

Monitoring von Brückenbauwerken als Werkzeug der Bauüberwachung

Die messtechnische Dauerüberwachung von Bauwerken (Monitoring) wird in immer stärkerem Maße zur Beobachtung und Bewertung bestehender oder neu errichteter Ingenieurbauwerke angewendet. Die gewonnenen Messwerte werden zum Beispiel zur Überprüfung der Rechenannahmen oder für die Beurteilung des Langzeitverhaltens genutzt. Ein anderes Anwendungsfeld stellt dagegen die sicherheitsrelevante Überwachung kritischer Bauzustände mithilfe eines Monitoringsystems dar, welches mit automatisierten Warn- und Alarmmeldungen ausgestattet ist. Ein solches System wurde beim Neubau der Tiefgründungen und Dämme der Eisenbahnbrücken über die Aller und die Wätern eingesetzt, um rechtzeitig kritische Veränderungen der unter Eisenbahnverkehr stehenden Brückenbauwerke detektieren zu können. Das Monitoringssystem war als Kompensationsmaßnahme für das bauzeitlich reduzierte Sicherheitsniveau der stark geschädigten Bestandsbrücken vorgesehen. Im Zusammenspiel zwischen dem Anlagenverantwortlichen, der Bauüberwachung und dem Bauwerksgutachter hat sich das Monitoring als leistungsfähiges Werkzeug zur Gewährleistung eines sicheren Eisenbahnbetriebs erwiesen.

Keywords Bauüberwachung; Sicherheitsüberwachung; Rissmonitoring; Schlauchwaage

Monitoring of bridge structures as a tool of construction supervision

Structural health monitoring is applied increasingly to supervise and evaluate existing or new structures. The measured values are used for example to verify the computational assumptions, or for assessing the long-term behavior. In contrast, a different field of application is the safety monitoring of critical construction phases using a monitoring system, which is equipped with automated warning and alarm messages. Such a system was used during the construction of deep foundations and embankments of railway bridges over the river Aller and the creek Wätern. The aim of the system was to timely detect critical changes under railway and construction loads. The monitoring system was planned as a compensatory measure for the reduced level of safety during the replacement of the damaged bridges. Within the interaction between bridge owner, construction supervisor and monitoring expert, the monitoring has proven to be a powerful tool to ensure a safe railway operation even under structural works.

Keywords structural health monitoring; bitte ergänzen

1 Einführung

Bei der Erneuerung oder Sanierung von Brückenbauwerken im Zuge bestehender Straßen oder Eisenbahnstrecken ist es in der Regel notwendig, das alte Bauwerk auch während der Baumaßnahme weiter zu nutzen. Durch die Baumaßnahmen unterliegt der Bestand sehr starken zusätzlichen Einwirkungen, die das ohnehin marode Bauwerk über die planmäßigen Einwirkungen hinaus beanspruchen. Häufig müssen die Baugruben für neue Fundierungen unmittelbar neben den bestehenden Gründungen hergestellt werden, sodass besonders bei Ramm- oder Bohrarbeiten eine Beeinträchtigung dieser mit unzulässigen Erschütterungen und Setzungen oder gar Zerstörungen möglich ist. Auch bei Teilerneuerungen ist in vielen Fällen ein Eingriff in die Tragstruktur notwendig, während auf der Nachbarspur bzw. dem Nachbargleis der Betrieb aufrechterhalten wird.

Selbst bei sorgfältiger Planung der beschriebenen Maßnahmen ist es deshalb nahezu unvermeidbar, dass während der Baudurchführung das vorhandene Sicherheitsniveau des Bestands noch weiter abgesenkt wird. Deshalb muss

im Zuge der Baumaßnahmen die Standsicherheit des Bestands überwacht werden. Bisher beschränkt sich diese Überwachung in den meisten Fällen auf eine regelmäßige visuelle Begutachtung und auf die manuelle Überprüfung vorhandener Schäden am Tragwerk, ggf. unter Nutzung einfacher technischer Hilfsmittel wie z. B. Rissmonitore, Rissmarken oder geodätischer Messmarken. Ob diese Maßnahmen tatsächlich eine hinreichende Kompensation für das verringerte Sicherheitsniveau während der Baumaßnahmen darstellen, ist in einigen Fällen zumindest zweifelhaft. Das ist besonders dann der Fall, wenn bereits geringe Verformungen oder Setzungen zu einem Versagen ohne sichtbare Vorankündigung führen können. Beispiele dafür sind bestehende Gewölbebrücken mit starken Verwitterungsschäden oder Rissen, aber auch Tragwerke, deren ursprüngliche Duktilität durch Korrosionsprozesse eingeschränkt ist (z. B. starke Querschnittsreduktion bei stählernen Tragwerken oder Verankerungsschäden durch teilweise freiliegende Bewehrung bei Stahlbetonkonstruktionen). Auch Tragwerke mit Ermüdungsproblemen gehören zu dieser Kategorie. Die manuelle „Überwachung“ der Standsicherheit ist dann völlig unzureichend und gewährleistet keinesfalls einen sicheren Weiterbetrieb des beste-

henden Bauwerks. Bei Bestandsbrücken mit voraussichtlich duktilem Tragverhalten ist eine manuelle Überwachung grundsätzlich möglich und sicher, sofern sie in ausreichendem Maße durchgeführt wird. Hier stellt sich dennoch die Frage, ob wirtschaftlichere und technisch bessere Alternativen existieren.

Diese Alternative ist heute mit automatisierten Dauerüberwachungssystemen gegeben, welche die Informationen über Veränderungen des Bauzustands und das Erreichen kritischer Zustände zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt liefern, als das mit manuellen Überwachungsstrategien möglich ist. Die Monitoringsysteme können dazu mit unterschiedlichsten Sensoren ausgestattet sein, sodass eine Vielzahl von Überwachungsaufgaben angepasst an die jeweilige Problemstellung realisiert werden kann.

Noch stellt die Nutzung eines solchen Monitorings im Zuge von Baumaßnahmen eher die Ausnahme dar, aber das war auch in anderen Technikbereichen analog. Am 11. Januar 1955 entgleisten infolge eines Heißläufers und Achsschenkelbruchs 17 Wagen eines Kesselwagenzuges auf der Allerbrücke bei Verden. Der aus der Gegenrichtung kommende Personenzug fuhr in die Trümmer (Bild 1). Das Zugunglück forderte zwei Tote und 14 Verletzte. Zum damaligen Zeitpunkt musste dieses Unglück als unvermeidbare höhere Gewalt hingenommen werden, da es keine Möglichkeit gab, einen solchen defekten Zug rechtzeitig zu stoppen. Heute ist es dagegen Stand der Technik, mit speziellen Monitoringsystemen, sogenannten Heißläuferortungsanlagen, eine ausreichende Reaktionszeit zu gewinnen und so den Unfall zu vermeiden.

