung
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Datenlogger/Messcontroller, dezentrale Messverstärker, Server
2. **Grund des Monitorings:** Sicherstellung der Restnutzungsdauer des Teilbauwerks während des Ersatzneubaus; Rechtzeitige Feststellung von erhöhten Beanspruchungen
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 12 DMS
12 Temperatursensoren
8 Neigungssensoren
4. **Messort am Bauwerk:** Pfeilerquerschnitt
5. **Installationsbereich:** Hauptträger und orthotrope Platte
6. **Installationsart:** Auf Stahloberfläche geklebt
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:** *Gesamtkosten der in Monitoring 7.1 und Monitoring 11.2 beschriebenen Maßnahmen*
 - Gesamtkosten: 235.818,50 €
 - Planungskosten: 28.339,85 €
 - Installationskosten: 151.128,38 €
 - Betriebskosten: 22.550,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: keine Angaben €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** -
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, 3 Jahre
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro Fachgebiet Bauwerkserhaltung*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Beschreibung des Monitorings

Die überwachte Brücke besteht aus zwei Teilbauwerken und wurde während des Monitoringzeitraums schrittweise durch einen Ersatzneubau ersetzt. Während des Neubaus erfolgte eine Umleitung des Verkehrs auf das östliche Teilbauwerk. An diesem Teilbauwerk haben sich die Pfeilerbereiche in der statischen Nachrechnung als die für die Tragfähigkeit kritischen Bereiche herausgestellt. Im Rahmen einer Verstärkung wurde die Terrassenbruchgefahr des Stahls über Anrisse im Stahl erkannt und die Anrisse ausgeschliffen. Als Kompensierung der Querschnittsschwächung wurde zur Sicherstellung der Tragsicherheit während der Restnutzungsdauer verkehrseinschränkende Maßnahmen getroffen und eine messtechnische Dauerüberwachung als Teil der Maßnahmenkette zur Aufrechterhaltung der Nutzung während des Baus des Ersatzneubaus geplant.

Um die Sicherheit des Teilbauwerks während der Restnutzungsdauer zu gewährleisten, wurden messtechnischen Untersuchungen zur sicheren Umsetzung der 2+0 Verkehrsführung geplant. Vor der Installation des Dauermonitorings erfolgte ein Belastungsversuch zur Untersuchung des realen Tragverhaltens zum Abgleich mit den rechnerischen Annahmen der Nachrechnung.

Die Dauerüberwachung während der Restnutzungsdauer verfolgt die folgenden Ziele:

1. Abschätzung der tatsächlichen Beanspruchung im Pfeilerbereich
2. Kontrolle möglicher Veränderungen des Tragzustands über die Überwachung lokaler Dehnungen und globaler Formänderungen wie Querschnittsverdrehung und Krümmung (siehe Monitoring 7.1) im Pfeilerbereich

Zur Überprüfung möglicher lokaler Änderungen des Tragverhaltens wurde in den Pfeilerquerschnitten insgesamt 12 Dehnmessstreifen am Steg- und Deckblech angebracht. Es wird davon ausgegangen, dass sich eine Änderung des Tragverhaltens in einer Zunahme der Verformung und entsprechender Zunahme der Stahldehnungen einhergeht.

Die Temperaturkompensation der Dehnungsmessungen erfolgt über einen von der Bauwerksdehnung entkoppelten Dehnmessstreifen auf einer separaten Metallplatte. Zur Temperaturbereinigung wurde die Oberflächentemperatur des Stahlüberbaus verteilt über die Höhe der Stegbleche und unterhalb der Fahrbahnplatte in einem Pfeilerquerschnitt gemessen.

Die Maßnahmenplanung wurde von einem sachkundigen Fachplaner für Bauwerksmessungen erstellt. Die Messungen wurden von einem Ingenieurbüro mit Schwerpunkt Bauwerkserhaltung durchgeführt. Die kontinuierlichen Messdaten werden periodische ausgewertet und dem Auftraggeber in Monatsübersichten zur Verfügung gestellt. Neben der kontinuierlichen Messung sind ereignisbedingte Messungen eingestellt, welche bei Überschreiten eines Schwellwerts (Triggers) ausgelöst werden. Im Fall eines Messereignisses werden dem Auftraggeber der Triggerzeitpunkt, die Extremwerte der Dehnungs- und Neigungsmessung und die momentane Temperaturmessung zur Verfügung gestellt.

Folgerung

Über die verkehrseinschränkende Maßnahmen und die messtechnische Dauerüberwachung konnte das Bauwerk für die Restnutzungsdauer bis zum Ersatzneubau und unter Umleitung des Ver-

kehrs als 2+0 Regelung unter Verkehr gehalten werden. Während der messtechnischen Überwachung wurde keine kritische Veränderung des Tragverhaltens festgestellt.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

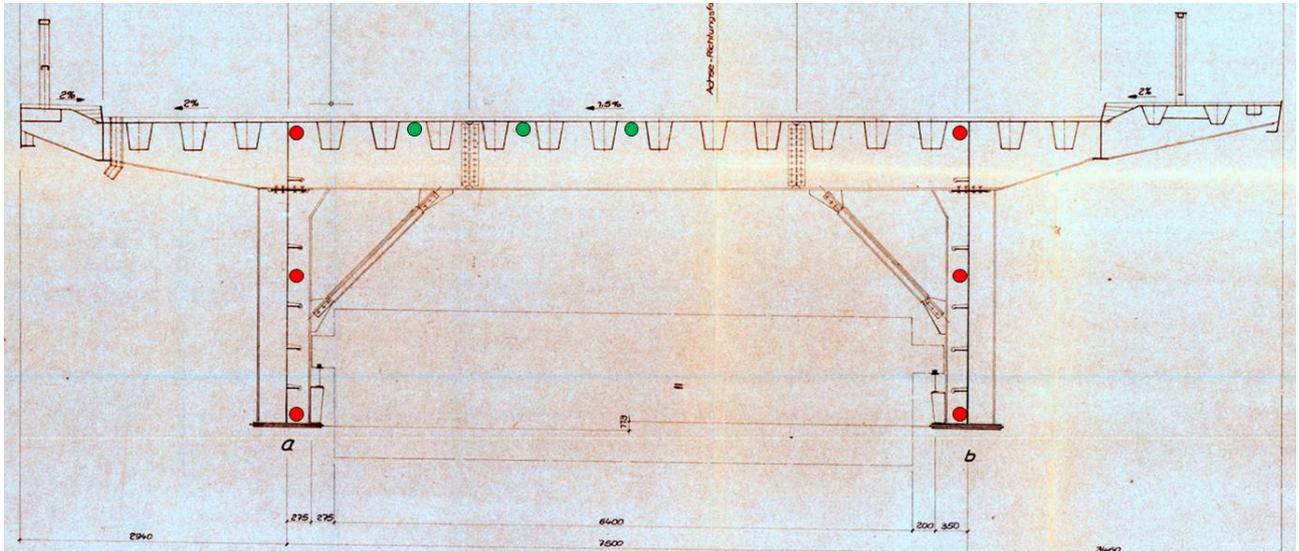


Bild 1: Anordnung der Dehnungsmessstellen (rote Markierung) im Pfeilerquerschnitt, Quelle: KBauMV

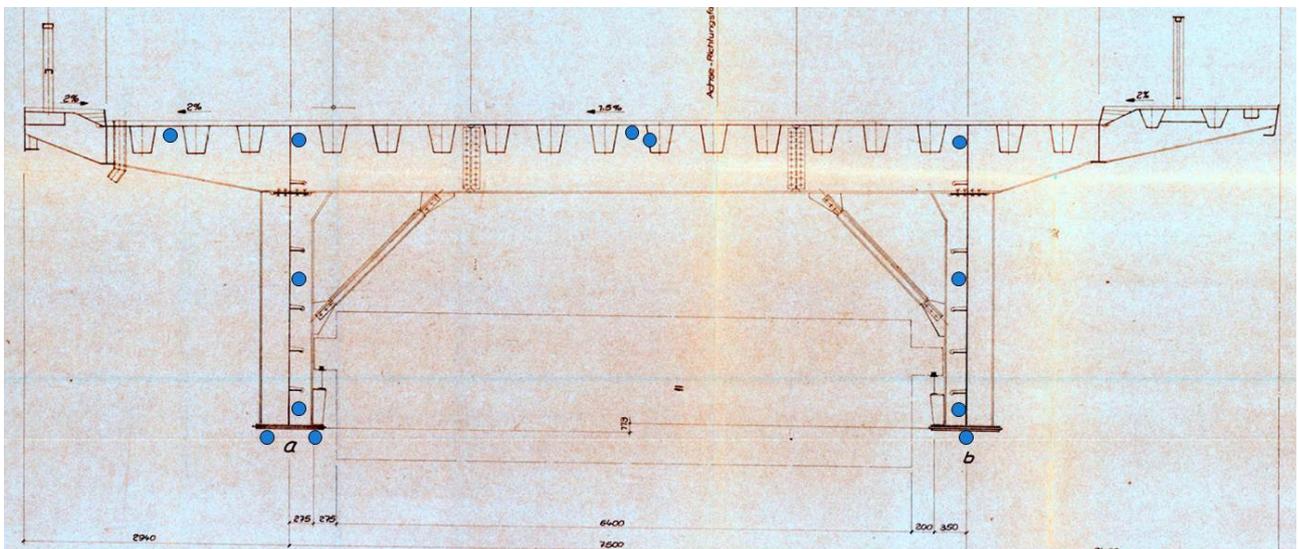


Bild 2: Anordnung der Temperaturmessstellen im Pfeilerquerschnitt, Quelle: KBauMV

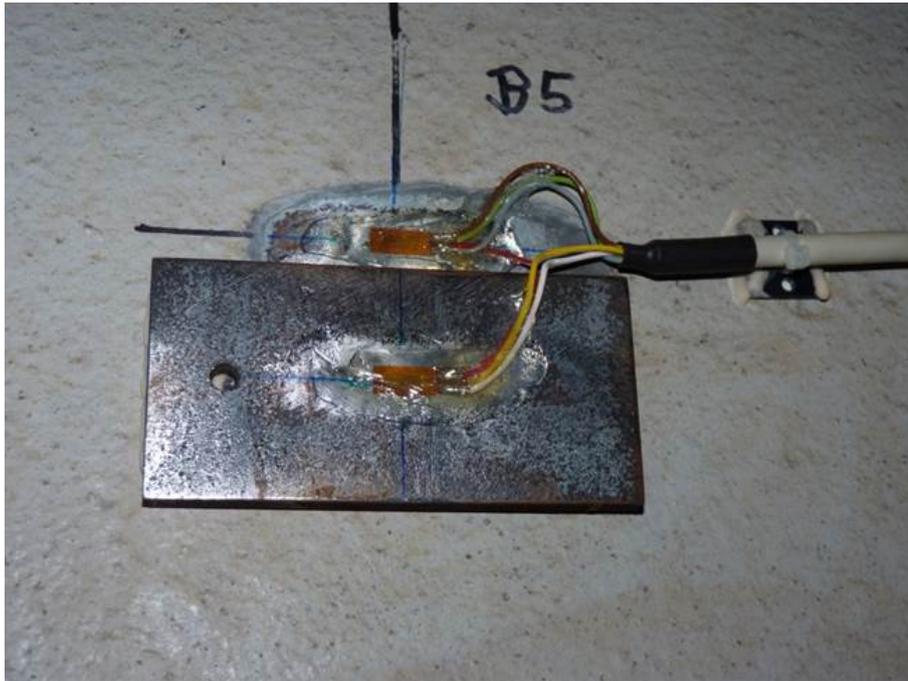


Bild 3: Detailbild – Dehnungsmessstelle, Quelle: KBauMV



Bild 4: Temperaturmessstelle, Quelle: KBauMV

Monitoring 11.3 Messung der Stahldehnung zur Ermittlung der tatsächlichen Ermüdungsbeanspruchung

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

- | | | |
|------------------------------------|---|----------------|
| 1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten: | 47,00 – 61,20 – 61,20 – 61,20 – 61,20 – m
48,70 – 48,70 – 61,20 – 61,20 – 61,20 –
61,20 – 61,20 – 47,00 | |
| 1.2 Zahl der Felder: | 13 | |
| 1.3 Brückenfläche: | 13263 | m ² |
| 1.4 Bauwerkswinkel: | 100 | gon |
| 1.5 Brückenklasse: | BK 60/30 nach DIN 1072 | |
| 1.6 Baujahr: | 1995 | |

2. Angaben zur Konstruktion

- | | |
|---|---|
| 2.1 Hauptbaustoff: | Stahl/Leichtmetall |
| 2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung: | Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung |
| 2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung: | Plattenbalken / Trägerrost (mit Querverteilung) |
| 2.4 System der Lagerung: | Bewegliche Lagerung, Festlager an Gruppenpfeilern |
| 2.5 Pfeiler / Stützen: | Pfeilerscheiben Beton verklinkert (1937) |
| 2.6 Widerlager: | Kastenförmig, Beton verklinkert (1937) |
| 2.7 Gründung: | Flachgründung, Tiefgründung mit Ramppfählen |
| 2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz: | Thermisch gespritzte Oberfläche, unbeschichtet |

3. Baustoffe

- | | |
|-----------------------|---|
| 3.1 Überbau: | Stahl/Leichtmetall:
Haupttragwerk: St 52-3,
Fahrbahnblech: RSt 37-2 |
| 3.2 Pfeiler/ Stützen: | Stahlbeton:
C30/37 bis C70/85 (Bohrkernentnahme) |
| 3.3 Widerlager: | Beton/ Stahlbeton |

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Offener Querschnitt (Plattenbalken), keine Querverteilung der Lasten
- Keine ermüdungsgerechte Konstruktion – ungünstige Kerbfälle an Hauptträger-Untergurten
- Teilweise schlechte Fertigungsqualität (Schweißnahtfehler)
- Auftreten von Ermüdungsrissen

Angaben zur Art des Monitorings

1. Messtechnik:

- Sensortechnik: Dehnungsmessstreifen
- Messbereich Sensortechnik: ± 50.000 $\mu\text{m/m}$
- Erwartete Messunsicherheit: $\pm 0,3$ %
- Temperaturkompensation: Oberflächentemperaturmessung
- Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, 4 dezentrale Messverstärker, 1 Industrie-PC als Datenlogger, 2 Serverschränke

2. Grund des Monitorings:

Unterstützung der Nachrechnung, Überwachung bekannter Schäden, Analyse der tatsächlichen Ermüdungsbeanspruchung zur Nachweisführung gegen Ermüdung über die direkte Berechnung der Schädigung

3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:

47 DMS

4. Messort am Bauwerk:

19 Temperatursensoren

5. Installationsbereich:

Haupttragwerk, 1 Stützquerschnitt, 1 Feldquerschnitt Querträger (Ober- und Untergurt), orthotrope Fahrbahn-Platte

6. Installationsart:

Geklebt

7. Kosten der Monitoringmaßnahme:

- Gesamtkosten: 115.000,00 €
- Planungskosten: 15.000,00 €
- Installationskosten: 60.000,00 €
- Betriebskosten: 40.000,00 €
- Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €

