

# Präzise Bauwerksüberwachungsmessung mittels automatischer Druckschlauchwaage – Ein Bericht aus der Praxis

DIPL.-ING. MARIO HAUPT & DR. CHRISTIAN HESSE

Der nachfolgende Beitrag beschreibt ein umfangreiches Bauwerksmonitoring an zwei Autobahnbrücken mit Hilfe eines präzisen hydrostatischen Nivellements.

Die durchgeführten Überwachungsmessungen dienten zur Bestimmung des Bauwerksverhaltens der beiden Brücken während des Rückbaus einer der jeweils gesperrten Richtungsfahrbahn im Zuge der Erneuerung der Brücken.

Das hydrostatische Monitoringsystem bestand aus 10 Nivellementslinien mit insgesamt 68 Druckgefäßen, 70 Temperatursensoren und zwei Datenloggern.

Alle Messwerte wurden während der Bestimmung des Normalverhaltens im Abstand von 60 Sekunden und während der regulären Betriebsphase von 15 Minuten abgefragt und per LTE-Modem an einen zentralen Monitoringserver übertragen. Auf diesem Server wurden die Prozessierung der Linien und die Visualisierung der gesamten Daten durchgeführt sowie eine kaskadierte Alarmfunktion realisiert. Während des Rückbaus der Brückenteile wurde das System im Rahmen einer 24/7 Bereitschaft betreut.

Über den Betriebszeitraum von 4 Monaten wurden auf diese Weise rund 3 Millionen Messwerte registriert und verarbeitet.

**Schlüsselwörter** – Bauwerksüberwachung, Monitoring, automatische Druckschlauchwaage, Webportal

## 1. Einleitung

Der Nachweis der Standsicherheit von Ingenieurbauwerken wie Brücken, Tunneln oder Schleusen (HESSE ET AL. 2016) durch die vermessungstechnische Erfassung von Deformationen ist eine typische Aufgabenstellung für Vermessungsbüros und findet in aller Regel in enger Zusammenarbeit mit dem Bauingenieurwesen statt (HESSE ET AL 2018). Insbesondere die Bauwerksüberwachungsmessung bei der Erneuerung von Brückenbauwerken im Zuge von stark frequentierten Straßen (Autobahnen) stellt aufgrund der sehr häufigen parallelen Weiternutzung der Bestandsbauwerke während der Baumaßnahme eine besondere Herausforderung dar. Die Bestandsbrückenbauwerke in unmittelbarer Nähe zum Baugeschehen unterliegen infolge von Abbrucharbeiten starken zusätzlichen Einwirkungen und statischen Beanspruchungen, die über die normalen Verkehrsbelastungen weit hinausgehen können. Die Realisierung einer Bauwerksüberwachungsmessung hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, die bei der Planung und Umsetzung berücksichtigt werden müssen, damit die Bauwerksbewegungen präzise erfasst werden können. In der Regel kommen konventionelle Messverfahren wie Nivellement oder Tachymetrie zum Einsatz, bei denen in regelmäßigen Intervallen die relevanten Objekt- oder Setzungspunkte manuell beobachtet werden.

Diese Verfahren setzen voraus, dass alle Referenz- und Objektpunkte jederzeit zugänglich sind und eine Netzkonstellation mit entsprechenden Sichtverbindungen zwischen allen Messpunkten besteht. Zudem muss für die Nutzung von Sensorik mit Kompensator gewährleistet werden, dass die Messergebnisse nicht durch bauseitige Erschütterungen oder Vibrationen verfälscht sind. Ein kurzzeitiger Baustopp für diskontinuierliche Überwachungsmessungen ist in der Regel nicht möglich und steht darüber hinaus in direktem Konflikt zum Bauablauf. Die zum Teil extremen Bedingungen insbesondere bei langgestreckten Ingenieurbauwerken werden auch in HESSE UND HADRYCH (2012) am Beispiel der Grundinstandsetzung des Elbtunnels beschrieben.

Kann das Verhalten des Bauwerkes aufgrund der zusätzlichen Belastungen nicht gesichert vorhergesagt werden und besteht zudem die Gefahr, dass geringe Verformungen oder Setzungen zu einem Bauwerksversagen ohne Vorankündigung führen können, ist die manuelle Überwachungsmessung nur noch bedingt oder nur noch unter sehr hohen personellen Aufwand einsetzbar.

Als Alternative, insbesondere bei Langzeitbeobachtungen und unter schwierigen Messumgebungen, sollte auf automatische Dauermonitoringsysteme zurückgegriffen werden. Diese Messsysteme gewährleisten eine kontinuierliche Erfassung von Bauwerksverformungen oder –setzungen und können somit auch rechtzeitig das Erreichen kritischer Zustände melden. Zur Beobachtung von hochgenauen Vertikalbewegungen haben sich automatische Druckschlauchwaagen in einer Vielzahl von Überwachungsprojekten bewährt und stellen in der modernen Geomesstechnik einen wichtigen Bestandteil von Monitoringssystemen dar.