2 Generelle Anforderungen an eine sicherheitsrelevante bauzeitliche Zustandsüberwachung

Für die Planung einer messwertgestützten Sicherheitsüberwachung ist zunächst die Inspektion des Bauwerks einschließlich einer gründlichen Bauzustandsanalyse durch einen erfahrenen Bauwerksprüfer durchzuführen. In Auswertung dieser Analyse und unter Berücksichtigung der durchzuführenden Arbeiten während der Bauphase müssen die möglichen Gefährdungssituationen und Versagenspotenziale erfasst werden. Auf dieser Grundlage können die relevanten Messgrößen (z. B. Setzungen, Rissbreitenänderungen, Verschiebungen, Dehnungen, etc.) identifiziert werden, welche im Rahmen des Monitorings überwacht werden sollen. Hierbei sind anhand einer Abschätzung der voraussichtlichen Grenzwerte auch die erforderlichen Messbereiche und Messwertaufösungen sowie die Abtastrate für jeden Sensor festzulegen.

Grundsätzlich sind möglichst wenige, einfache, aber dafür robuste Sensoren zu verwenden. Auch die Auswertungsmethodik soll möglichst einfach sein, also ohne aufwändige Datenverarbeitungsmechanismen und Transformationen bestenfalls direkt den Sensormesswert verwenden. Bewährt hat sich, für jeden Sensor je zwei obere und untere Grenzwerte festzulegen, wobei jeweils der erste



Bild 1 Zugunglück auf der Allerbrücke 1955
Train accident on bridge over Aller in 1955

Wert als Warnwert, und erst der zweite als Alarmwert zu interpretieren ist.

Das Messsystem muss nahezu vollständig ausfallsicher sein. Diese Anforderung besteht sowohl für die einzelnen Sensoren als auch für die gesamte Mess- und Informationskette. Entsprechend sind die einzelnen Komponenten so auszulegen, dass eine hohe Redundanz des Gesamtsystems erreicht wird. In besonders kritischen Fällen sind vollständig parallel und unabhängig voneinander arbeitende Systeme für die Erfassung eines spezifischen Zustands vorzusehen. Auch für den Ausfall der Stromversorgung oder für Unterbrechungen in der Signalübertragung müssen Vorkehrungen getroffen werden (z. B. Notstromversorgung, separate Sensoralarme bei Systemausfällen).

Ganz entscheidende Bedeutung für die Funktionsfähigkeit und Sicherheit, aber auch für die Akzeptanz eines solchen Monitoringsystems, besitzt die Schnittstelle zwischen Mensch und Technik. Ein noch so ausgefeiltes technisches System ist wertlos, wenn nicht von Beginn der Maßnahmen an geklärt ist, wer im Falle von Grenzwertüberschreitungen vom System informiert werden soll und welche konkreten Maßnahmen in welchem Zeitraum in der jeweiligen Situation einzuleiten sind. Diese können sowohl Inspektionen am betreffenden Messpunkt als auch betriebliche Maßnahmen von der Unterbrechung der Baumaßnahmen bis hin zur Streckensperrung beinhalten. Dabei muss auch bedacht werden, dass Fehlalarme auftreten können und wie mit diesen umzugehen ist.

3 Monitoringkonzept für die Erneuerung der EÜ Aller und EÜ Wätern

3.1 Zustand der bestehenden Brückenbauwerke

Die Eisenbahnüberführungen (EÜ) über die Aller und die Wätern liegen auf einer sehr stark befahrenen wichtigen Fernverkehrs- und Güterabfuhrstrecke, der Strecke 1740 Wunstorf – Bremerhaven, und sind als Gewölbebrücken seit dem Jahr 1862 in Betrieb. Die massiven gemauerten

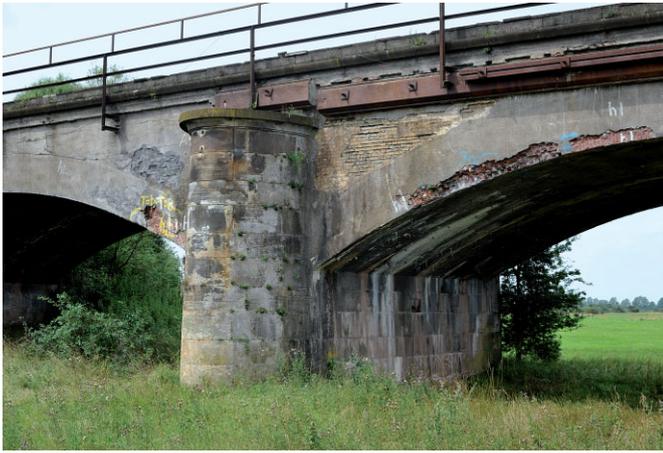


Bild 2 EÜ Aller mit typischen Schadensbildern
Aller Bridge with typical damages

Pfeiler und Widerlager der beiden Brücken wurden bereits 1847 errichtet und bildeten die Unterbauten für eingleisige, als doppeltes Sprengwerk ausgeführte Holzbrücken. Die Brücken wurden im Zuge des zweigleisigen Streckenausbaus von 1860 bis 1862 mit Ziegelmauerwerk unter Verwendung der Unterbauten von 1847 überwölbt. Die EÜ Aller ist 376 m lang, der Achsabstand der gemauerten Pfeiler beträgt ca. 16 m. Der mittlere Teil des Bauwerks wurde 1945 im Bereich der Stromöffnungen zerstört und 1950/51 durch zwei eingleisige Stahlüberbauten ersetzt. Die EÜ Wätern ist eine 98 m lange, sechsfeldrige Gewölbebrücke (Stützweite 16,36 m) und liegt etwa 800 m südlich der EÜ Aller. [1]

An den Haupttragelementen beider Brücken sind erhebliche Schäden an Pfeilern, Bögen und Stirnwänden vorhanden, die primär alterungsbedingt sind und durch eine starke Durchfeuchtung des Mauerwerks verursacht wurden (Bild 2); [2]. Sicherheitsrelevant sind dabei vor allem die folgenden Schadensbilder:

- Fehlstellen und teilweise starke Rückwitterung mit Querschnittsschwächungen von bis zu 15 cm Tiefe
- Bindemittelablagerungen (Sinterfahnen) und Krustenbildung, die auf eine fortschreitende Entfestigung des Grundmaterials schließen lassen
- Sehr starke Durchfeuchtung, die zu Frostschäden (Rückwitterung und Entfestigung) führt
- Ausgeprägte Risse in den Gewölben und im Spritzmörtel
- Ablösungen und Hohllagen des Spritzmörtels (Fehlstellen)

Zur Aufrechterhaltung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Untersuchungen und Ertüchtigungsmaßnahmen durchgeführt.