8. Zeitraum/ Dauer der Installation:

November 2018, März 2019

9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:

Langzeitmonitoring, 11 Monate, 2019

10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:

- Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung (Auftragsverwaltung LS Brandenburg)
- Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Planungsbüro mit u.a. Kernleistungen im Bereich Tragwerksplanung, Bauwerksprüfung- und Bewertung, Bauwerksmessung*)
- Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
- Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
- Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
- Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
- Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | | |
|---------------------------------------|--|------|
| 1. Ziel der Messung: | Erfassung der Stahldehnung des Überbaus unter tatsächlicher Ermüdungsbeanspruchung | |
| 2. Messgrößen: | | |
| - Dehnungsmessung: | ± 50.000 | µm/m |
| - Temperaturmessung: | - 55 bis +125 | °C |
| 3. Abtastrate: | | |
| - Dehnungsmessung: | 20 bis 200 Hz | Hz |
| - Temperaturmessung: | 5 | min |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | | |
| - Dehnungsmessung: | 1 Datei pro Stunde | |
| - Temperaturmessung: | 1 Datei pro Tag | |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Manuell während und nach Abschluss der Messung | |
| 6. Daten: | | |
| - Dehnungsmessung: | Momentanwert | |
| - Temperaturmessung: | Momentanwert | |
| 7. Datenformat: | HBM catman binär (8bit), Textformat (.csv) | |
| 8. Datenerfassung: | Speichern der Daten vor Ort, stündliche Datenübertragung auf Server | |
| 9. Datenübertragung: | Mobilfunkübertragung über LTE-Router | |
| 10. Datenmanagementsystem: | FTP-Server | |
| 11. Datenauswertung: | | |
| - Prozess: | Eigenentwicklung auf Basis von NI LabView | |
| - Ausgabe: | Grafische Darstellung, tabellarische Messwerte, Messbericht | |
| 12. Datenverwendung: | Anpassung des Ermüdungslastmodells der Nachrechnung an die tatsächlichen Ermüdungsbeanspruchung, Messbericht | |
| 13. Alarmierungsplan: | | |
| - Grenzwert: | - | |
| - Alarmierungskette: | - | |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Dienstleister Monitoring | |

Beschreibung des Monitorings

An der Autobahnbrücke in Stahlbauweise (Bilder 1 und 2) wurden 23 Jahre nach Inbetriebnahme Ermüdungsschäden – Risse an den Trapezsteifen und Hauptträgern – am Überbau festgestellt (Bild 3). Die Ermüdungsschäden sind auf die steigende Verkehrsbelastung und zum Teil auf Fertigungsfehler zurückzuführen. Aufgrund der hohen Verkehrsbelastung und strukturellen Bedeutung der Brücke wurde eine Untersuchung der Schäden und Nachrechnung des Tragwerks veranlasst. Da insbesondere im Ermüdungsnachweis rechnerische Defizite festgestellt wurden, wurde ein Langzeitmonitoring zur Nachweisführung über die direkte Berechnung der Schädigung installiert. Zur Ermittlung der Stahldehnung des Überbaus unter tatsächlicher Ermüdungsbeanspruchung wurden insgesamt 47 Dehnungsmessstreifen an den Querstreben und unterhalb der Fahrbahnplatte angebracht (Bilder 4 bis 6). Die Auswahl der Messstellen ergab sich über die Identifikation der Bauwerksbereiche mit rechnerisch hoher Auslastung und Festlegung von Tragwerkstellen mit typischen Ermüdungsdetails. Daraus lassen sich die folgenden Messstellen identifizieren:

1. Beide Hauptträger, jeweils am Ober- und Untergurt in einem Stütz- und einem Feldquerschnitt
2. Hauptträger Untergurt nahe der Beulsteife (ungünstiges Kerbdetail), Messungen der Nennspannungen und Strukturspannungen an Schweißnähten in mehreren Schnitten
3. Querträger Untergurt, mittig zwischen den Hauptträgern, äußerer Kragarm
4. Längsrippen zur Erfassung der Verkehrseinwirkungen

Die Anzahl der Sensoren wurde über die Notwendigkeit der erforderlichen Messstellen zur Erfüllung der Messaufgabe unter Beachtung einer gewissen Redundanz festgelegt. Die Temperaturkompensation der Dehnungsmessstreifen erfolgte über die Installation von 19 Temperatursensoren. Die Temperatursensoren zur Ermittlung der Oberflächentemperatur der Stahlbauteile wurden am Haupttragwerk an die Querträger und die orthotrope Fahrbahnplatte geklebt.

Folgerung

Über die Auswertung der Dehnungsmessungen des Langzeitmonitorings konnte der Nachweis gegen Ermüdung über eine direkte Berechnung der Schädigung unter Berücksichtigung erfolgter objektspezifischer Untersuchungen geführt werden. Durch die messtechnische Ergänzung der Nachrechnung bzw. der Ermüdungsberechnung konnte eine Konkretisierung in der Ermittlung der Restnutzungsdauer erfolgen. Die rechnerischen Defizite im Ermüdungsnachweis konnten über die Anpassung der tatsächlich auftretenden Ermüdungsbeanspruchung ausgeglichen werden (Bild 8). Der Extremwert der Beanspruchung ergab sich aus der baustellenbedingten 4+0 Verkehrsführung. Insgesamt konnten während des Monitorings die Beanspruchung für die Fahrspurbelegung „Vollsperrung“, „normaler Verkehr“ und „4+0 Verkehr“ gemessen werden (Bild 7). Die Ergebnisse des Monitorings werden in der Variantenuntersuchung für

den phasenweisen Rückbau im Zuge des Ersatzneubaus berücksichtigt. Während der Langzeitmessungen wurden an der Fahrbahnplatte Sanierungsmaßnahmen am Fahrbahnschutz und der Fahrbahndeckschicht vorgenommen. Die Temperaturmessergebnisse der Sensoren an der orthotropen Fahrbahnplatte werden eventuell für ein Forschungsprojekt zum Themengebiet Asphalteinbau weiterverwendet. Eine Beschreibung der Überwachungsmaßnahme während des Asphalteinbaus kann dem folgenden Beitrag entnommen werden:

Geißler, K., Stein, R.: Beurteilung der Temperaturbeanspruchungen von Brücken beim Asphaltieren auf Basis von Messungen. Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig (2020)

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Untersicht Mühlenfließbrücke, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nordost

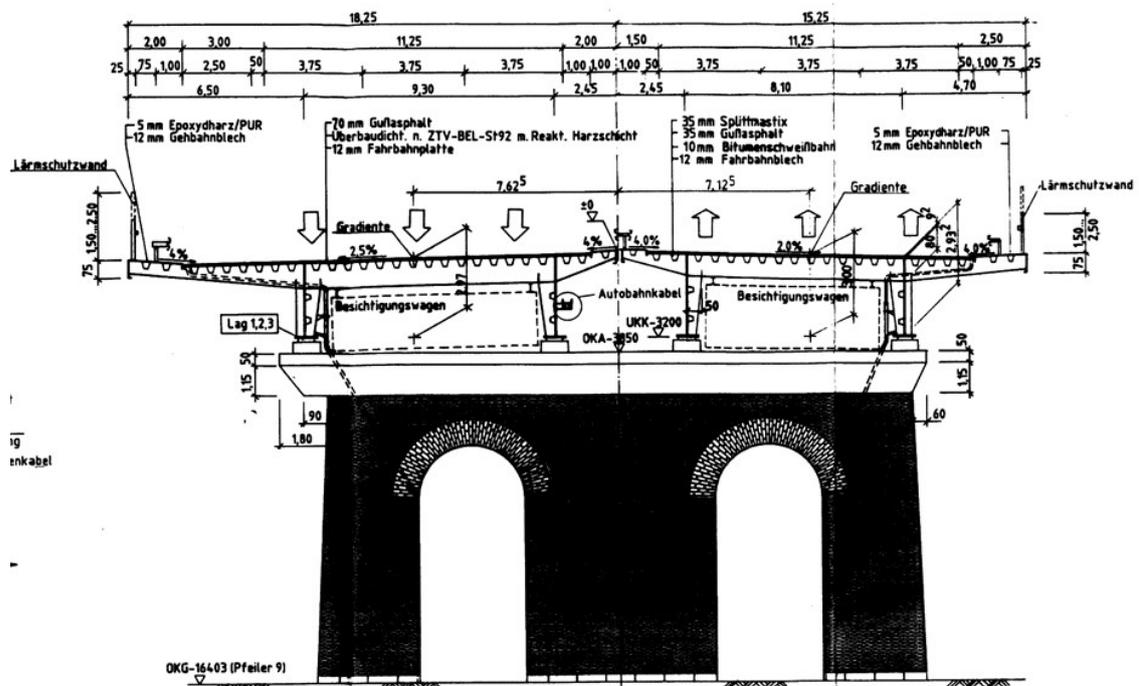




Bild 3: Ermüdungsschaden (vor der Instandsetzung), Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nordost

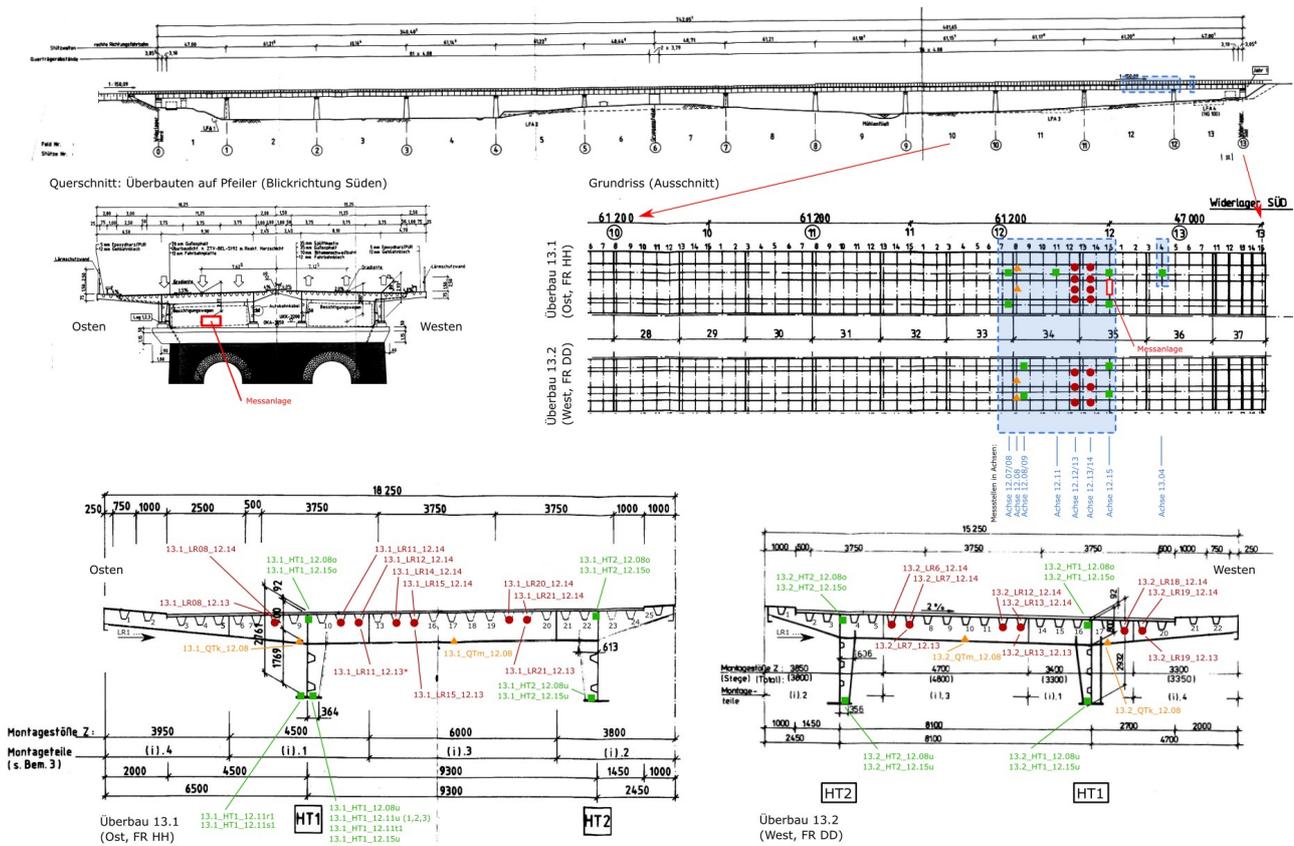


Bild 4: Anordnung Messtechnik am Bauwerk (Auszug Messkonzept), Quelle: GMG Ingenieurgesellschaft mbH Dresden

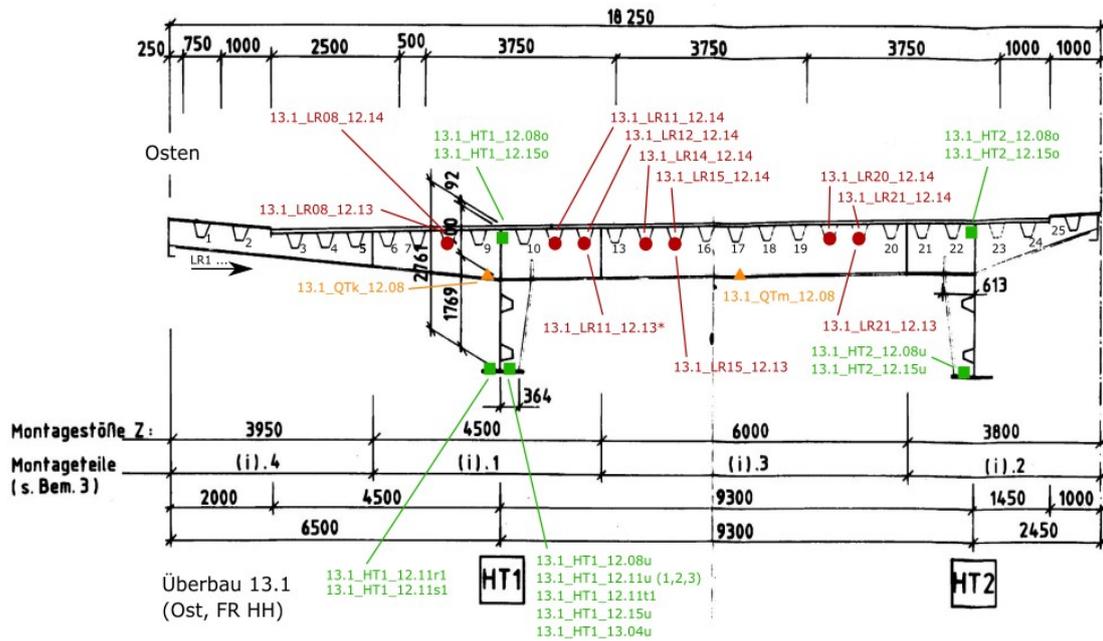


Bild 5: Anordnung Messtechnik am Querschnitt Überbau Ost (Auszug Messkonzept),
Quelle: GMG Ingenieurgesellschaft mbH Dresden