Für den erforderlichen Ersatzneubau wurde die neue Bahntrasse um 13,80 m nach Osten verschoben (Bild 3). Die neuen Pfahlkopfplatten wurden in umspundeten und

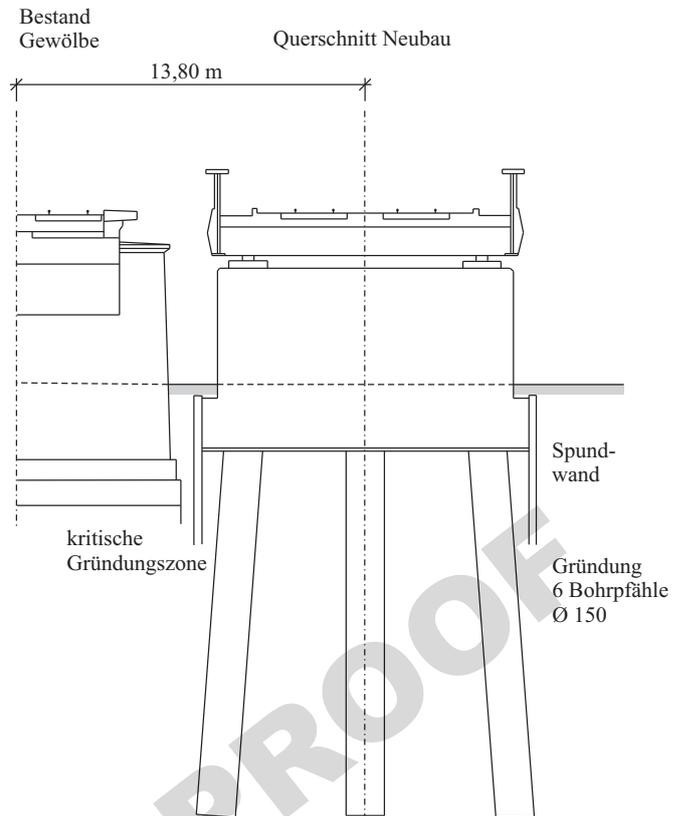


Bild 3 Querschnitt durch den Bestand und den Neubau
Cross section of existing and new structure

ausgesteiften Baugruben teilweise direkt neben bestehenden Gründungen hergestellt. Für die Rammarbeiten der Spundwände und die Bohrarbeiten der 150er-Bohrpfähle wurde mit standsicherheitsrelevanten Auswirkungen auf die flach gegründeten Bestandsfundamente gerechnet.

Wegen der Unsicherheit der Geometrie der Bestandsgründungen und des Einflusses der Tiefbauarbeiten auf die Gesamtstandsicherheit sowie aufgrund des stark fortgeschrittenen Degradationsprozesses waren zur Gewährleistung eines sicheren Eisenbahnbetriebs besondere Maßnahmen erforderlich.

Alle durchgeführten Stabilisierungsmaßnahmen und Begutachtungen ließen den Schluss zu, dass die Standsicherheit der Bauwerke noch gegeben ist, dass jedoch Veränderungen des bestehenden Zustands, insbesondere das Auftreten größerer Setzungen oder das Einleiten unzulässiger Erschütterungen, zur Beeinträchtigung der Standsicherheit führen können. Es wurde davon ausgegangen, dass Verringerungen der Standsicherheit mit Verformungen der bestehenden Gewölbe oder mit dem Verbreitern bereits bestehender Risse bzw. der Neubildung von Rissen verbunden sind.

3.2 Monitoringkonzept

Für die Überwachung der Standsicherheit während der Tiefbauarbeiten wurde ein Maßnahmenkonzept erarbeitet. Dieses enthält sowohl turnusmäßige gesamthafte

Überprüfungen des baulichen Zustands als auch kontinuierliche Überwachungen besonders gefährdeter Bereiche durch eine elektronische Dauerüberwachung während der Baumaßnahmen bis zum Abschluss der Tiefbauarbeiten. Es wird ergänzt durch Erschütterungsmessungen in besonders kritischen Bauzuständen.

Erschütterungsmessungen, Maßnahme (E)

Während des Einbringens der Verbauten im Bereich der bestehenden Pfeilergründungen sind Erschütterungsmessungen am Bestand durchgeführt worden. Es sollte gewährleistet werden, dass die Rammarbeiten abgebrochen werden bzw. die Einbringtechnologie verändert wird, sobald unzulässige Erschütterungen am Bestandsbauwerk auftreten. Insbesondere sollte durch die Messungen auch erkannt werden, wenn die Spundbohle die Bestandsgründung trifft. Die Messungen wurden baubegleitend als mobile Messungen durchgeführt. Dazu wurden an den betroffenen Pfeilern triaxiale Schwinggeschwindigkeitssensoren jeweils oben auf dem Gesims und unten in Höhe der Geländeoberkante montiert (Bild 4).

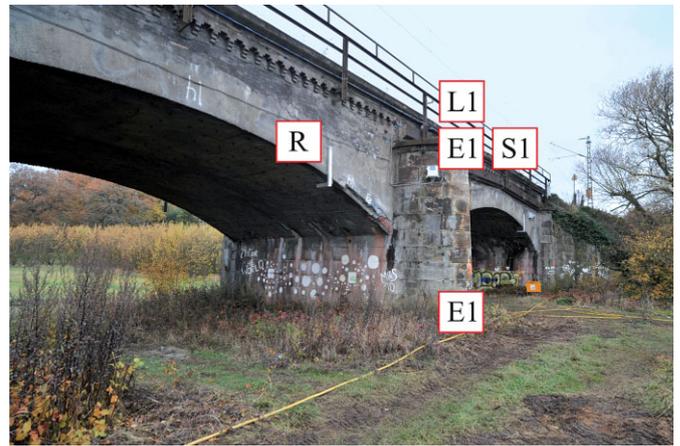


Bild 4 Schlauchwaage (S1), Rissmonitoring (R) mit Laserdistanzsensor und Reflektor, Überwachung der Stirnwände (L1) und Erschütterungsmessungen (E)
 High-precise tube level (S1), crack monitoring (R) with laser distance sensors and reflectors, supervision of spandrel wall (L1) and vibration measurement (E)

Schlauchwaagenmessungen an den Brückenbauwerken, Maßnahme (S1)

An den unmittelbar durch die Gründungsarbeiten beeinflussten Pfeilern der Gewölbebrücken wurden an den Pfeilerköpfen Schlauchwaagenmessstellen installiert (Bild 4). Die Messung der vertikalen Relativverschiebungen zwischen den Messstellen ermöglicht die Detektion von Setzungsunterschieden zwischen den Pfeilern infolge der Tiefbauarbeiten an den neuen Gründungskörpern. Als Referenzpunkte wurden bei der EÜ Aller die sehr steifen, nicht setzungsgefährdeten Gruppenpfeiler gewählt.

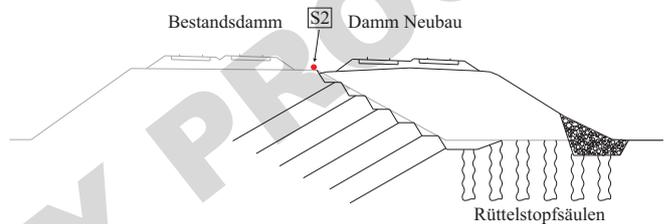


Bild 5 Überwachung der Dammverbreiterung
 Supervision of embankment extension

Rissüberwachung der Gewölbe, Maßnahme (R)

Einige der Bögen weisen durchgehende Stirnringrisse auf, welche vermutlich aus der unzureichenden Lastverteilung der Gleislasten, aber auch aus dem schlechten Zustand des Mauerwerks resultieren. Durch die erwarteten Erschütterungen können sich die bestehenden Risse weiter öffnen bzw. neue Risse entstehen. Deshalb sollten die gefährdeten Rissbereiche während der Baudurchführung überwacht werden. Dazu wurden unterhalb der Gewölbe beidseitig von Maßnahme S1 mit einem Laserdistanzsensor auf der einen und einem Reflektor auf der anderen Seite die Horizontalverschiebungen erfasst und damit eine globale Rissbreitenüberwachung der betroffenen Gewölbebereiche realisiert (Bild 4).

Überwachung der Stirnwände, Maßnahme (L1)

Oberhalb der Schlauchwaagemessstellen an den Brückenpfeilern wurden Laserdistanzmessungen auf Höhe

der Holme der Geländer durchgeführt, um Verschiebungen der Stirnwände und damit ggf. kritische Verformungszustände des Brückentragwerks zu detektieren (Bild 4). Zur Vermeidung von Fehlmessungen sollte die Messung während der Zugüberfahrten unterbrochen werden.

Setzungsmessungen im Dammbereich, Maßnahme (S2)

Der Damm zwischen den bestehenden Brücken und im Anschwenkbereich Süd ist in einem schlechten Zustand. Da größere Setzungen durch die Baumaßnahmen nicht ausgeschlossen werden konnten, sollten diese Dammbereiche ebenfalls durch Schlauchwaagemesspunkte überwacht werden. Dazu waren auf der Dammschulter zur Baustellenseite im Abstand von ca. 15 m Messpunkte vorgesehen und hinsichtlich auftretender Differenzsetzungen zu beobachten (Bild 5).

4 Installation und Messdurchführung

4.1 Messtechnische Umsetzung des Monitoringprojektes

Um die Überwachungsaufgaben sicher und wirtschaftlich realisieren zu können, wurden das Monitoringsystem und seine Einzelkomponenten im Vorfeld detailliert projek-

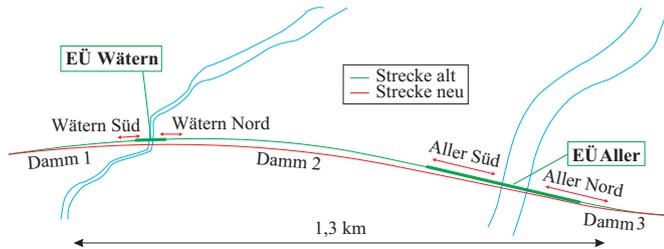


Bild 6 Aufteilung der Überwachungsbereiche in Damm, EÜ Wätern und EÜ Aller
Distribution of monitoring areas of embankments and bridges

tiert. Das Projekt wurde dazu in mehrere Abschnitte aufgeteilt, um Subsysteme mit beherrschbarer Anlagengröße zu schaffen. Außerdem mussten die hydrostatischen Präzisionsmesssysteme (S1) und (S2) auch aufgrund der Entwicklung des Höhenniveaus in mehrere Abschnitte unterteilt werden (Bild 6). Um die Kabelwege zu optimieren, wurde eine entsprechende Anzahl an Feldbusmodulen gewählt und auf die Gesamttrasse verteilt.

4.2 Sensorik

Die eingesetzten elektronischen Druckschlauchwaagen erfassen Höhenänderungen mittels Differenzdrucksensoren. Sie eignen sich besonders zur Setzungs- und Bewegungsüberwachung von Objekten, wobei jedoch nur statische Messungen möglich sind. Die eingesetzten Sensoren hatten eine Genauigkeit von max. $\pm 0,09\%$ bei einem Messbereich von 0 bis 500 mm hydrostatischer Höhe.

Die für die Maßnahmen (R) und (L1) verwendeten Laserdistanzmesser eignen sich zur berührungslosen messtechnischen Überwachung über größere Distanzen in einem Messbereich von 0,1 bis 100 m. Sie waren mit einem Heizungssystem ausgerüstet, um ein Einfrieren der Optik zu verhindern. Die Sensorgenauigkeit lag bei den geforderten ± 2 mm bei einer Auflösung von 0,1 mm und einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,5$ mm.

Um die Funktionsfähigkeit beider Sensorsysteme auch bei extremen Witterungseinflüssen zu gewährleisten, wurden die Sensoren vor der Installation in einem Klimaschrank kalibriert. Jeder hydrostatische Sensor wurde dazu in elf Schritten von 0 bis 49 mBar unterschiedlichen Drücken ausgesetzt und mit dem gemessenen Druck verglichen. Daraus wurde eine Ausgleichsfunktion für jeden Sensor errechnet (Bild 7). Bei Laserdistanzmessern wurde die geforderte Wiederholgenauigkeit von 0,5 mm mittels Sollstreckenvergleich für den relevanten Messbereich überprüft (Bild 8).

4.3 Montage

Aufgrund der ungünstigen Witterungssituation Ende Oktober 2012 bis Januar 2013 war die Installation der Gesamtanlage eine sehr anspruchsvolle Aufgabe für bis zu

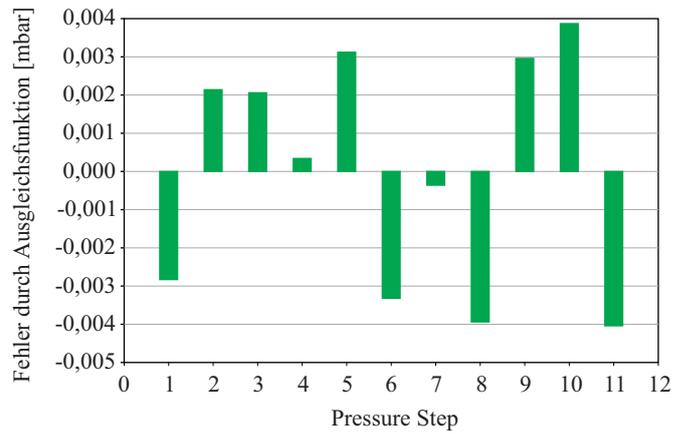


Bild 7 Beispiel einer Kalibrierung der Schlauchwaagesensoren
Example of a calibration tube level sensor

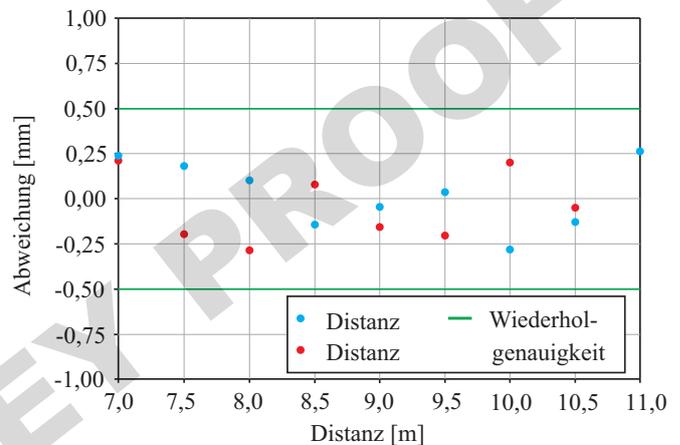


Bild 8 Beispiel eines Sollstreckenvergleichs der Laserdistanzsensoren
Example for the calibration of a laser distance sensor

vier Monteure, die insgesamt 49 Tage mit der Montage beschäftigt waren.

Die Unterseite der alten Bogenbrücke war vor einigen Jahren zur Stabilisierung mit Spritzbeton überzogen worden, welcher jedoch großflächige Hohlstellen aufwies. Um dennoch die Kraftschlüssigkeit mit dem Bauwerk herzustellen und die jeweiligen Querschnitte an der Unterseite mit einer Rissüberwachung ausstatten zu können, wurden die Sensoren im Bogenbereich mit einer Stahlabhängung direkt im Bestandsmauerwerk befestigt. Eine Stahlplatte diente auf der gegenüberliegenden Seite als Reflexionsfläche (Bild 9).