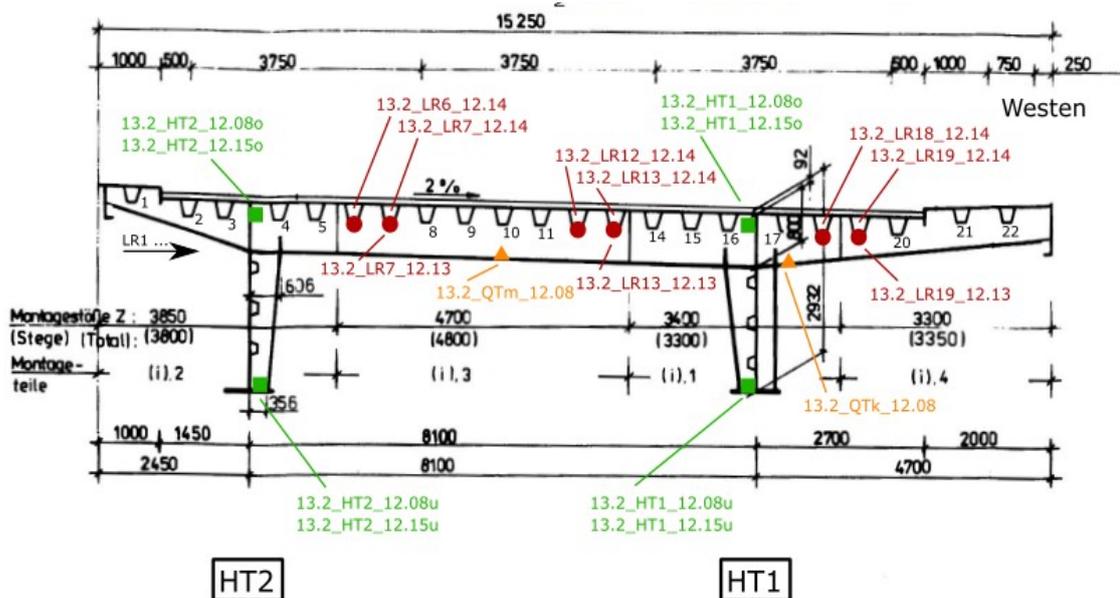


Bild 6: Anordnung Messtechnik am Querschnitt Überbau West (Auszug Messkonzept),
Quelle: GMG Ingenieurgesellschaft mbH Dresden

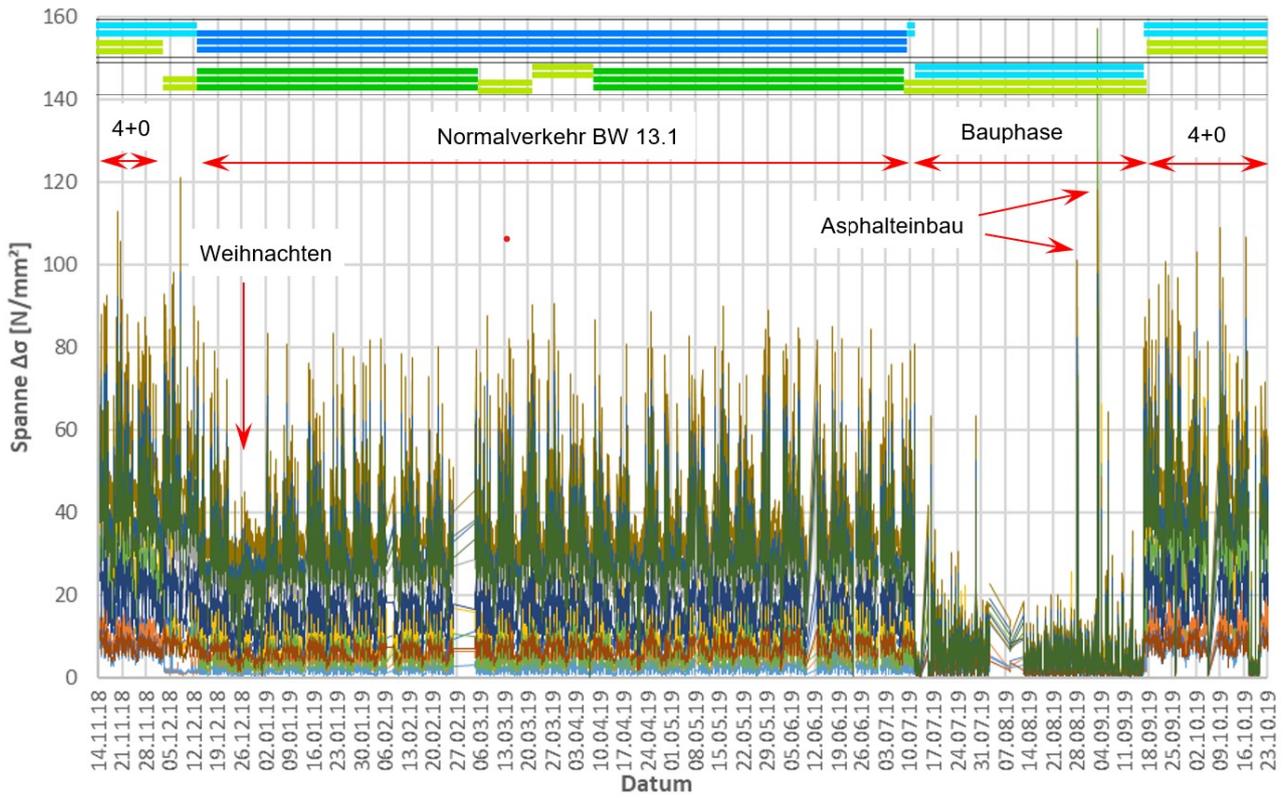


Bild 7: Messphasen Monitoring, Quelle: GMG Ingenieurgesellschaft mbH Dresden

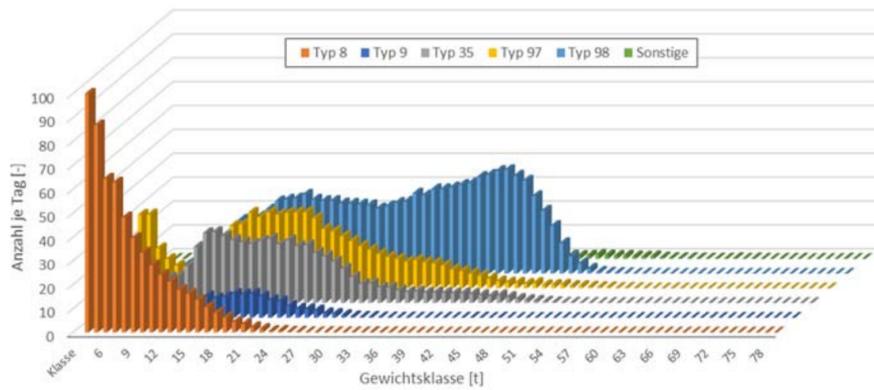


Bild 8: Gemessene Häufigkeitsverteilung der LKW-Typen, Quelle: GMG Ingenieurgesellschaft mbH Dresden

Monitoring 11.4 **Erfassung der tatsächlichen Ermüdungsbeanspruchung und Überprüfung der Verbundwirkung zwischen Fahrbahnplatte und Haupttragsystem**

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1	Einzel- und Gesamtstützweiten:	24,30 – 36,45 – 24,30	m
1.2	Zahl der Felder:	3	
1.3	Brückenfläche:	2041	m ²
1.4	Bauwerkswinkel:	68.3	gon
1.5	Brückenklasse:	BK 30/30 nach DIN 1072	
1.6	Baujahr:	1939	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1	Hauptbaustoff:	Stahl/Leichtmetall
2.2	Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3	Bauwerkssystem in Querrichtung:	Echte Platte quer biegesteif, Flächentragwerk
2.4	System der Lagerung:	Rollenlager ohne besondere Kippvorrichtung, Linienkipplager aus Stahlguss
2.5	Pfeiler / Stützen:	Massiv
2.6	Widerlager:	Massiv
2.7	Gründung:	Widerlager: Flachgründung, Pfeiler: Brunnengründung
2.8	Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Überwiegend alte Beschichtung

3. Baustoffe

3.1	Überbau:	Stahl/Leichtmetall: S235
3.2	Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton
3.3	Widerlager:	Stahlbeton, Naturstein

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Rechnerisch nicht ansetzbare Verbundwirkung zwischen Stahltragwerk und Stahlbetonplatte

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Dehnungsmessstreifen
 - Messbereich Sensortechnik: 60.000 µm/m
 - Erwartete Messunsicherheit: Ca. 0,1 %
 - Temperaturkompensation: Halbbrücken-DMS gleichen Typs
 - Gesamttechnischer Umfang: Sensoren, Messverstärker, Kamera, Industrie PC, LTE-Router
- 2. Grund des Monitorings:** Überwachung der Verbundwirkung zwischen Stahlträgern und Fahrbahnplatte, Erfassung der Verkehrszusammensetzung
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 14 Dehnmessstreifen
1 Kamera
- 4. Messort am Bauwerk:** Überbau
- 5. Installationsbereich:** Hauptträger, Querträger, Buckelbleche unter Fahrbahnplatte
- 6. Installationsart:** geklebt
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: - €
 - Planungskosten: 2.700,00 €
 - Installationskosten: 48.000,00 €
 - Betriebskosten: 14.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 6 Tage, 2020
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2020 bis Ersatzneubau
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1. Ziel der Messung: | Messung der Ermüdungsbeanspruchung der Hauptträger, Überwachung der Dehnungsschwingbreiten zur Kontrolle der Verbundwirkung |
| 2. Messgrößen: | |
| - Dehnung: | 60.000 µm/m |
| 3. Abtastrate: | |
| - Dehnung: | 100 bis 200 Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Dehnung: | 100 bis 200 Hz |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Täglich |
| 5. Daten: | |
| - Dehnung: | Maximal-, Momentanwert, Extremwerte für 1h-Messspannen |
| 6. Datenformat: | Binär, *.csv. |
| 7. Datenerfassung: | DMS-Messverstärker, Sicherung der Daten vor Ort und auf externem Server |
| 8. Datenübertragung: | Mobile Daten |
| 9. Datenmanagementsystem: | Datenerfassungssoftware |
| 10. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Eigenentwicklung in grafischer Programmierumgebung |
| - Ausgabe: | Grafisch, Berichtsform |
| 11. Datenverwendung: | Überwachungssystem mit Warn- und Alarmwert, umfangreiche Auswertung im Zuge der Nachrechnung |
| 12. Alarmierungsplan: | |
| - Grenzwert: | Individuelle Grenzwertüberwachung je Messtelle mit 2-stufiger Meldungsgenerierung (Warn- und Alarmwert) |
| - Alarmierungskette: | Fachplaner Monitoring → Straßenbauverwaltung |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Fachplaner Monitoring, Straßenbauverwaltung |

Beschreibung des Monitorings

In der Nachrechnung des Bauwerks (Bild 1) im Jahr 2015 konnte nicht für alle Bauteile eine ausreichende Restnutzungsdauer nachgewiesen werden. In einem anschließenden Kurzzeitmonitoring konnte messtechnisch eine vorhandene Verbundwirkung festgestellt und die Ermüdungsnachweise erfüllt werden. Die rechnerische Restnutzungsdauer läuft noch vor Eröffnung des Ersatzneubaus aus. Am Bauwerk wird deswegen seit März 2020 ein Bauwerksmonitoring mit Dehnmessstreifen mit Fokus auf der Ermüdungsbeanspruchung der Hauptträger durchgeführt. Die Bewertung der Schadensentwicklung ist abhängig von der genauen Kenntnis der Verkehrseinwirkung. Ziel des Langzeitmonitorings ist die Ableitung der bauwerksspezifischen Verkehrseinwirkung zur Unterteilung in Lastkollektive und Bewertung der realen Ermüdungsbeanspruchung. Als Messstellen wurden Tragwerksstellen an den Hauptträgern, Querträgern und an den Buckelblechen mit der geringsten rechnerischen Restnutzungsdauer auf Basis der Nachrechnungsergebnisse gewählt (Bilder 2, 3 und 5). Zur Zuordnung der Messergebnisse zu Verkehrsereignissen wurde eine Kamera zur Bildaufnahme installiert.

Die Auswertung der Messergebnisse und die rechnerischen Nachweise des Ermüdungsschadens zeigen, dass die Beanspruchungen wesentlich geringer sind, als sie in den Nachweisen im Jahr 2015 angesetzt wurden (Bild 4). Dementsprechend konnte für die maßgebenden Bauteilen eine ausreichende Restnutzungsdauer bei entsprechenden Ergebnissen des Monitorings nachgewiesen werden.

Mithilfe der Dehnungsmessungen wird die rechnerisch nicht ansetzbare, jedoch nachweislich vorhandene Verbundwirkung zwischen Stahltragwerk und der Betonfahrbahn überwacht. Deutliche und dauerhafte Veränderungen in den Dehnungsschwingbreiten sind ein Hinweis auf eine Störung des Verbundverhaltens mit negativen Auswirkungen auf den Ermüdungswiderstand. Für die Tragfähigkeitsnachweise wurde die Verbundwirkung nicht angesetzt. Entsprechend ergibt sich ein ausreichendes Ankündigungsverhalten. Einzelne große Dehnungsereignisse werden mit den Verkehrsaufnahmen der Kamerabilder zur Validierung der Messung verglichen.

Folgerung

Anhand der Messdaten und der dadurch ermittelten Beanspruchungskollektive ließ sich eine geringere Verkehrsbelastung feststellen, als im Ansatz für die Ermüdungsnachweise zur Festlegung der Restnutzungsdauer angenommen. Messtechnisch konnte die rechnerisch nicht ansetzbare Verbundwirkung zwischen der Fahrbahnplatte und dem Haupttragwerk nachgewiesen werden. Die Messergebnisse konnten für den Ermüdungsnach-

weis ab Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie angesetzt werden.

Entsprechend der Ergebnisse des Monitorings kann für die untersuchten Bauteilen eine ausreichende Restnutzungsdauer bis zur voraussichtlichen Inbetriebnahme des Ersatzneubaus nachgewiesen werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Bauwerksansicht, Quelle: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nordwest



Bild 2: Oberflächenapplikation der Dehnmessstreifen, Quelle: GMG Ingenieurgesellschaft mbH

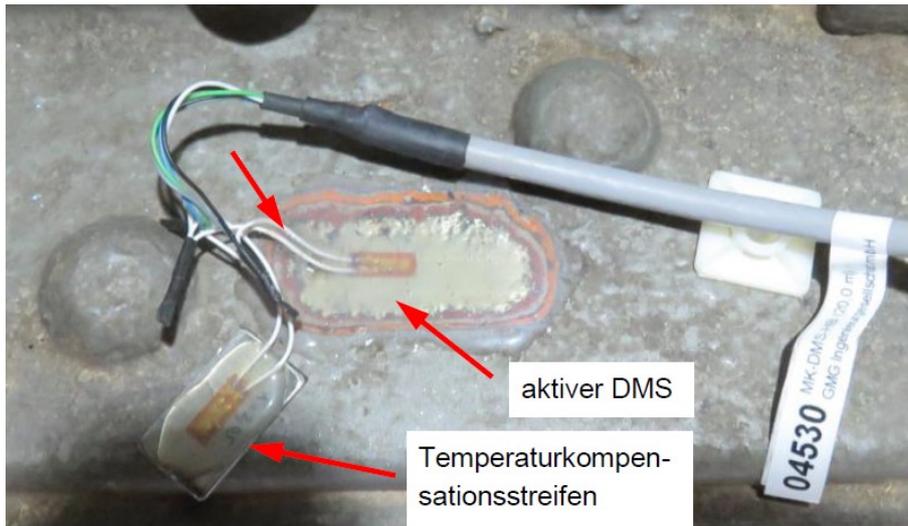


Bild 3: Temperaturkompensation der Dehnmessstreifen, Quelle: GMG Ingenieurgesellschaft mbH

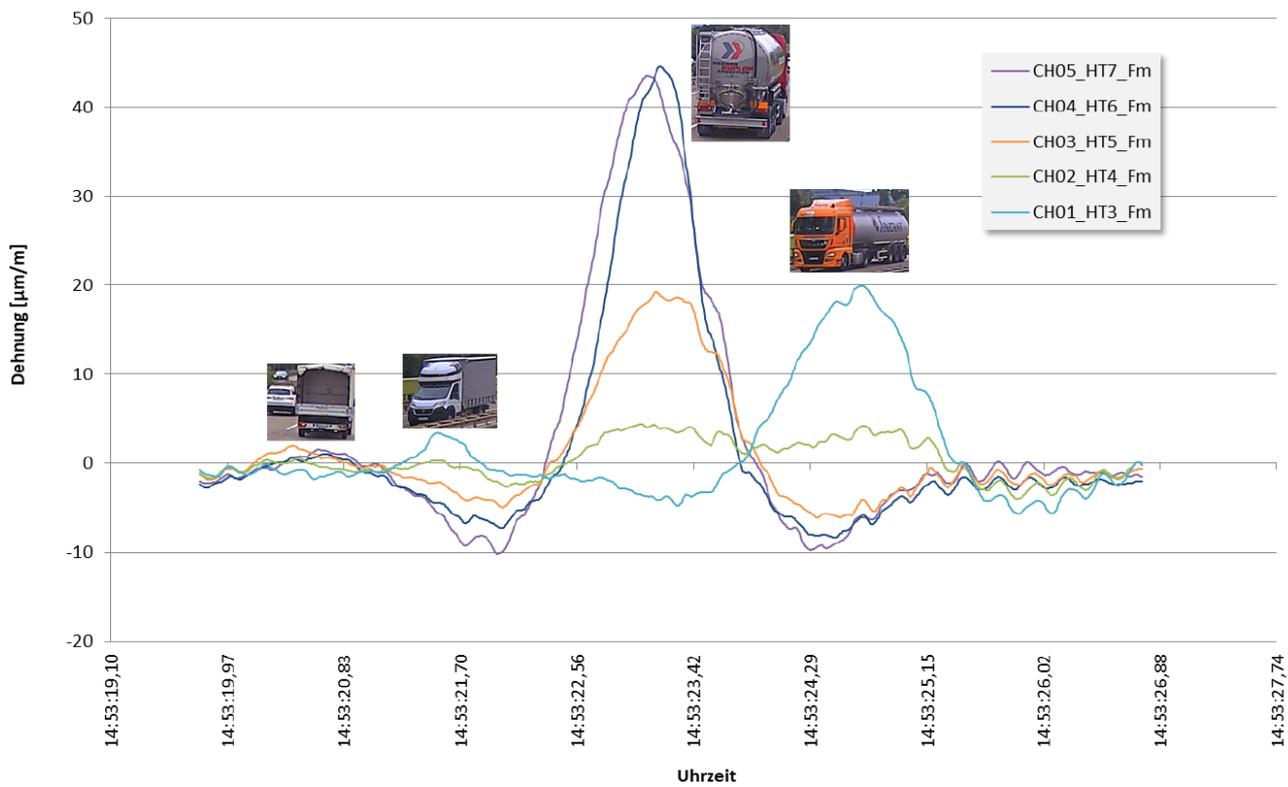


Bild 4: Exemplarischer Beanspruchungsverlauf der Messpunkte an den Hauptträger-Untergurten für eine typische Verkehrssituation, Quelle: GMG Ingenieurgesellschaft mbH

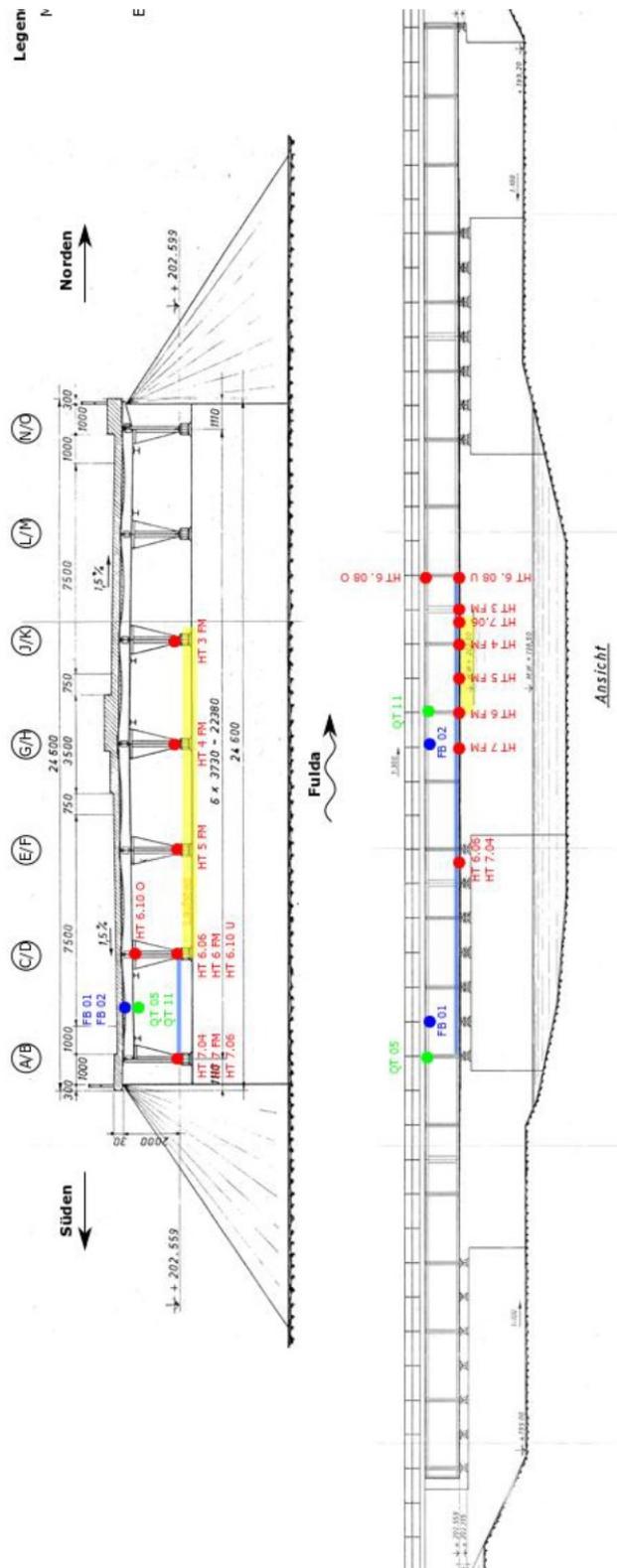


Bild 5: Installationskizze der Messstellen, Quelle: GMG Ingenieurgesellschaft mbH

Monitoringmaßnahme:	12. Schallemissionsanalyse	Lfd. Nr.:	12.1	Blatt:	1
---------------------	----------------------------	-----------	------	--------	---

12. Schallemissionsanalyse

Monitoring 12.1 Überwachung von Rissentwicklungen an Schweißnähten

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	32,00 – 42,00 – 54,00 – 54,00 – 54,00 – m 42,00 – 34,00	
1.2 Zahl der Felder:	7	
1.3 Brückenfläche:	9360	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 60 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1968	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Stahl/Leichtmetall
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Trägerrost (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Rollenlager ohne besondere Kippvorrichtung, Linienkipplager aus Walzprofilen
2.5 Pfeiler / Stützen:	Pfeiler mit Hammerkopf
2.6 Widerlager:	Hochgesetztes Widerlager auf Bohrpfahlgründung
2.7 Gründung:	Pfeiler: Flachgründung, Widerlager: Bohrpfahlgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Beschichtete Oberfläche

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Stahl/Leichtmetall: S235
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B300 nach DIN 1045
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B300 nach DIN 1045

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Spröbruchgefährdete Schweißnähte der Schottbleche
- Ermüdungsdefizit, vorhandene Ermüdungsrisse

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Körperschallsensor Vallen VS150 34 dB Vorverstärkung
 - Messbereich Sensortechnik: 100 bis 450 kHz
 - Erwartete Messunsicherheit: Lokalisierung mit Ortungengenauigkeit bis zu 15 cm
 - Temperaturkompensation: Oberflächentempertursensoren zur Plausibilisierung temperaturbedingter Schallsignale
 - Gesamttechnischer Umfang: Körperschallsensoren, Kamera, Temperatursensoren, 3600 m Steuerungskabel, Serverschrank, LTE-Anschluss
- 2. Grund des Monitorings:** Unterstützung der Nachrechnung
Detektion und Überwachung von Schäden
Überwachung zur Kompensation von Defiziten
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 52 Körperschallsensoren
4 Temperatursensoren
- 4. Messort am Bauwerk:** maßgebende Stellen im Stützbereich
- 5. Installationsbereich:** Schottbleche nahe den Schweißnähten
- 6. Installationsart:** Mit Magneten am Stahl befestigt
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 460.000,00 €
 - Planungskosten: - €
 - Installationskosten: - €
 - Betriebskosten: 117.500,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 8 Tage
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2018
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Dienstleister für zerstörungsfreie Prüfung*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Rissüberwachung an Schweißnähten
ausgewählter Schottbleche |
| 2. Messgrößen: | |
| - Körperschall: | 100 bis 450 kHz |
| - Temperatur: | -30 bis +60 °C |
| 3. Abtastrate: | |
| - Körperschall: | 10 MHz |
| - Temperatur: | 1 Hz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Körperschall: | Eventbasiert, abhängig von Schwellwert |
| - Temperatur: | 1 Hz |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Wöchentlich |
| 5. Daten: | h |
| - Körperschall: | Parameter entsprechend DIN EN 13477-1 |
| - Temperatur: | Momentanwert |
| 6. Datenformat: | Quelloffenes Format SQLite3, *.priDB, *.traDB |
| 7. Datenerfassung: | Speicherung und Auslesung am Server vor Ort |
| 8. Datenübertragung: | Upload am webbasierten Dashboard |
| 9. Datenmanagementsystem: | Firmeneigene Software und Auswertealgorithmus |
| 10. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Automatisierte Echtzeitauswertung |
| - Ausgabe: | Ausgewertete Wochenberichte mit wöchentlicher
Übergabe an die Straßenbauverwaltung
Detektion von Rissbildung und Rissfortschritt |
| 11. Datenverwendung: | |
| 12. Alarmierungsplan: | Vorhanden |
| - Grenzwert: | E-Mail Alarm bei charakteristischem
Schallsignal, Bewertung des
Schallereignisses durch den Gutachter |
| - Alarmierungskette: | Gutachter → Bauwerksprüfung |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Bauwerksprüfung |

Beschreibung des Monitorings

Die Konstruktion der Talbrücke (Bild 1) besteht aus einem reinen Stahlüberbau mit 7 Feldern und Stützweiten zwischen 32 m und 54 m. Aufgrund der geologischen Verhältnisse wurde der Überbau als biegeweiches Durchlaufträgersystem in Längsrichtung und als Trägerrost in Querrichtung ausgeführt. Die Talbrücke befindet sich aktuell in der Endphase der Restnutzungsdauer und soll durch einen Ersatzneubau ersetzt werden.

Im Zuge der Nachrechnung wurden Defizite in der Dimensionierung der Schweißnahtverbindungen des Fahrbahnplatten-Deckblechs mit den Obergurtflanschen des Hauptträgers festgestellt. Insbesondere in den Stützbereichen im Bereich der Pfeiler treten rechnerisch Spannungsüberschreitungen auf. Zudem ist insbesondere in kalten Jahreszeiten mit einer erhöhten Sprödbruchgefahr der Schweißnähte an den Schottblechen zu rechnen. Da bereits Ermüdungsschäden aus der Bauwerksprüfung bekannt sind und eine konstruktive Behebung der Defizite des Ermüdungswiderstands nicht möglich ist, wurden zur Sicherstellung der reduzierten Restnutzungsdauer regelmäßige Sonderprüfungen erforderlich. Zusätzlich wurde die Machbarkeit eines Dauermonitorings mittels Schallemissionsprüfung untersucht.

Zum Zeitpunkt der Untersuchungen konnte die Schallemissionsprüfung nicht als Stand der Technik für das Dauermonitoring von Bestandsbrücken

eingeordnet werden, weshalb vorab 10-tägige Testmessungen an ausgesuchten Schottblechen durchgeführt wurden. Nach positiven Messergebnissen wurden weitere 51 Körperschallsensoren an den Schottblechen der kritischen Stellen in den Pfeilerbereichen installiert (Bild 2). Insbesondere bei kalten Temperaturen kann es zu Störsignalen kommen, weshalb zu Plausibilisierung der Schallmessung an vier Stellen an der Fahrbahnober- und Unterseite und am Untergurt des Hauptträgers Temperatursensoren zu Messung der Oberflächen- und Außenlufttemperatur installiert wurden. Die Messzentrale wurde in der Widerlagerkammer zur Datenerfassung und Datenfernübertragung in einem klimatisierten Schrank untergebracht (Bild 3).

Um umgehend auf Schadensereignisse reagieren zu können, wurde eine Alarmierungskette eingerichtet. Bei Überschreitung der vom Gutachter definierten Risslänge und Eingang eines entsprechenden Schallsignals erfolgt eine direkte Alarmierung der Bauwerksprüfung. Den Alarmmeldungen folgt eine sofortige Sichtprüfung und Magnetprüfung der entsprechenden Schweißnähte und eventuelle Sofortmaßnahmen. Bei Überschreitung der vom Gutachter definierten Risslänge erfolgt ein definierter Alarmprozess.