Oberhalb der Schienen wurden die Laserdistanzmesser an den Brückengeländern installiert, um die Stabilität der Stirnwände zu überwachen (Bild 10).

Das hydrostatische Präzisionsmesssystem wurde im Bereich der Brückenbauwerke am Gesimsband montiert. Die Sensoren wurden dabei mit Schutzkästen versehen (Bild 11) und die witterungsbeständigen Versorgungsschläuche mittels Seilspanntechnik am Bauwerk verlegt. Da ein durchgängiger Wasserhorizont aufgrund der Höhenunterschiede nicht gewährleistet werden konnte,



Bild 9 Rissüberwachung an der Bogenunterseite
Crack monitoring at the bottom side of the arch



Bild 12 Ausgleichsgefäß elektronische Schlauchwaage
Equalizing tank of electronic tube level



Bild 10 Laserdistanzmesser am Brückengeländer
Laser distance sensor at railing



Bild 13 Erdanker mit hydrostatischem Sensor und Seilzugsystem im Dammbereich
Ground anchor with hydrostatic sensor and cable system in the dam area



Bild 11 Präzisionsschlauchwaage während der Montage
High-precise tube level during installation

mussten mehrere Versprünge eingebaut werden. Der gleichmäßige Wasserpegel wurde durch Ausgleichsgefäße realisiert (Bild 12).

Auf den Erddämmen konnten die Sensoren mit kraftschlüssigen Reibungsprofilen fixiert werden (Bild 13). Diese Stahlprofile mit einer Länge von bis zu 1,5 m wurden mit einem Setzgerät in den Dammkörper eingetrieben. Die Verlegung der Messschläuche und Kabel erfolgte direkt auf dem Dammkörper.

4.4 Systemarchitektur

Die einzelnen Sensorabschnitte wurden mit einer Datenbusleitung und einer 230-V-Spannungsversorgung verbunden. Die Messsignale wurden über den Datenbus zum Systemrechner übertragen, der die Auswertung mithilfe der Steuerungssoftware übernahm. Der Systemrechner empfing, referenzierte und analysierte die Datenpakete, wobei die Steuerungssoftware automatisch Auffälligkeit

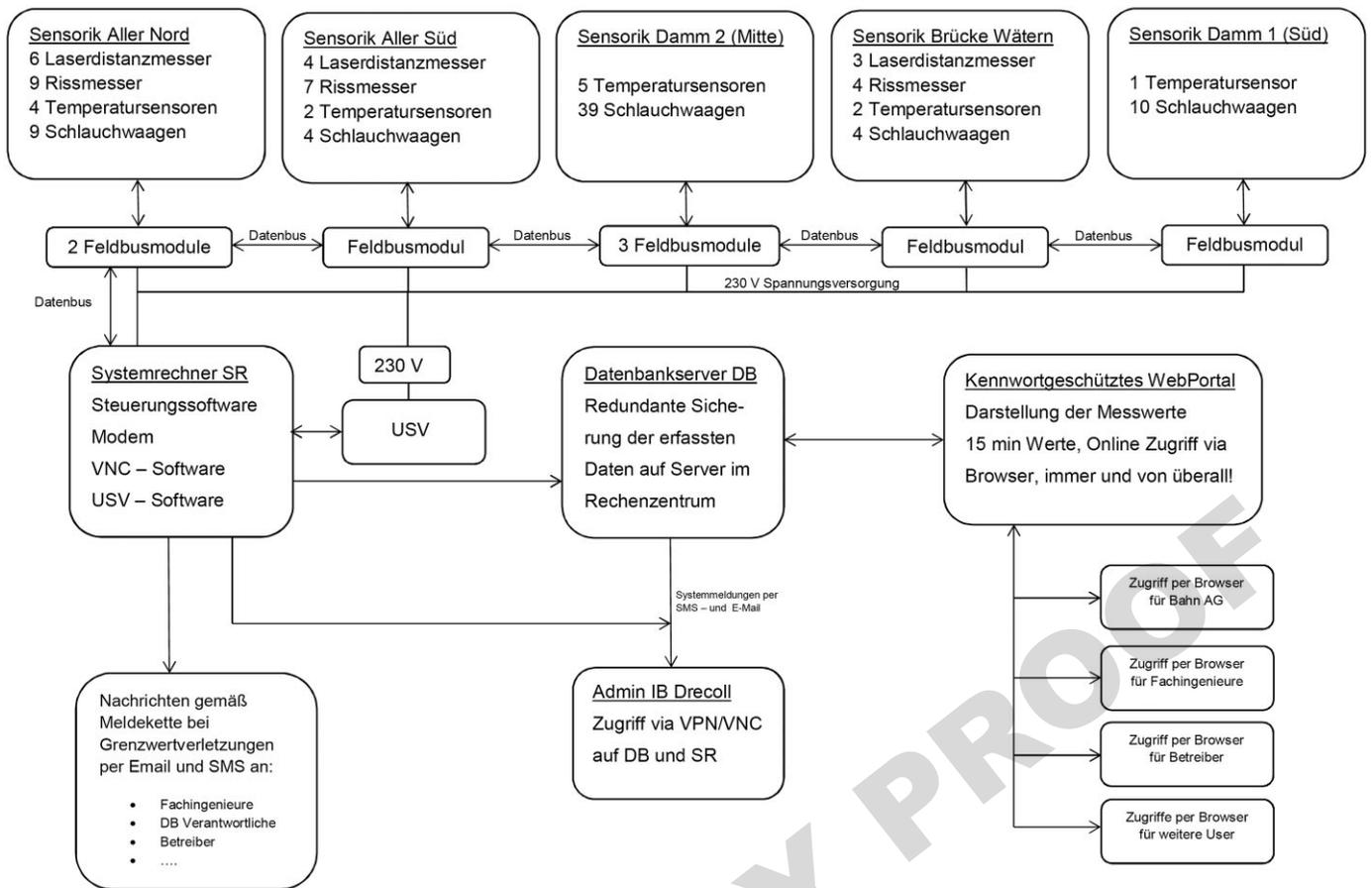


Bild 14 Schema der Systemarchitektur
Scheme of the system architecture

ten bei der Messwerterfassung detektierte. Bei einer Störung in der Kommunikation zwischen Software und Sensorik erfolgte ein automatisierter Neustart des Kommunikationsmoduls. Die Meldung über den Neustart des Systems wurde dabei per SMS und E-Mail an den vordefinierten Empfängerkreis versendet.

Per Modem wurden außerdem die Sensordaten vom Rechner an einen Datenbankserver geschickt und für das kennwortgeschützte Webportal zur Verfügung gestellt. Der Zugriff von außerhalb (z. B. zu Wartungszwecken, zur Einstellung und Anpassung der Systemparameter) auf das System erfolgte per VNC-Software (Bild 14).

Auch bei auftretenden Grenzwertverletzungen von Sensoren wurden unmittelbar von der Steuerungssoftware des Monitoringsystems Nachrichten gemäß der definierten Meldekette verschickt. Die Grenzwerte waren frei parametrierbar und mussten im Verlauf des Baufortschritts angepasst werden.