Folgerung

Durch die dauerhafte Überwachung der Schottbleche mittels Schallemissionsprüfung konnte auf Rissentwicklungen umgehend mit gezielten Bauwerksuntersuchungen bzw. Sonderprüfungen reagiert werden. In den ersten Wintermonaten des Dauermonitorings konnten stellenweise Rissänderungen und Rissneubildungen festgestellt werden, welche eine Alarmmeldung auslösten und umgehend gutachterlich analysiert wurden. Trotz Rissentwicklung wurden keine kritischen Zustände erreicht, sodass der Verkehr während der gesamten

Kälteperiode aufrechterhalten werden konnte. In den wärmeren Monaten wurden keine Rissentwicklungen detektiert, die Alarmmeldungen blieben aus. Die Schallemissionsprüfung bleibt bis zum Ersatzneubau als Ergänzung der Bauwerksprüfung in Betrieb. Durch das Dauermonitoring konnte die verkehrliche Nutzung aufrechterhalten werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen



Bild 1: Ansicht der Talbrücke, Quelle: Hessen Mobil

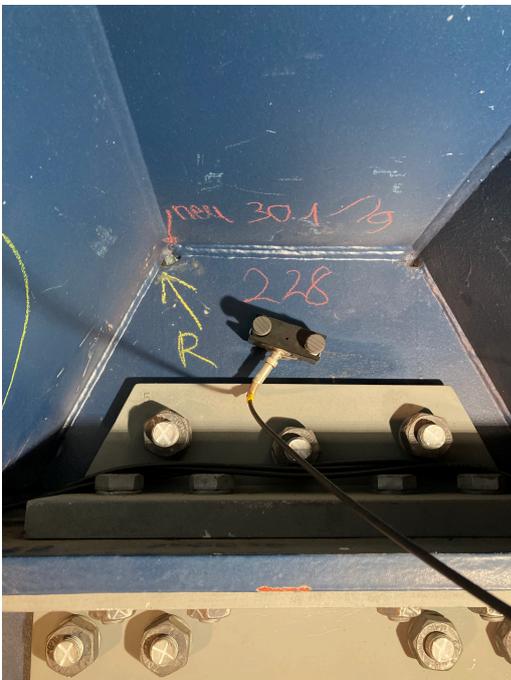


Bild 2: Magnetische Installation der SEA-Sensoren an einem Schottblech, Quelle: Hessen Mobil, Bilfinger Noell GmbH



Bild 3: Messzentrale, Quelle: Bilfinger Noell GmbH

Monitoring 12.2 Detektion von Spanndrahtbrüchen infolge Spannungsrisskorrosion

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	34,00 – 40,00 – 40,00 – 40,00 – 20,00	m
1.2 Zahl der Felder:	5	
1.3 Brückenfläche:	6412	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 30/30 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1969	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Zellenkasten (mit Querverteilung)
2.4 System der Lagerung:	Topflager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Vollquerschnitt
2.6 Widerlager:	Widerlagerwand
2.7 Gründung:	Flachgründung ohne zusätzliche Maßnahmen
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	-

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton, Hennigsdorfer Spannstahl
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B300 nach DIN 1045
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B225 nach DIN 1045 bis 1972

4. Baugrund

-

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Fehlende Redundanz der Vorspannung durch Verwendung von Spannblochverfahren mit konzentriertem Spannglied
- Verbau von spannungsrisskorrosionsgefährdetem Hennigsdorfer Spannstahl
- Sperrung des Bauwerks wegen einer Vielzahl neu auftretender Risse an den Stegen des Haupttragwerks (ins besondere Längsrisse) und Feststellung von Hohlstellen
- Feststellung eines hohen Versprödungsgrads der Spannglieder und Sprödbbruch in Zugproben im Zuge einer Schadensanalyse

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Körperschallsensor Typ Vallen VS30
 - Messbereich Sensortechnik: 25 bis 80 (0 dB Vorverstärkung) kHz
 - Erwartete Messunsicherheit: Signallokalisierung mit einer Ortsungengenauigkeit von 5 m
 - Temperaturkompensation: -
 - Gesamttechnischer Umfang: Je Körperschallsensor separate Rechenzentrale, Rechner zur Datensicherung, LTE-Router, Verstärker zur Datenübertragung
- 2. Grund des Monitorings:** Detektion und Überwachung von Spanndrahtbrüchen bei Spannungsrisskorrosion, Sprödbruchgefahr und bekannte Schäden
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 75 Körperschallsensoren
- 4. Messort am Bauwerk:** Längsträger Haupttragwerk
- 5. Installationsbereich:** Längsträger in den Hohlkästen
- 6. Installationsart:** Befestigung mittels Magnethaltern und Heißkleber als Koppelmittel an verdübelten magnetischen Stahlplatten
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 325.000,00 €
 - Planungskosten: *In Installationskosten enthalten* €
 - Installationskosten: 250.000,00 €
 - Betriebskosten: 150.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** 10 Tage, Juni 2020
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Langzeitmonitoring, 12 Monate
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Straßenbauverwaltung
 - Erstellung Monitoringkonzept: Straßenbauverwaltung
 - Ausführungsplanung Messsystem: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (Dienstleister für zerstörungsfreie Prüfung*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Datenaufbereitung: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Ziel der Messung: | Überwachungsmaßnahme als
Sicherungsmaßnahme bei Schadensfortschritt |
| 2. Messgrößen: | |
| - Körperschall: | 25 bis 80 kHz |
| 3. Abtastrate: | |
| - Körperschall: | Bis zu 40 MHz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Körperschall: | Eventbasiert, abhängig von Schwellwert |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Echtzeitauswertung |
| 5. Daten: | |
| - Körperschall: | Parameter entsprechend DIN EN 13477-1 |
| 6. Datenformat: | Quelloffenes Format SQLite3, *.priDB, *.traDB |
| 7. Datenerfassung: | Speicherung und Auslesung am Server vor Ort |
| 8. Datenübertragung: | Upload am webbasierten Dashboard |
| 9. Datenmanagementsystem: | Firmeneigene Software und Auswertealgorithmus |
| 10. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Automatisierte Echtzeitauswertung |
| - Ausgabe: | Webbasiertes Dashboard |
| 11. Datenverwendung: | Überwachungsmaßnahme zur Sicherung des Betriebs der überführten Verkehrswege |
| 12. Alarmierungsplan: | Vorhanden |
| - Grenzwert: | E-Mail Alarm bei charakteristischem Schallsignal eines Spanndrahtbruchs, |
| - Alarmierungskette: | Spezialdienstleister für Bauwerksmessung
→ Bauwerksprüfung |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Bauwerksprüfung |

Beschreibung des Monitorings

Die Spannbetonbrücke besteht aus zwei Teilbauwerken mit jeweils 5 Feldern, wobei das Haupttragwerk eine zweigleisige Straßenbahnlinie und eine Bundesstraße überführt (Bild 1). Der Überbau ist als neunzelliger Hohlkasten ausgeführt. Die Längsträger des Haupttragwerks wurden mit jeweils einem konzentrierten Spannglied im Spannblockverfahren ohne Zusatzspannglieder im Stützbereich vorgespannt. Hieraus ergibt sich für die Längsträger eine fehlende Redundanz hinsichtlich der Spannglieder. Als Spannstahl kam der Heringsdorfer Spannstahl zum Einsatz, welcher sich als empfindlich auf Spannungsrisskorrosion erweist. In Untersuchungen konnte zudem eine Versprödung des Spannstahls und Spröbruch bzw. das Fehlen einer plastische Dehnungsreserve festgestellt werden. Aufgrund neu auftretender Risse an den Stegen des Haupttragwerks, insbesondere Längsrisse und festgestellten Hohlstellen an den Längsträgern, wurde das Bauwerk gesperrt und ein schnellstmöglicher Abbruch eingeleitet. Bis zum Abbruch waren 12 Monate zu überbrücken, in welchen die überführten Verkehrswege weiter in Betrieb gehalten werden sollten. Hierfür wurde ein umfangreiches Überwachungskonzept aufgestellt, welches das Fortschreiten der Schäden durch die Versprödung des verbauten Spannstahls berücksichtigt. Die weitere Schadentwicklung wurde in Form von Längsrissen erwartet.

Als Überwachungsmaßnahmen wurden Durchbiegungsmessungen in Feldmitte, punktuelle Rissüberwachungen von Bereichen mit Schädigungsentwicklung und die Detektion möglicher Spanndrahtbrüche mittels Schallemissionsanalyse umgesetzt. Die Anordnung der Körperschallsensoren wurde so umgesetzt, dass ein Signal von zwei Sensoren detektiert werden konnte. Die Identifikation

der Spanndrahtbrüche und Ortung am Längsträger erfolgte mit einer Genauigkeit von mindestens 5 m. Die Sensoren wurden auf Höhe des Spannglieds an die Seitenwand des Längsträgers appliziert (Bild 3). Jeder Längsträger wurde über die Länge des Bauwerks äquidistant mit Sensoren bestückt.

Zur Verifikation der Schallsignale wurden bei der Installation Spannstahlproben entnommen und die Schallemissionssignale künstlich herbeigeführter Spannstahlbrüche gemessen. Die Signale dienten der automatisierten Datenanalyse während des Monitoringbetriebs als Referenzwert zur Signalbewertung. Während der Monitoringdauer wurden regelmäßige Überprüfungen des Messsystems der Schallemissionsanalyse und der Algorithmen zur Ortung des Schallsignals durchgeführt. Mittels Bleistiftminenbruchs gemäß DIN EN 1330-9 Abs. 6.16 wurde die Qualität der Ankopplung der Sensoren an das Bauwerk geprüft und mit den Referenzwerten zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme abgeglichen. Während der gesamten Monitoringdauer konnte keine Veränderung der Ankopplungsgüte festgestellt werden. Zusätzlich fand eine regelmäßige Validierung der Signallokalisierungsanalyse mittels der Erzeugung von Testsignalen mit einem Rückprallhammer vom Typ „Original-Schmidt Betonprüfhammer Typ N, 2,207 Joule statt.

Eine detaillierte Beschreibung kann dem folgenden Beitrag entnommen werden (Kaplan, 2022):

Kaplan, F.; Steinbock, O.; Saloga, K.; Ebell, G.; Schmidt, S. (2022), Überwachung der Brücke am Altstädter Bahnhof. Bautechnik 99, H. 3, S. 222–230. <https://doi.org/10.1002/bate.202200008>

Folgerung

Während der gesamten Monitoringdauer von 12 Monaten konnten 111 Spanndrahtbrüche in Echtzeit erfasst werden (Bilder 2 und 4). Im Fall von Spanndrahtbrüchen wurden die Projektbeteiligten direkt per E-Mail benachrichtigt. In der folgenden handnahen Bauwerksprüfung konnten teilweise

neue Rissentwicklungen im Bereich der lokalisierten Signalstelle festgestellt werden. Trotz des hohen Schadensfortschritts konnte durch die Überwachungsmaßnahmen ein sicherer Betrieb der unterführten Verkehrswege gewährleistet werden.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

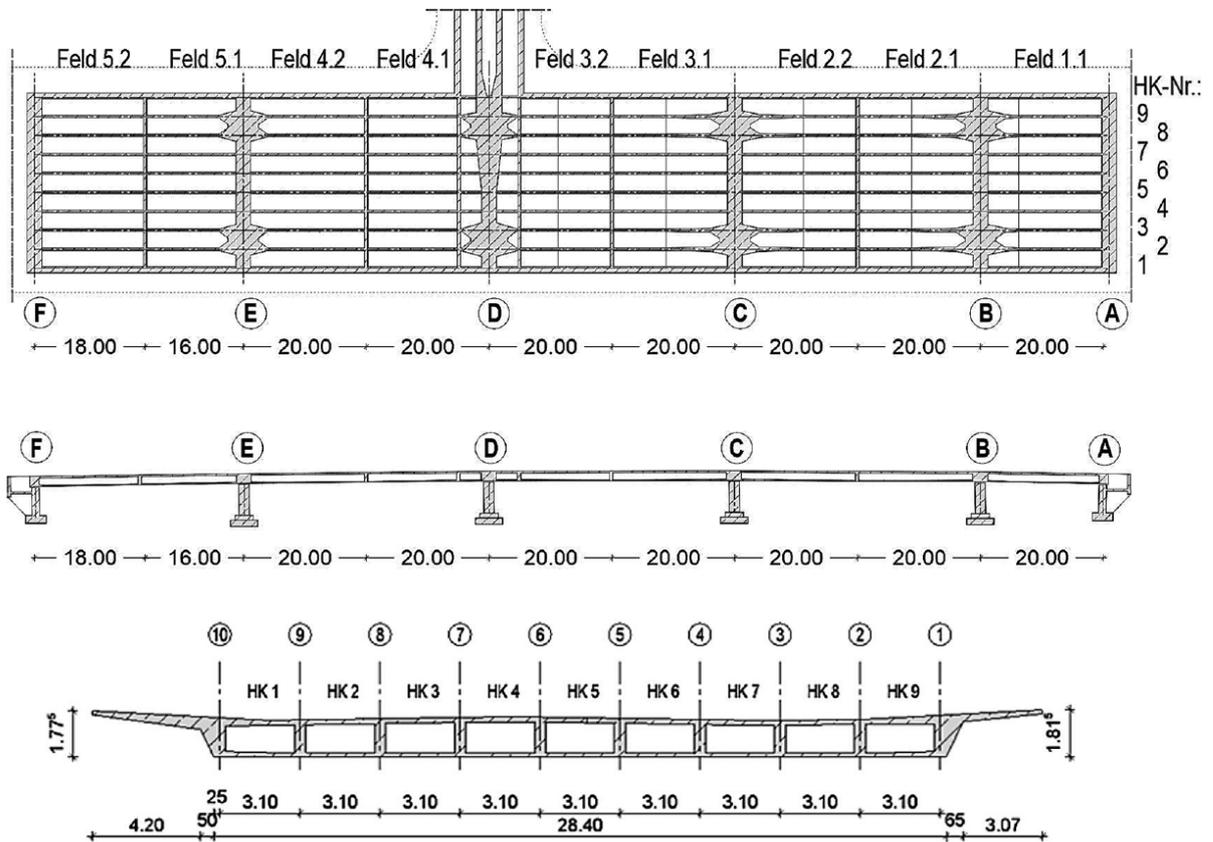
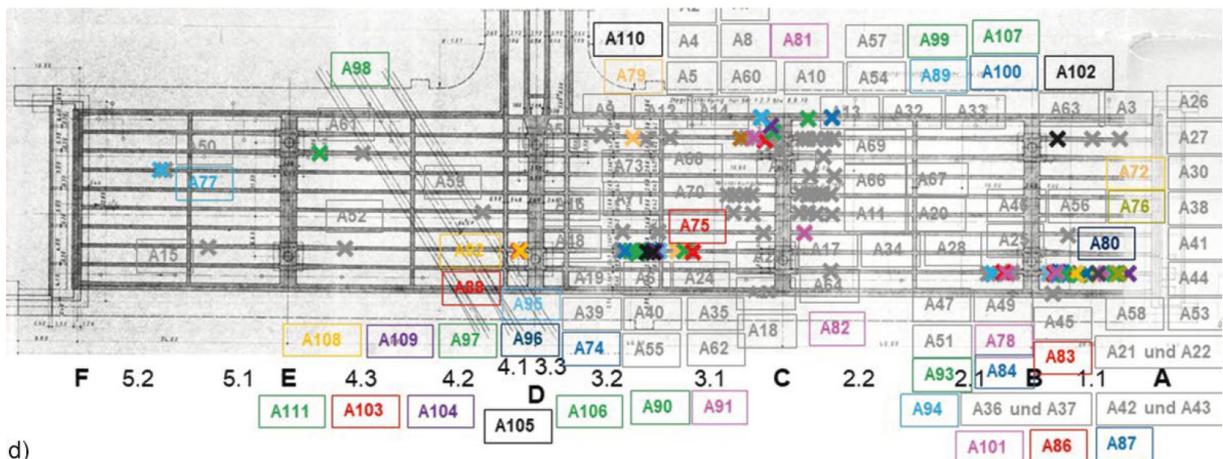