4.5 Internetportal

Insbesondere bei Grenzwertüberschreitungen, aber auch zur Bewertung des Langzeitverhaltens des Bestands während der Baumaßnahme, mussten die Zeitverläufe der einzelnen Sensoren jederzeit und von jedem Ort aus für

alle berechtigten Personen zugänglich sein. Die Messdaten auf dem Server wurden deshalb für alle im Vorfeld definierten Nutzer über ein Onlineportal bereitgestellt.

In der Grundrissstruktur der jeweiligen Überwachungsbereiche wurden die Messwerte der Sensoren entsprechend ihres Meldestatus (Range 1–5) farblich hinterlegt dargestellt (von grün = gut bis rot = Gefahr), was einen schnellen Gesamtüberblick über etwaige Gefährdungssituationen in Teilbereichen des Bestands ermöglichte (Bild 15). Außerdem war online eine zeitliche Grafikdarstellung der Messwerte jedes Sensors sowohl als Einzelgrafik als auch als 24-h-/7-d-/30-d-Darstellung möglich. Ebenso ließen sich die Minimal- und Maximalwerte auch als Gesamtübersicht tabellarisch darstellen, wobei der jeweilige Trend des Sensors zum Abrufzeitpunkt mit einem Pfeilsymbol veranschaulicht wurde. Durch die Onlineanbindung der Datenbank konnten die Werte auch über einen CSV-Download für weitergehende eigene Auswertungen z. B. in Excel oder Matlab eingelesen werden.

5 Erfahrungen aus dem Projekt

5.1 Probetrieb der Monitoringanlage

Der Probetrieb vor Beginn der Baumaßnahmen ist ein wichtiges Instrument zum Einarbeiten aller Beteilig-

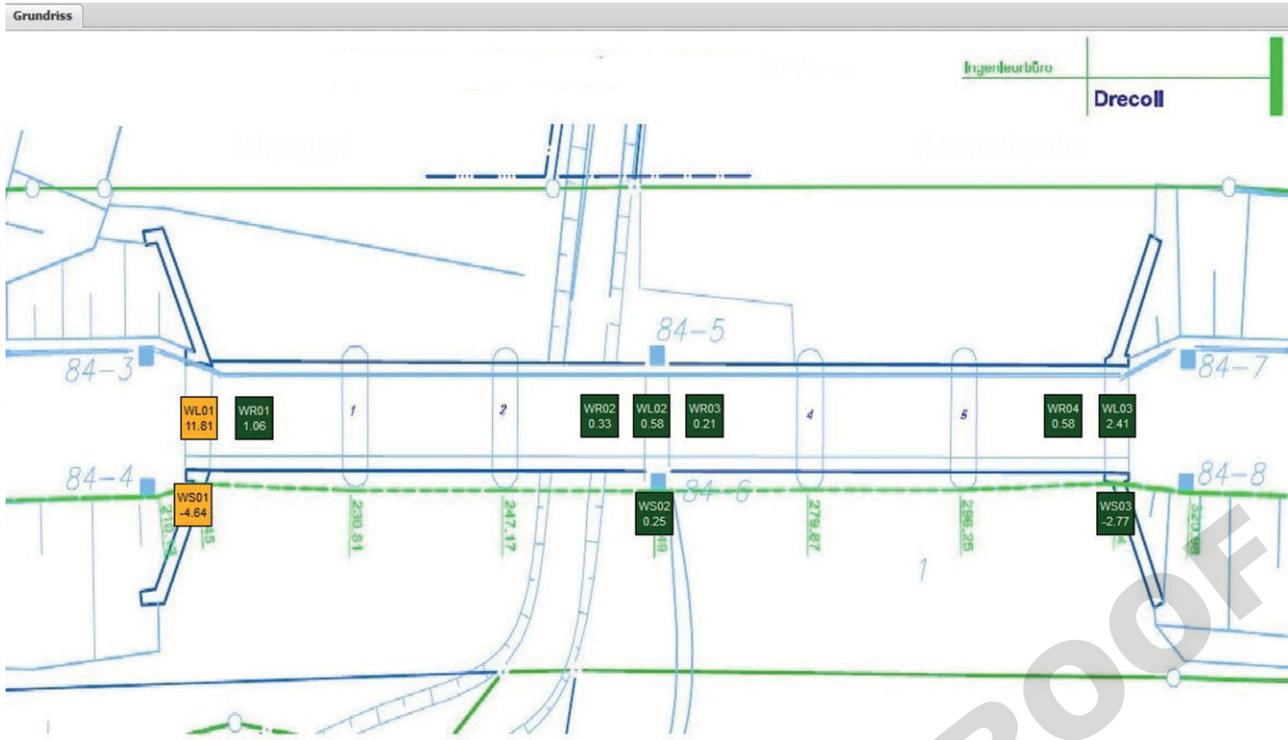


Bild 15 Ansicht Internetportal EÜ Wätern
Webview of Wätern bridge

ten in das System sowie zur Gewährleistung der Stabilität der Messanlage und sollte mindestens einen Monat betragen. Im Probetrieb soll das Verhalten der Anlage und des Bauwerks unter Temperaturveränderungen und Verkehr ohne Bautätigkeit ermittelt werden, sodass anschließend sinnvolle Warn- und Alarmwerte festgelegt werden können. Aus den Erfahrungen des Projektes Allerbrücke hätte ein Probetrieb von zwei bis drei Monaten zu einer besseren Voreinstellung mit weniger Fehlalarmen geführt. Der Probetrieb dient außerdem der Eliminierung von fehlerhaften oder fehlerhaft installierten Messgebern, Fehlern in der Bedienung oder Kalibrierung sowie der Kompensation von Umwelteinflüssen.

5.2 Festlegung Grenzwerte

Die Festlegung der Grenzwerte sollte nach Auswertung des Verhaltens des Bauwerks während des Probetriebs der Monitoringanlage erfolgen. Beim Vorhaben EÜ Aller wurde ein dreistufiges Konzept für die Grenzwerte umgesetzt. Nach einem ersten Informationswert wurde ein Warnwert und als dritte Stufe ein Alarmwert für jeden Sensor definiert:

Informationswert: Der Informationswert signalisiert eine unerwartete Bewegung. Eine Mitteilung erfolgte an die Bauüberwachung (BÜW), den Monitoring-Gutachter des AG und den Fachbeauftragten für die Brücken (FBB). Es wurde innerhalb von 24 Stunden eine örtliche Überprüfung der Sensoren und des detektierten Bauwerksbe-

reichs mit der Festlegung von möglichen Gegensteuerungsmaßnahmen durchgeführt.

Warnwert: Warnwerte wurden ausgegeben für Bewegungen, die noch unterhalb kritischer Verformungen liegen. Die Mitteilung erfolgte zusätzlich an den Anlagenverantwortlichen (ALV). Maßnahmen zur Gegensteuerung sollten dann innerhalb von zwölf Stunden umgesetzt oder andere geeigneten Maßnahmen, wie z. B. die Umstellung bzw. Anpassung des Bauverfahrens, ausgeführt werden.