Bild 1: TBW 1 Draufsicht, Längsschnitt, Querschnitt, Quelle: Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg, (Kaplan, 2022)



d)

Bild 2: Spanndrahtbrüche im Zeitraum März–Mai 2021, Quelle: Bilfinger Noell GmbH, (Kaplan, 2022)



Bild 3: Installation eines AE-Sensors an der Betonoberfläche, Quelle: Bilfinger Noell GmbH

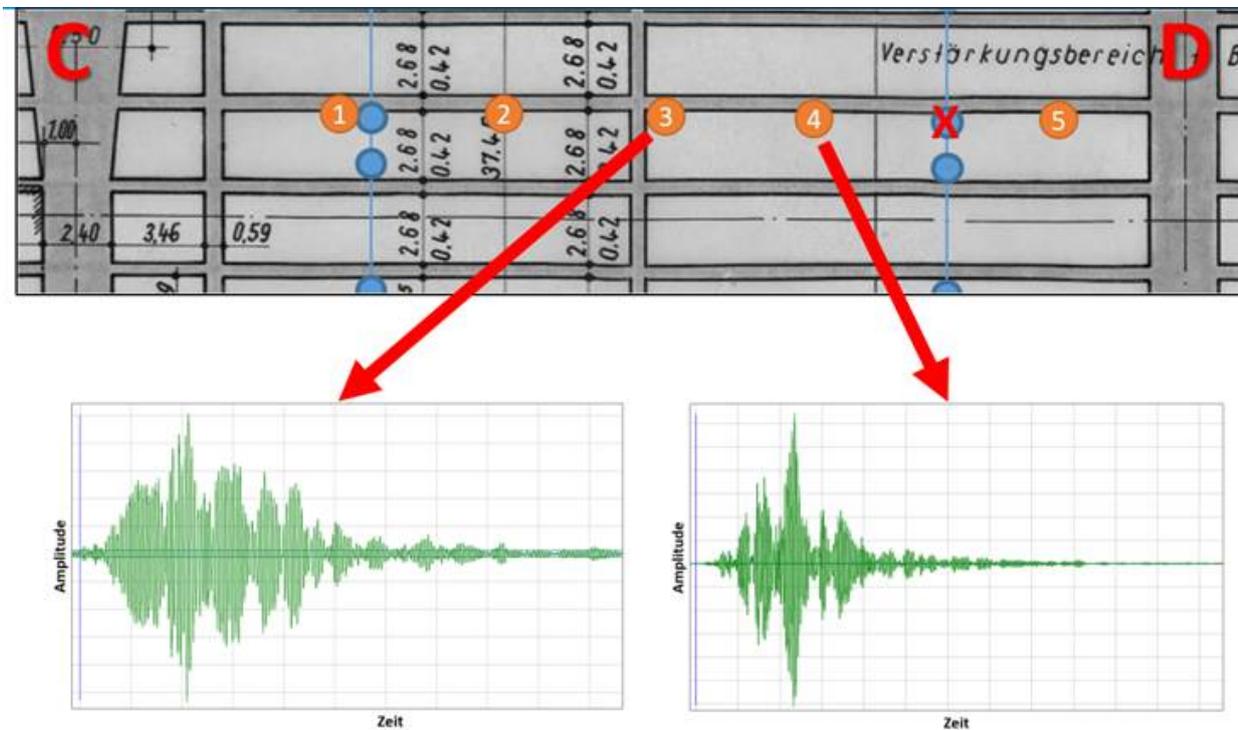


Bild 4: Exemplarische Darstellung des Schallsignals eines Spanndrahtbruchs, Quelle: Bilfinger Noell GmbH

Monitoring 12.3 Detektion von Spannstabbrüchen infolge Spannungsrisskorrosion

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	38,15 -78,00 – 33,65	m
1.2 Zahl der Felder:	3	
1.3 Brückenfläche:	3625	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	80	gon
1.5 Brückenklasse:	BK 45 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1954	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	3-feldriges semi-integrales Spannbetonbauwerk
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Hohlkastenbrücke (Freivorbau), Trägerrost im Feldbereich
2.4 System der Lagerung:	Monolithisch in Feldmitte, Elastomerlager am Widerlager
2.5 Pfeiler / Stützen:	Verjüngende Pfeiler
2.6 Widerlager:	Kastenwiderlager
2.7 Gründung:	Tiefgründung, Pfahlgründung
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtet

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B450 laut urspr. Berechnung, C70/85 laut Messung 2020 an Betonkernen; DYWIDAG Spannstäben Ø26 St 80/105
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B450 laut urspr. Berechnung, C70/85; (Messung 2020)
3.3 Widerlager:	Stahlbeton: B450 laut urspr. Berechnung, C70/85; (Messung 2020)
4. Baugrund	Gründung im Uferbereich

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Verpressfehler
- Korrosion an Spannstäben
- freiliegende Hüllrohre

Angaben zur Art des Monitorings

1. **Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Körperschallsensoren VS30-SIC-V2-0dB, System AMSY-6 mit 72 Kanälen (Fa. Vallen Systeme GmbH)
 - Messbereich Sensortechnik: 25 bis 80 kHz
 - Erwartete Messunsicherheit: Lineare Ortung, Ortungsgenauigkeit rd. 2 m
 - Temperaturkompensation: AE-System ohne eigene Bauwerkstemperaturmessung, Temperaturmessung im Schaltschrank zur Geräteüberwachung
 - Gesamttechnischer Umfang: Körperschallsensoren, Multichannel AE Messsystem, Vallen AMSY-6, IPC, LTE-Router
2. **Grund des Monitorings:** Spannstabbruchdetektion mittels Schallemissionsanalyse, Feststellung von Spannstahlbrüchen in Echtzeit
3. **Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 72 AE – Sensoren, System AMSY-6 mit 72 Kanälen
4. **Messort am Bauwerk:** Träger und Fahrbahnplatten
5. **Installationsbereich:** Seitenflächen Stege, Unterseite Fahrbahnplatte
6. **Installationsart:** Sensorhalterungen Dübel/Schraube, akustische Kopplung mit 2K-Harz
7. **Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 600.000,00 €
 - Planungskosten: 20.000,00 €
 - Installationskosten: 375.000,00 €
 - Betriebskosten: 40.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *In Betriebskosten enthalten* €/Jahr
8. **Zeitraum/ Dauer der Installation:** März bis August 2020
9. **Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, 2020 bis ENB
10. **Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro mit Tätigkeitsfeldern Zerstörungsfreie Prüfung, Instandsetzung, Bauwerksmonitoring) in Abstimmung mit Tragwerksplaner und Bauherr
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro)
 - Bewertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro) in enger Abstimmung mit Tragwerksplaner

Informationsgewinn und Datenmanagement

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1. Ziel der Messung: | Spannstabbruchdetektion mittels Schallemissionsanalyse, Feststellung von Spannstahlbrüchen in Echtzeit |
| 2. Messgrößen: | |
| - Körperschall: | 25 bis 80 kHz |
| 3. Abtastrate: | |
| - Körperschall: | 10 MHz |
| 4. Frequenz Datenaufzeichnung: | |
| - Körperschall: | Bei Schwellwertüberschreitung, 10 MHz |
| 5. Frequenz Datenauswertung: | Automatisierte Routinen: kontinuierlich, individuelle Systemkontrolle/ Datensichtung periodisch wöchentlich |
| 5. Daten: | |
| - Körperschall: | Momentanwert |
| 6. Datenformat: | Herstellerspezifisches Format *.pridb, *.tradb |
| 7. Datenerfassung: | System AMSY-6 (Vallen) |
| 8. Datenübertragung: | LTE-Router |
| 9. Datenmanagementsystem: | Vallen pridb (Hintergrund Datenbank) |
| 10. Datenauswertung: | |
| - Prozess: | Vallen Visual AE |
| - Ausgabe: | Grafik Formate, Text/Tabellen
Verfügbarkeit der Daten über eine Online-Plattform
Überwachungssystem |
| 11. Datenverwendung: | |
| 12. Alarmierungsplan: | Vorhanden |
| - Grenzwert: | Charakteristisches Schallsignal bei Spannstabbruch |
| - Alarmierungskette: | Spezialdienstleister für Bauwerksmessung/
Fachplaner Monitoring → Tragwerksplaner
→ Regierungspräsidium |
| - Zuständigkeit im Alarmfall: | Regierungspräsidium |

Beschreibung des Monitorings

Im Prüfbericht der Bauwerksprüfung wurde die Spannbetonbrücke im Jahr 2012 als kritisch mit der Note 3,4 bewertet. In darauffolgenden Messungen wurden vier Verdachtsfälle auf gerissene Spannstäbe der Längsvorspannung festgestellt. Aufgrund der Schädigung durch Korrosion und der gestiegenen Verkehrslasten konnte nicht ausgeschlossen werden, dass es unter Betrieb zu weiteren spontan auftretenden Spannstabbrüchen kommt. Um den Betrieb bis zum ENB weiter aufrechterhalten zu können, wurde neben dem bereits

bestehenden Monitoringsystem der Dehnungs- und Rissüberwachung (siehe Monitoring 10.3) eine Verschärfung der Überwachung durch Körperschallsensoren beschlossen. Über die Anordnung der Sensoren kann das gesamte Bauwerk schalltechnisch erfasst werden. Die Sensoranordnung ist auf eine lineare Ortung entlang der Träger und in den Fahrbahnplatten ausgelegt (Bilder 1 bis 4). Im Rahmen der Installation erfolgte eine Verifizierung der Signalaufzeichnung und Quellortung durch Anregungen mit dem Rückprallhammer.

Folgerung

Bis zum derzeitigen Zeitpunkt wurden keine spezifischen Schallsignale für Spannstababbrüche gemessen (Bild 5). Schäden infolge Spannstababbrüchen konnten somit ausgeschlossen werden. Mit Hilfe des Überwachungssystems der Schallemissionsanalyse konnte das Bauwerk trotz Schädigung weiter in Betrieb gehalten werden. Das Dauermonitoring bleibt bis zur Errichtung des Ersatzneubaus als Sicherungsmaßnahme bestehen.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

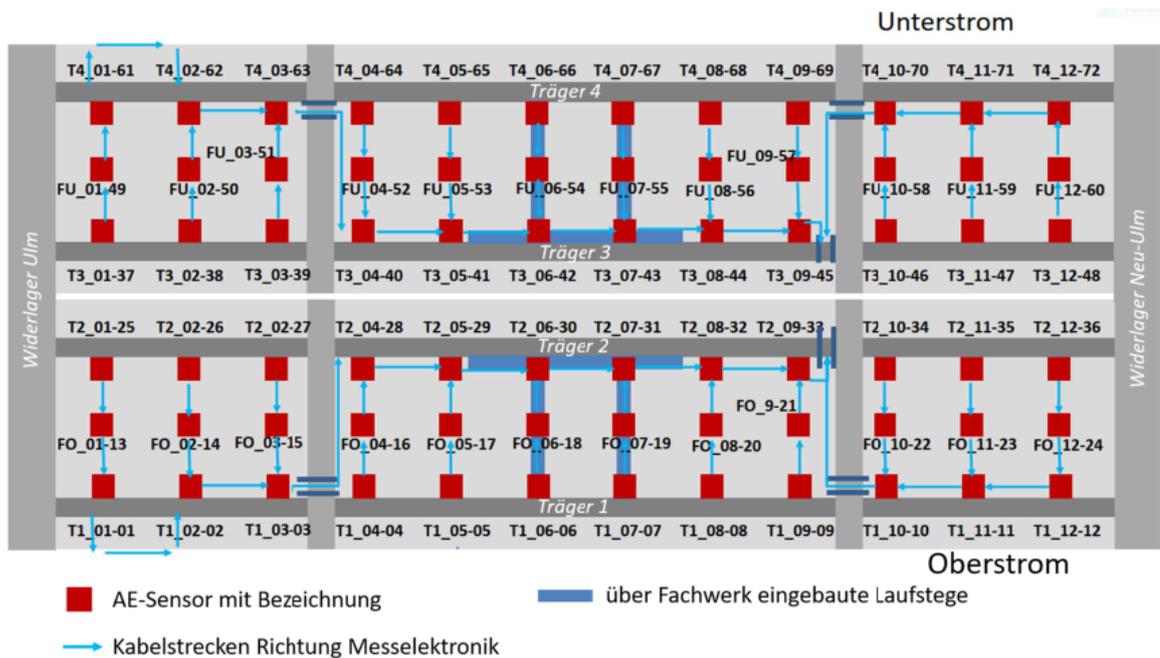


Bild 1: Sensorpositionen und Kabelstrecken am Bauwerk, Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

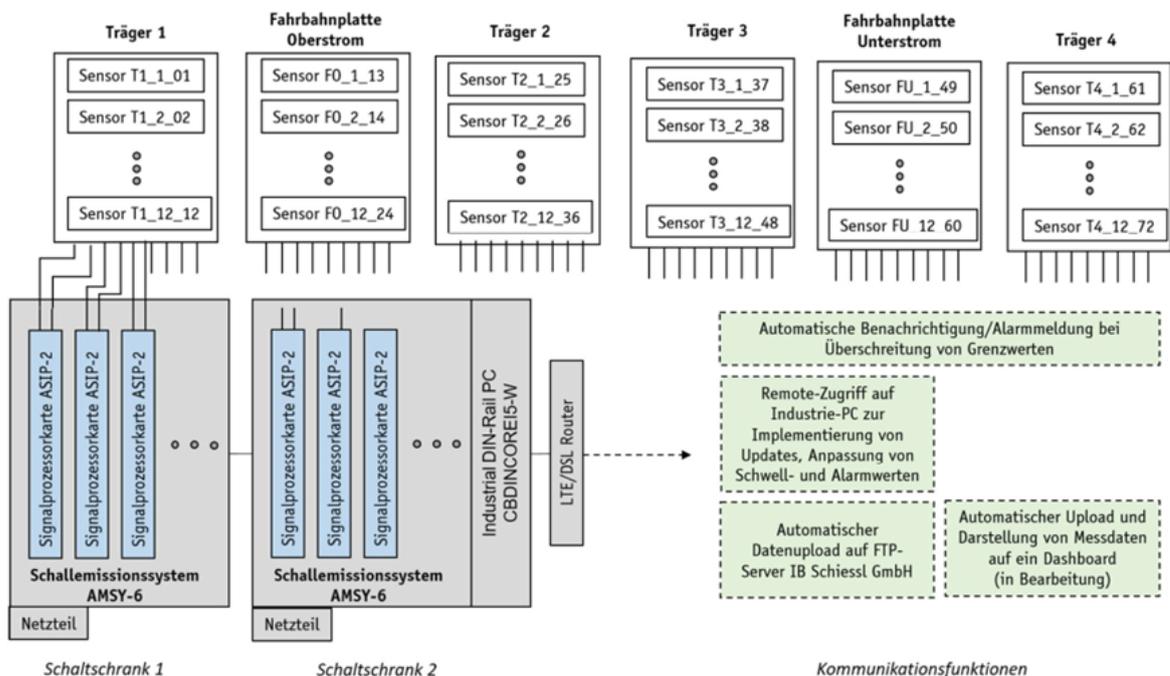


Bild 2: Schema der Messkette, Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH



Bild 3: Schaltschränke (oben) des Schallemissionssystems,
Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

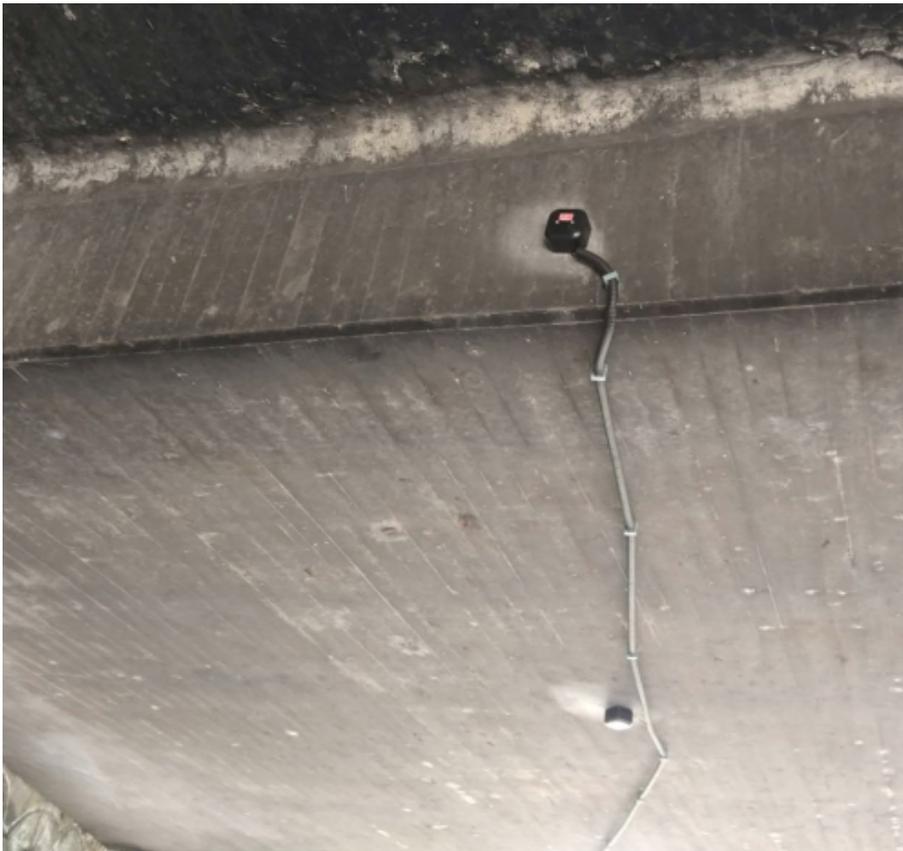


Bild 4: Einbausituation Schallemissionssensoren,
Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

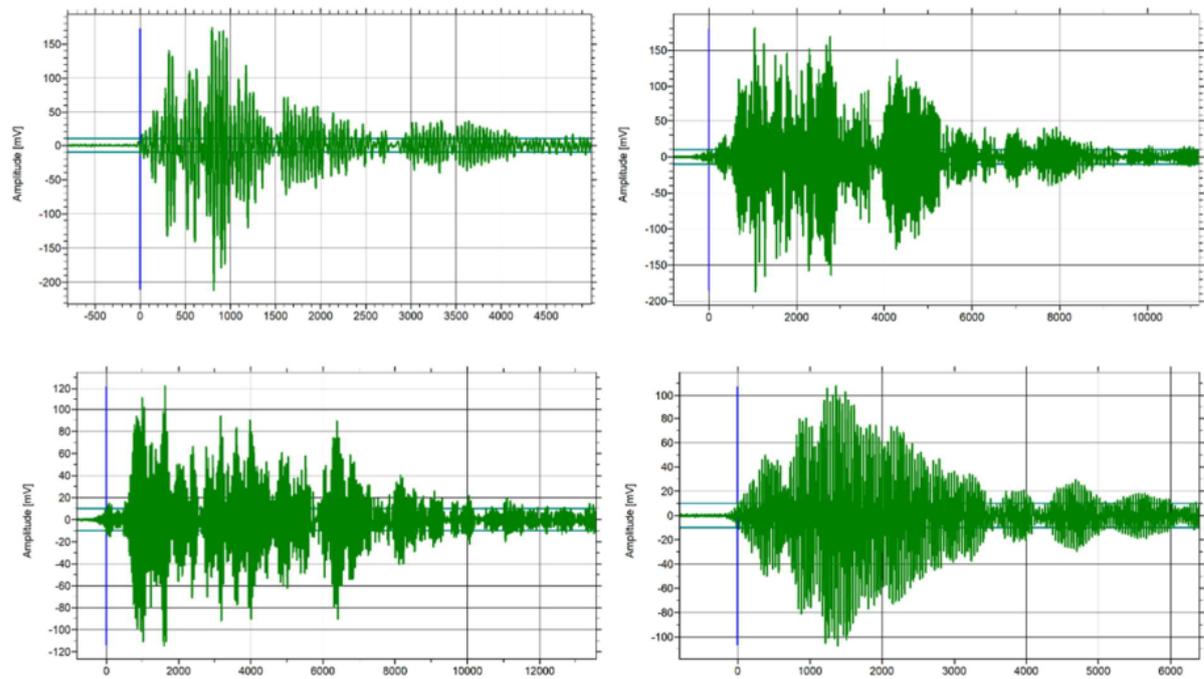


Bild 5: Lokalisierte Ereignisse (oben), welche die Kriterien erfüllen, aber für Bruchsignale untypische Signalverläufe (unten) aufweisen. Datenbeispiel aus März 2021, Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

Monitoringmaßnahme:	12. Schallemissionsanalyse	Lfd. Nr.:	12.4	Blatt:	1
---------------------	----------------------------	-----------	------	--------	---

Monitoring 12.4 Bauwerksüberwachung zur Feststellung von Spannstahlbrüchen

Bauwerksdaten

1. Allgemeine Angaben

1.1 Einzel- und Gesamtstützweiten:	82,40	m
1.2 Zahl der Felder:	1	
1.3 Brückenfläche:	1483	m ²
1.4 Bauwerkswinkel:	100	gon
1.5 Brückenklasse:	Ursprünglich BK 45 nach DIN 1072, Rückstufung auf BK 30 nach DIN 1072	
1.6 Baujahr:	1950	

2. Angaben zur Konstruktion

2.1 Hauptbaustoff:	Spannbeton	
2.2 Bauwerkssystem in Längsrichtung:	Rahmenkonstruktion	
2.3 Bauwerkssystem in Querrichtung:	Plattenbalken, gevoutete Hauptträger	
2.4 System der Lagerung:	Monolithisch	
2.5 Pfeiler / Stützen:	Druckstütze mit vorgespannten schrägen Zugstützen, Druckstrebenverbund zum alten Widerlager	
2.6 Widerlager:	-	
2.7 Gründung:	Flachgründung	
2.8 Belag, Oberflächen- und Korrosionsschutz:	Unbeschichtet	

3. Baustoffe

3.1 Überbau:	Spannbeton: B300 und B450 gemäß urspr. Planung, Stabspannglieder St 60/90	
3.2 Pfeiler/ Stützen:	Stahlbeton: B300 gemäß urspr. Planung, Zugstreben: Spannbeton B300, Stabspannglieder St 60/90	
3.3 Widerlager:	-	
4. Baugrund	Uferbereich	

5. Für das Monitoring bedeutsame Bauwerks- und Bauteilmerkmale

- Verpressfehler bzw. stellenweise unvollständige Verpressung der Spannglieder
- Korrosionsbedingte Querschnittsschwächungen der Spannstäbe
- Freiliegende Hüllrohre, beschränkter Vorspannung mit nachträglichem Verbund
- Örtlich erhöhte Chloridgehalte im Beton

Angaben zur Art des Monitorings

- 1. Messtechnik:**
 - Sensortechnik: Piezobasierte Körperschallsensoren Typ Vallen S30-SIC-46dB
 - Messbereich Sensortechnik: 25 bis 80 kHz
 - Erwartete Messunsicherheit: Signallokalisierung in Zonen von 10 m
Typ. Rauschen 18.5 dB @ 25 - 45 kHz
 - Temperaturkompensation: Nicht erforderlich, Bauteiltemperaturmessung mit
Temperaturmessfühlern PT1000 zur Abschätzung
thermischen Zwangs
 - Gesamttechnischer Umfang: Körperschallsensoren, Multichannel AE
Messsystem, Industrie PC, LTE-Router
- 2. Grund des Monitorings:** Spannstabbruchdetektion mittels
Schallemissionsanalyse,
Feststellung von Spannstahlbrüchen in Echtzeit
- 3. Umfang/ Anzahl der Sensoren:** 32 piezobasierte Schallemissionssensoren,
16 Dehnungsmessstreifen
4 integral verlängerte Wegaufnehmer über 2 m
13 Temperatursensoren PT1000
- 4. Messort am Bauwerk:** 4 Stege, 8 Zugglieder
- 5. Installationsbereich:** Stegseitenflächen
- 6. Installationsart:** Sensorhalterungen Dübel/Schraube,
Kopplung ans Bauwerk mit konstanter Kraft über
Federelemente, zusätzliche Klebung mittels
Injektionsmörtel, Witterungsschutz über
Abdeckkappe
- 7. Kosten der Monitoringmaßnahme:**
 - Gesamtkosten: 580.000,00 €
 - Planungskosten: 52.000,00 €
 - Installationskosten: 528.000,00 €
 - Betriebskosten: 80.000,00 €/Jahr
 - Kosten Datenmanagement: *in Betriebskosten enthalten* €/Jahr
- 8. Zeitraum/ Dauer der Installation:** November 2018
- 9. Zeitraum/ Dauer der Datenerfassung:** Dauermonitoring, seit 2019 laufend bis ENB
- 10. Zuständigkeiten Monitoringphasen:**
 - Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung: Fachplaner Monitoring (Ingenieurbüro mit
Tätigkeitsfeldern Zerstörungsfreie Prüfung,
Instandsetzung, Bauwerksmonitoring*) in
Zusammenarbeit mit Tragwerksplaner
 - Erstellung Monitoringkonzept: Fachplaner Monitoring (*)
 - Ausführungsplanung Messsystem: Fachplaner Monitoring (*)
 - Installation, Betrieb, Datenerhebung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Datenaufbereitung: Fachplaner Monitoring (*)
 - Auswertung der Messergebnisse: Fachplaner Monitoring (*)
 - Bewertung der Messergebnisse: Tragwerksplaner in Abstimmung mit Prüfeningenieur

Informationsgewinn und Datenmanagement

1. **Ziel der Messung:** Spannstabbruchdetektion mittels Schallemissionsanalyse, Feststellung von Spannstahlbrüchen in Echtzeit
2. **Messgrößen:**
 - Körperschall: 25 bis 80 kHz
3. **Abtastrate:**
 - Körperschall: 10 MHz
4. **Frequenz Datenaufzeichnung:**
 - Körperschall: Ereignisbasiert bei definierter Schallüberschreitung
5. **Frequenz Datenauswertung:** Automatisierte Routinen: kontinuierlich, individuelle Systemkontrolle/ Datensichtung periodisch wöchentlich
5. **Daten:**
 - Körperschall: Momentanwert
6. **Datenformat:** Herstellerspezifisches Format: *.pridb, *.tradb
7. **Datenerfassung:** System AMSY-6 (Vallen)
8. **Datenübertragung:** LTE-Router
9. **Datenmanagementsystem:** Vallen pridb (Hintergrund Datenbank)
10. **Datenauswertung:**
 - Prozess: Vallen Visual AE
 - Ausgabe: Grafik Formate, Text/Tabellen
11. **Datenverwendung:** Überwachungssystem, Verfügbarkeit der Daten über eine Online-Plattform
Vorhanden
12. **Alarmierungsplan:**
 - Grenzwert: Charakteristisches Schallsignal bei Spannstabbruch
 - Alarmierungskette: Spezialdienstleister für Bauwerksmessung/ Fachplaner Monitoring → Tragwerksplaner → Regierungspräsidium
 - Zuständigkeit im Alarmfall: Regierungspräsidium

Beschreibung des Monitorings

Bei der Rahmenbrücke in Spannbetonbauweise handelt es sich um einen der ersten ausgeführten Spannbetonbauten mit nachträglichem Verbund. Infolge der damals fehlenden Erfahrungswerte konnten bei Untersuchungen zahlreiche Verpressfehler und Korrosionsschäden an den Spanngliedern festgestellt werden. Trotz der hohen korrosionsbedingten Querschnittsverluste des Spannstahls konnten keine Spannstahlbrüche festgestellt werden. Es wurde davon ausgegangen, dass der Spannstahl ein gutmütiges Bruchverhalten aufweist und nicht kerbempfindlich ist. Eine zielsichere Vorhersage des Risikos ermüdungsbedingter Spannstabbrüche konnte vor dem Hintergrund der Korrosionsschäden und fortschreitenden chloridinduzierten Korrosionsvorgänge nicht gemacht werden. Eine Verstärkung des Bauwerks konnte aus geometrischen Gründen und ohne Vollsperrung nicht mit vertretbarem Aufwand realisiert werden. Hinsichtlich der fortschreitenden Schädigung des Tragwerks und rechnerischen Tragfähigkeitsdefiziten aus der Nachrechnung wurde die Konzeptionierung eines Monitoringsystems als Sicherheitselement zur Aufrechterhaltung des Betriebs bis zum Ersatzneubau angestrebt. Als Gesamtmonitoringsystem wurden folgende Messsysteme installiert (Bild 1):

- Schallemissionssensoren zur Detektion von Spanndrahtbrüchen
- Dehnungsmessstreifen zur Messung der Dehnung am Spannstahl*
- Wegaufnehmer (integral über 2 m) zur Messung von Tragwerksverformungen im Schadensfall*
- Temperatursensoren zur Temperaturkompensation der Dehnungsmessstreifen und Wegaufnehmer und Ermittlung des temperaturbedingten Zwangs*

* In der Beispielsammlung nicht beschrieben.

Als dauerhaftes Überwachungssystem für Spanndrahtbrüche wurden 36 AE-Sensoren mit 46 dB Vorverstärkung und einem Frequenzbereich von 25 bis 80 kHz an den vier Stegen und acht Zuggliedern angebracht. Die Sensoren wurden über eine am Bauwerk verschraubte Sensorplatte an den

Stegseiten mit dem Bauwerk verbunden und werden über Federn mit einem gleichmäßigen Anpressdruck mit dem Bauwerk gekoppelt (Bild 2).