Alarmwert: Die Ausgabe von Alarmwerten war mit dem Erreichen eines kritischen Verformungszustands verbunden, der eine sofortige Reaktion erforderte. Die Information dazu erfolgte an den gleichen Verteiler wie beim Warnwert. Damit verbunden waren die Einstellung des Baubetriebs und die Umsetzung baubetrieblicher Maßnahmen zur Abwehr von gefährlichen Eingriffen in den Bahnbetrieb.

Beispielhaft werden nachfolgend die Startwerte der Schlauchwaagemessung, Maßnahme S1 angegeben:

- Stufe 1: Infowert = 4 mm
- Stufe 2: Prüfwert = 7 mm
- Stufe 3: Alarmwert = 10 mm

Setzungsmessungen im Dammbereich

Da die Sensoren nur Dammsetzungen signalisieren, lassen sich nur indirekt Auswirkungen auf die Gleislage er-

mitteln. Deshalb wurde festgelegt, dass die Gleislage zusätzlich regelmäßig wöchentlich geodätisch zu messen ist. Die erschütterungsintensiven Arbeiten wurden nur auf der Ostseite des Damms ausgeführt. Aufgrund des locker gelagerten Damms wurden aber beide Gleise durch eine terrestrische Vermessung regelmäßig überwacht. Parallel zu den wöchentlichen Messungen wurden mithilfe der Monitoringanlage kontinuierlich die Setzungen im Bereich der Dammschulter zum Baustellenbereich aufgenommen.

Informationssystem

Die Erfassung und Speicherung der Messwerte erfolgte während des Betriebs der Monitoringanlage kontinuierlich. Wöchentlich wurde eine Auswertung der Messergebnisse mit Darstellung in tabellarischer und grafischer Form an den AG und den Monitoring-Gutachter geliefert. In den Datensätzen wurden alle Grenzwertüberschreitungen und Anpassungen an der Monitoringanlage protokolliert. Bei Annäherung der Messwerte an den Grenzwert wurden durch den Monitoring-Gutachter die Grenzwerte angepasst, sofern dies nach Bewertung des Verformungsverhaltens und Beurteilung des Bauwerkszustands gerechtfertigt war. Diese kontinuierliche Anpassung ist sehr wichtig, da sich durch Temperaturänderungen im Verlauf des Jahres das Verformungsverhalten des Bauwerks stark ändern kann. Andernfalls werden allein durch Temperaturänderungen die Verformungsgrenzwerte erreicht und das System fällt in einen Daueralarmzustand, bei dem permanent Alarmmeldungen per SMS und E-Mail versendet werden. Die Aufgabe war es hier, kontinuierlich das System in einem ausgeglichenen Zustand zu halten, sodass nur tatsächliche plötzliche Änderungen der Verformungen durch die Bauarbeiten zu einer Meldung entsprechend der oben angegebenen Kette führen.

Als sehr hilfreiches Werkzeug wurde von allen Beteiligten intensiv die Webvisualisierung der Verformungs-Zeitver-

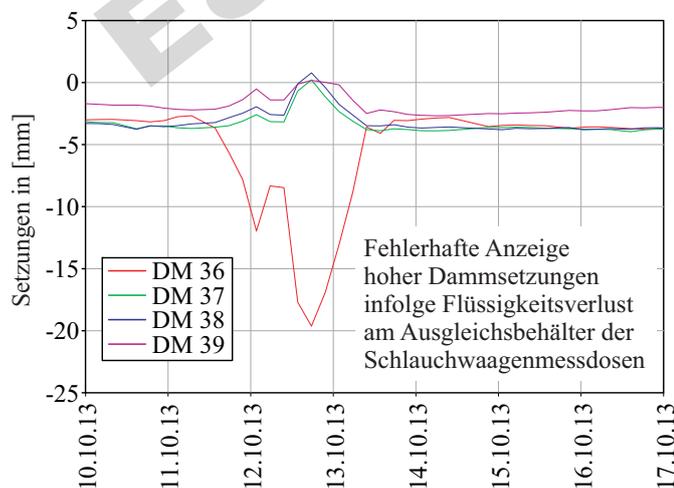


Bild 16 Beispiele für Fehlalarme des Systems
Examples of false alarms of the system

läufe genutzt. Bei Alarmmeldungen konnten darüber schnell der aktuelle Zustand und der Zeitverlauf jedes einzelnen Sensors überprüft werden. Bei kritischem, steilem Anstieg der Verformungen wurde von der Bauüberwachung vor Ort überprüft, ob Arbeiten im Bereich der betroffenen Pfeilerachsen ausgeführt wurden und ob sich gegebenenfalls ein kritischer Bauwerkszustand eingestellt hat. Auch Fehlalarme des Systems (Bild 16) konnten über den Onlinezugang schnell aufgeklärt werden.

5.3 Auswertung verschiedener Bauphasen

Gründungsarbeiten

Die Gründungsarbeiten an den Bauwerken begannen mit dem Rammen des Gleislängsverbaus hinter den Widerlagern. Vor allem bei der EÜ Wätern entstanden dabei sofort die ersten Setzungen im Bereich von 5 mm. Da die Setzungen nicht weiter zunahm, konnten nach visueller Überprüfung des Bestands durch die Bauüberwachung die Rammarbeiten wie geplant fortgesetzt werden.

Für den Neubau der Widerlager war es notwendig, die vorhandenen Schrägflügel vom Widerlager zu trennen und nach dem Rückbau der Flügel die Bestandsgründung der Flügel mit Bohrtechnik zu durchfahren (Bild 17). Im Zuge dieser Arbeiten und während der nachfolgenden Tiefgründungsarbeiten wurden nochmals Setzungen von 10 mm in die Unterbauten eingebracht. Durch das System wurden diese Setzungen erkannt und die Meldungen an die Beteiligten abgegeben. Anhand der Webvisualisierung konnten durch die Bauüberwachung der Setzungsverlauf und das Abklingen der Setzungen verfolgt werden (Bild 18). Damit war vor allem für die Bauüberwachung vor Ort jederzeit klar, ob sich das Bauwerk während der Arbeiten normal verhält oder ob es sich zu einem kritischen Zustand bewegt.

Als am effektivsten haben sich für die Überwachung der Bauwerke die Verformungsmessungen mit der Schlauch-

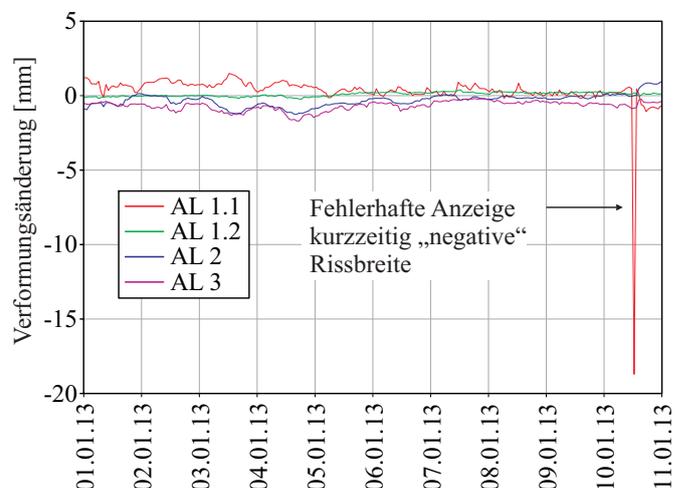




Bild 17 Bauzustand am Widerlager während der Gründungsarbeiten
Construction stage at the abutment during the foundation work