Die Körperschallsensoren wurden so angeordnet, dass das gesamte Bauwerk messtechnisch abgedeckt ist und Schallereignisse infolge Spannstabbrüchen in Zonen eingeordnet werden können. Die Ermittlung des erforderlichen Sensorabstands in Abhängigkeit der Dämpfung der Konstruktion erfolgte vorab über eine künstliche Schallerzeugung mit einem Rückprallhammer (Bild 3). Spannstabbrüche weisen eine spezifische Schallerkennung nach Amplitude und Frequenzgang auf und können dadurch von anderen Schallereignissen unterschieden werden. Zur Detektion von Bruchereignissen werden Schallsignale über einem definierten Schwellwert nach Amplitude, Länge des Schallsignals und Gesamtenergie ausgewertet. Bei Erreichen der Grenzwerte wird automatisiert eine Alarmmeldung per SMS und E-Mail an den zuständigen Personenkreis versandt. Zur Festlegung der Grenzwerte der Messsysteme, Identifikation von Schallsignalen und Verifizierung der rechnerischen Annahmen in der Nachrechnung wurde eine Probelastung durchgeführt. Über die gemessenen Schallsignale aus Überfahrten konnten Ausschlusskriterien für die Alarmkriterien definiert werden.

Eine detaillierte Beschreibung der Überwachungsmaßnahme kann den folgenden Beiträgen entnommen werden ((Sodeikat et al. 2019), (Müller et al. 2020)):

Sodeikat, C., Groschup, R., Knab, F. and Obermeier, P. (2019), *Acoustic Emission in der Bauwerksüberwachung zur Feststellung von Spannstahlbrüchen*.

Beton- und Stahlbetonbau, 114: 707-723.
<https://doi.org/10.1002/best.201900041>

Müller, A., Sodeikat, C., Schänzlin, J., Knab, F., Albrecht, L., Groschup, R. and Obermeier, P. (2020), *Die Gänstorbrücke in Ulm – Untersuchung, Probelastung und Brückenmonitoring*.
Beton- und Stahlbetonbau, 115: 164-178.
<https://doi.org/10.1002/best.201900071>

Folgerung

Während des bisherigen Monitoringzeitraums konnten keine Spannstabbrüche festgestellt werden. Allerdings konnten durch die AE Sensoren starke Schallereignisse verzeichnet werden, welche sich nach Überprüfung der Kamerabilder und Verifizierung mit den Messungen des Gesamtmonitoringsystems als Überfahrt eines nicht genehmigten Schwerlasttransports rausstellten.

Bilder, Installationsskizzen und Messwertgraphen

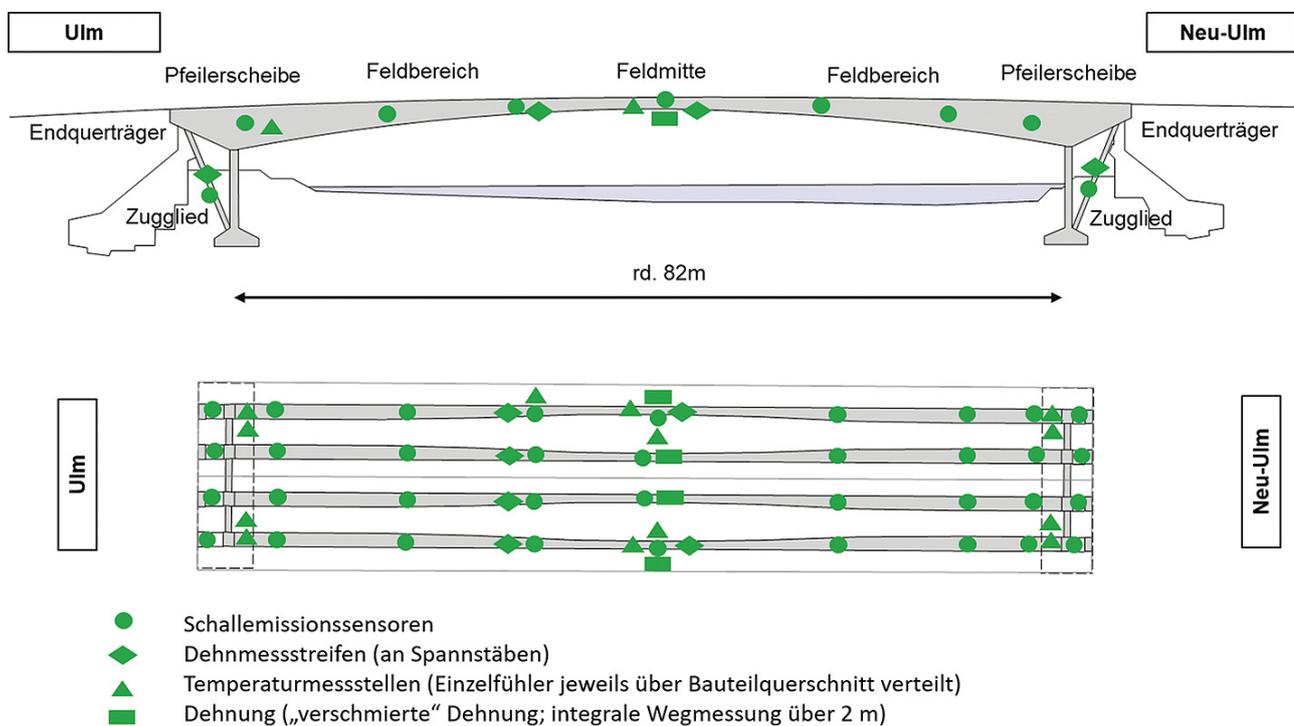


Bild 1: Übersicht der am Bauwerk installierten Sensoren, Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH; (Müller et al. 2020)



Bild 2: Montage der AE-Sensoren, Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH, (Sodeikat et al. 2019)

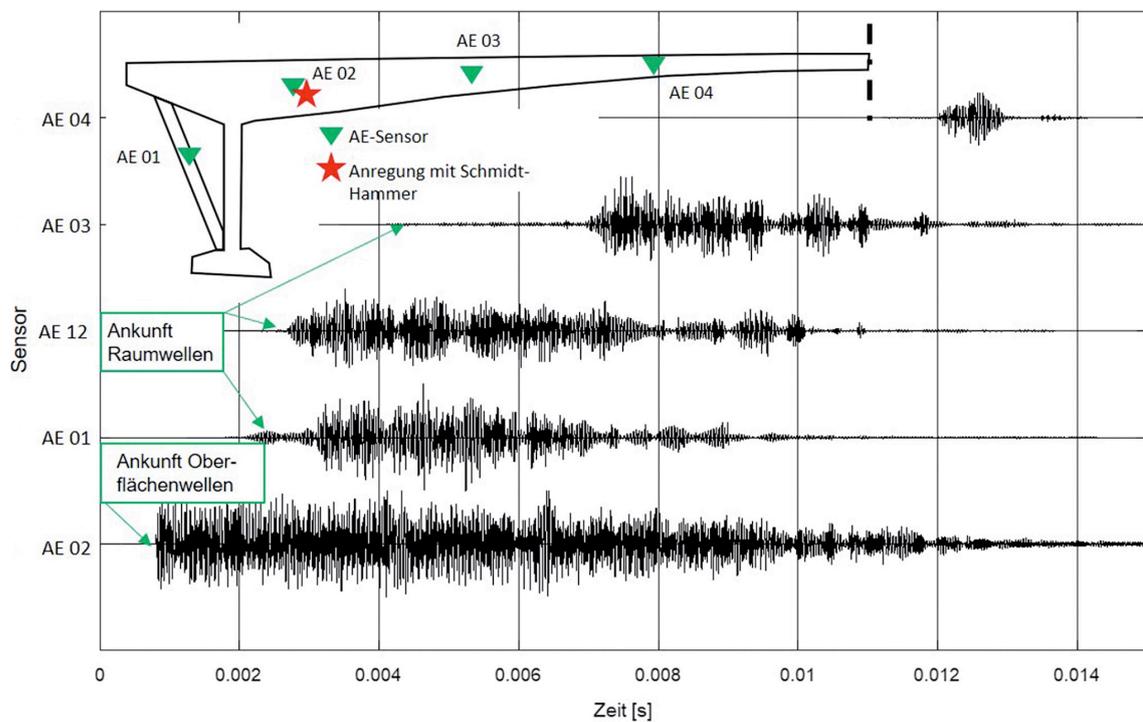


Bild 3: Aufgezeichnete Schallsignale von Schlägen durch den Rückprallhammer zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten und Dämpfung, Quelle: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH, (Sodeikat et al. 2019)

Stichwortverzeichnis

2+0 Verkehrsführung.....	142, 250	Integraler Dehnungsmesstreifen.....	111
4+0 Verkehrsführung... 67, 103, 104, 106, 256		Kamera.....	13, 124, 132, 195, 266
Achslast.....	16	Klimasensor.....	35, 43
Ankündigungsverhalten.....	73, 82, 148	Kompensation Defizite.....	78, 95, 187, 204
Anodenleiter.....	52, 58	Kontrolle Lastabtrag.....	120
Aufrechterhaltung des Verkehrs.....	67, 73, 80	Koppelfugenmonitoring.....	171, 188, 195, 196, 215, 235
Außenlufttemperaturfühler.....	30	Körperschallsensor.....	273, 279, 287, 297
automatisierte Objekterkennung.....	23	Korrosion.....	286
Bauartprüfung.....	59	Korrosionsmonitoring.....	54
Bauteiltemperatur.....	30, 31, 37, 43	Korrosionsschaden.....	161, 165
Beanspruchungskollektiv.....	268	Korrosionsschädigung.....	110, 113
Beitrag zur Bauwerksprüfung.....	37, 46, 222	Korrosionswiderstand.....	57, 60
Beschleunigungssensor.....	2, 155, 162	Krümmungsänderung.....	148
Betondehnung.....	178, 180	Laserdistanzmessung.....	84, 106
Betonstahldehnung.....	178, 180	Laserdistanzsensor.....	104
Biegeriss.....	148	Luftfeuchtesensor.....	234
Chloridbelastung.....	54	Magnetfeldsensor.....	21
Chloridgehalt.....	296	Materialversprödung.....	64
Dauerhaftigkeit.....	36, 37, 52, 53, 54, 58, 59	Messprisma.....	71, 78
Dehnungsmessstreifen.....	2, 140, 178, 241, 247, 254, 266, 297	modale Parameter.....	157
Dehnungssensor.....	13	Nachrechnung 1, 2, 13, 15, 21, 30, 66, 165, 171, 180, 204, 214, 227, 233, 268, 300	
Dekompression.....	172, 174	Neigungssensor.....	140, 145, 247
Depassivierung.....	53, 54	Notunterstützung.....	131, 194
Detektion Schaden.....	163	Nutzungsverlängerung.....	275
Detektion von Schäden.....	72	Nutzungsverlängerung.....	135, 189, 197, 237
Digitalnivelliere.....	95	objektbezogenes Verkehrslastmodell.....	2
Eigenfrequenz.....	165	objektspezifisches Ermüdungslastmodell....	13
Eigenfrequenzänderung.....	163	objektspezifisches Lastmodell.....	16
Eigenfrequenzvergleich.....	155	Pilotbauwerk.....	34, 51
Elektrodenpaar.....	37, 43, 45	Pilotprojekt.....	57
Erfassung der Einwirkungen.....	15	Probebelastung.....	300
Ermüdungsbeanspruchung.....	255, 267	Querschnittsschwächung.....	295
Ermüdungsdefizit.....	177, 272	Rechenmodell.....	67
Ermüdungsdefizite.....	12, 20, 154	Restnutzungsdauer.....	82, 182
Ermüdungslastmodell.....	255	Rissbildung.....	213
Ermüdungsnachweis.....	16, 22, 29, 158, 170, 180, 208, 268	Rissentwicklung.....	170, 197, 206
Ermüdungsriss.....	253	Rissneubildung.....	275
Ermüdungsschaden.....	256	Rissüberwachung.....	274
Fahrzeugkategorie.....	16	Rissweitenänderung.....	225
Fahrzeugüberfahrt.....	21, 22, 23	Schadensfall.....	118, 123, 185, 240
Feuchtemonitoring.....	37, 45	Schadensfortschritt.....	280
Fiber Bragg Gitter.....	178	Schadensüberwachung.....	220, 227
funktionale Leistungsbeschreibung.....	106	Schädigungsbild.....	203
Funktionsüberwachung		Schädigungsfortschritt.....	146
Instandsetzungsmaßnahme.....	162	Schädlingsbefall.....	37, 45
Geschwindigkeit.....	16, 23	Schallemissionsanalyse.....	288
Grundmoment.....	31	Schallereigniss.....	301
Holzbauweise.....	42	Schallmessung.....	275
Holzfeuchte.....	35, 36, 44	Schallsignal.....	289
Holzfeuchteelektrode.....	35, 43	Schlauchwaage.....	65
horizontale Verschiebung.....	119, 126	Schlauchwaage.....	95
Inklinometer.....	95	Schrägrisse.....	220
integrale Dehnungsmessung.....	204	Schweißnahtfehler.....	253

Schwerlasttransport.....	301	Temperaturbeanspruchung.....	32
Schwertransport.....	165	Temperatursensor 2, 35, 65, 71, 78, 84, 95, 104, 118, 124, 132, 140, 162, 171, 195, 204, 214, 220, 226, 234, 247, 254, 273, 297	
Schwingbreite	267	Terrassenbruchgefahr.....	64, 139, 142, 246
Schwingspiel.....	172	Tragfähigkeitsdefizit ...	161, 165, 173, 181, 219
Segmentbauweise	51, 54	Tragfähigkeitsdefizite	64, 82, 131
Sicherheitselement	300	Undichtigkeit.....	37
Sicherheitsstandard.....	98	Verbundwirkung	265
Sicherstellung der Restnutzungsdauer	247	Verformungsänderung	66, 106
Sicherstellung verkehrlicher Nutzung.....	86	Verformungsmessung.....	72, 79, 105
Sonderprüfung	148	Verformungszuwachs	65, 67
Spanndrahtbruch	279, 281	Verkehrsbeanspruchung.....	2
Spannstabbruch	287, 297	Verkehrssicherheit	87, 142
Spannstahlausfall	112	Verkehrszusammensetzung	16
Spannstahlbruch.....	288	Verpressfehler.....	203, 286, 295
Spannstahldehnung.....	242	Verprägung.....	278
Spannungskorrosion.....	144	Verstärkung117, 120, 123, 127, 131, 185, 194, 240	
Spannungsrissskorrosion70, 71, 77, 82, 96, 131, 146, 278		Verstärkungsmaßnahme.....	233
Spannungsschwingbreite	181	vertikale Verschiebung.....	134
Spannungsschwingspiel.....	174	Wegaufnehmer30, 124, 132, 171, 187, 195, 204, 214, 220, 226, 234	
Spannungsüberschreitung	181	Wetterstation	13, 65
Sprödbruch	278	Widerstandsthermometer.....	30
Sprödbruchgefahr.....	272	Wildbrücke.....	34
Steifigkeitsänderung	66	Wirksamkeitskontrolle Verstärkung	229
Steifigkeitskalibrierung.....	158	Wirksamkeitsuntersuchung Notunterstützung	187
Tachymeter.....	67, 71, 78	Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	173
Temperatur	187		
PT100.....	145		
PT1000.....	52		
Widerstandsthermometer	71, 78		