Bild 19 Vernagelung des Bestandsdammes durch Mikropfähle
Soil nailing of existing embankment by micropiles

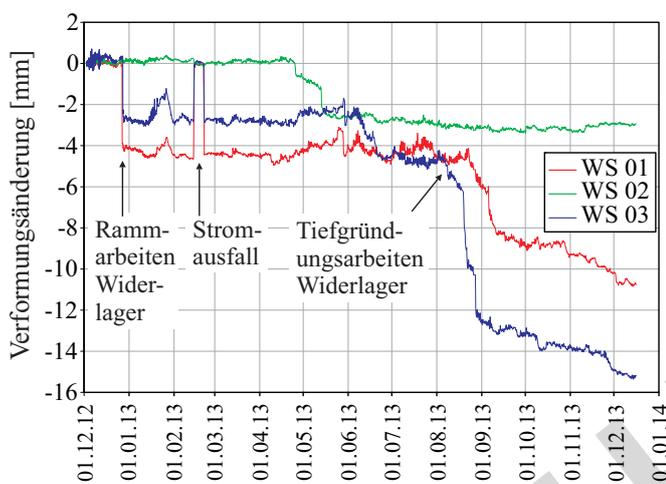


Bild 18 EÜ Wätern – Zeitverlauf der Setzungsmessungen
Time response of settlement measurements

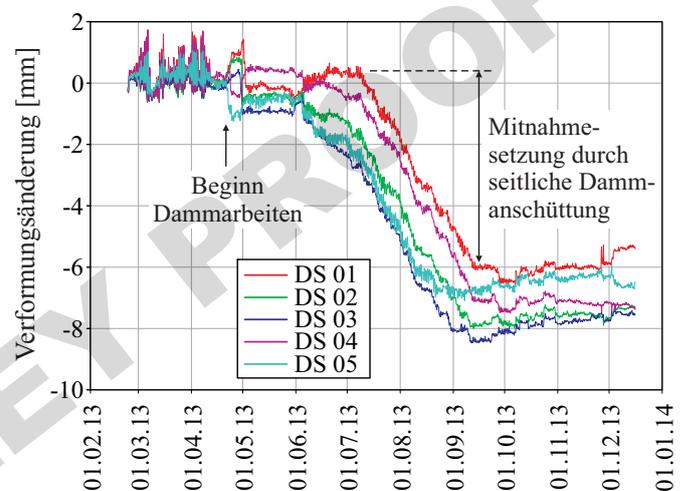


Bild 20 Mitnahmesetzung durch seitliche Dammanschüttung
Time-dependent settlements due to additional embankments

waage und die Rissüberwachung herausgestellt. Die Überwachung der Stirnwände über die Laserdistanzmessung im Gleisbereich war dagegen sehr fehleranfällig. Hier war es nicht möglich, die Zugfahrten herauszufiltern, sodass bei einem Zughalt auf dem Bauwerk Fehlmessungen und Grenzwertüberschreitungen gemeldet wurden.

Verformungsverhalten Damm

Durch die dichte Lage des neuen Bahndammes zum Bestand wurde die östliche Böschung des Bestandsdammes überbaut. Die Dammaufstandsflächen auf dem anstehenden Untergrund und die zu überschüttende Böschung des vorhandenen Dammes mussten nach Abtrag des Oberbodens ertüchtigt und der vorhandene Damm gesichert werden. Bereichsweise wurden Rüttelstopfsäulen niedergebracht. Zur Sicherung des Dammes gegen Sackungen infolge der Rüttelstopfverdichtung wurden Mikropfähle über die gesamte Böschungfläche eingebaut (Bild 19).

Während der gesamten Dammbauzeit und einer nachlaufenden Liegedauer von mehreren Monaten wurde das

Verformungsverhalten des Bestandsdammes überwacht. Die Schlauchwaagemessung hat über die gesamte Bauzeit einen sehr guten Überblick über das Verformungsverhalten des Dammes gegeben (Bild 20).

6 Empfehlungen für zukünftige Vorhaben

Selbst ein sehr umfangreiches Monitoringsystem kann nur einzelne, zuvor als Gefahrenpunkte definierte kritische Stellen eines Bauwerks überwachen. Somit stellt es keinen Ersatz, sondern eine wertvolle Ergänzung der visuellen Begutachtung dar. Damit können kritische Verformungszustände zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt erkannt und somit wichtige Reaktionszeit gewonnen werden.

Das Konzept für die Monitoringanlage muss von einem erfahrenen Gutachter unter Berücksichtigung des Bauwerkszustands und der geplanten Baumaßnahmen erstellt werden. Besondere Bedeutung hat dabei das „Vordenken“ möglicher kritischer Zustände einschließlich deren Ankündigungsverhalten, um daraus für die Überwachung geeignete Messgrößen identifizieren zu können.

Für die Planung und Realisierung der Anlage ist ein ausreichender zeitlicher Vorlauf vor Baubeginn erforderlich, zumal ein mindestens einmonatiger (besser dreimonatiger) Probetrieb realisiert werden sollte. Dieser Probetrieb ist für die Definition der Grenzwerte von immenser Bedeutung. Zu eng gesetzte Grenzwerte führen zu vielen Fehlalarmen und damit zu einer sinkenden Akzeptanz bei allen Beteiligten. Zu hohe Grenzwerte lassen kritische Zustände nicht rechtzeitig erkennen. Beides führt zu einem schlechten Sicherheitsniveau.

Es muss im Vorfeld des Monitorings detailliert festgelegt werden, welche Maßnahmen bei Erreichen eines Grenzwertes in welchem Zeitfenster erfolgen müssen und wer dafür verantwortlich ist. Ein mehrstufiges Warn- und Alarmwertkonzept hat sich in der Durchführung sehr gut bewährt. In der Regel sollte keine automatische Betriebsbeeinflussung aus dem Monitoring erfolgen, da die Messwerte nur ein Teilstück zur Gesamtbeurteilung liefern. Die letztendliche Entscheidung über erforderliche Maßnahmen ist durch den Verantwortlichen vor Ort zu treffen.

Literatur

- [1] WOLLENWEBER, BURKHARD: *Historische Brückenkonstruktionen – Technische Bauwerke in Niedersachsen*. Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen 33, 2006.
- [2] IBW Ingenieurbüro für Bauwerkserhaltung Weimar: *Gutachten Prognose zur Nutzungsdauer*. 04.02.2009, unveröffentlicht.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Marx Krontal GmbH
Beratende Ingenieure
Uhlemeyerstr. 9+11
30175 Hannover
info@marxkrontal.com

Dipl.-Ing. Ludolf Krontal
Marx Krontal GmbH
Beratende Ingenieure
Uhlemeyerstr. 9+11
30175 Hannover
info@marxkrontal.com

Dipl.-Ing. Kai Tamms
Ingenieur- und Vermessungsbüro Drecoll
Berliner Allee 13a
30175 Hannover
tamms@drecoll.de

■Bildquellen bitte ergänzen■