## 2. Überwachungsmessungen für die Bauwerke 3075 und 3075a

### 2.1. Ausgangslage

Die beiden Brückenbauwerke BW 3075 und BW 3075a im Zuge der BAB A7 nahe Derneburg/Salzgitter sollen im Rahmen einer Brückenerneuerungsmaßnahme vorgezogen rückgebaut und temporär durch einen aufgeschütteten Damm ersetzt werden. Es handelt es sich hierbei um Mehrfeldbrücken aus Spannbeton mit einer baulichen Trennung zwischen den Richtungsfahrbahnen, sodass jedes Bauwerk aus jeweils zwei Teilbauwerken besteht. Die Bauwerke wurden 1959 errichtet und überführen die



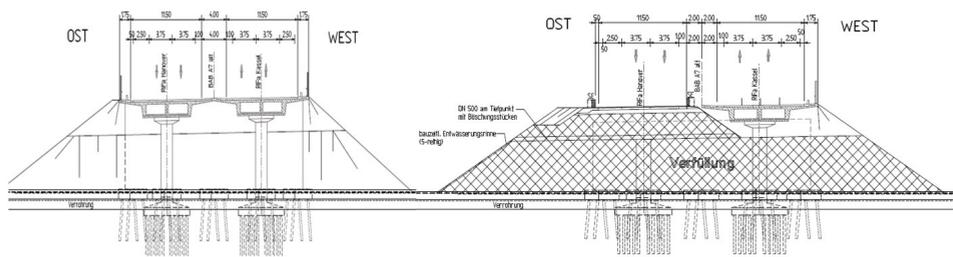
Abbildung 1: Übersicht Brückenbauwerke – Nord-Westlich Gemeinde Holle (Quelle: Google Earth)

Kreisstraße K306 (BW3075a) sowie einen Wirtschaftsweg (BW3075).

Aufgrund der örtlichen Situation und der hohen Verkehrsbelastung auf der BAB A7 erfolgt die bautechnische Realisierung des ersten Neubauabschnittes in einzelnen Bauphasen, in deren Ergebnis der Rückbau und die Herstellung eines Ersatzdammes für die Teilbauwerke in Fahrrichtung Hannover erbracht werden.

Im Rahmen dieser Maßnahme war eine kurzzeitige Mehrbelastung (9 Tage) durch die Einrichtung einer 4+0 Verkehrsführung auf den beiden westlichen Teilbauwerken (RF Kassel) geplant. Im Anschluss an den Rückbau über 9 Tage und die Rücknahme der veränderten Verkehrsführung wurden die beiden Teilbauwerke bis zur endgültigen Umverlegung des gesamten Verkehrs auf den neu hergestellten Damm vorübergehend weitergenutzt.

Um die Bauwerksbewegungen infolge der Mehrbelastungen sowie den parallel laufenden Tiefbau- und Abbrucharbeiten mit nicht unerheblichen Erschütterungen überwachen zu können, wurde ein ingenieurgeodätisches Monitoring auf Basis von Druckschlauchwaagensystemen geplant und ausgeführt.



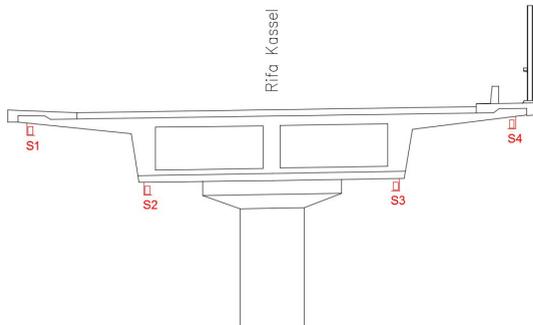
**Abbildung 2:** Auszug Querschnittsdarstellung Bauphasen – links Situation vor Baubeginn / rechts Situation nach Fertigstellung (NLStBV 2018)

## 2.2. Messkonzept Bauwerksmonitoring

Für die Überwachung der Standsicherheit des Bauwerkes während der Bautätigkeiten sowie der Mehrbelastungsphase wurde ein Messkonzept erarbeitet, welches die kontinuierliche elektronische Messwertfassung mit hoher zeitlicher und geometrischer Auflösung von einer Nullmessung im Normalzustand, über einen unbelasteten Bauwerkszustand bis hin zum Abschluss der Baumaßnahme gewährleistet.

Zur Realisierung der geforderten Standardabweichung für die Höhenveränderung von 1 mm bezogen auf Referenzpunkte am Brückenwiderlager und unter Berücksichtigung der schwierigen örtlichen Messbedingungen, wurde für die messtechnische Monitoringaufgabe ein elektronisches Druckschlauchwaagemesssystem ausgewählt.

Die Messwerte sollten hierbei mit Hilfe von Sensorknoten direkt vor Ort ausgelesen und über eine Mobilfunkverbindung (LTE) an einen Monitoringserver in Hamburg übertragen werden.



**Abbildung 3:** Darstellung Regelmessquerschnitt und Schlauchwaagengefäß vor Anschluss der Schläuche

Für die Erfassung der Höhenänderungen wurden an den beiden Teilbauwerk BW 3075a / BW 3075 insgesamt 10 Messlinien teilweise an den äußeren Enden der Kappen sowie an der Überbauunterkante installiert.

Die Abbildung 3 zeigt die vier Positionen der Schlauchwaagenlinien im Regelquerschnitt des Brückenüberbaus sowie ein bereits installiertes Druckgefäß vor Anschluss der Schläuche und Signalleitungen.

Die Erfassung der relativen Höhenänderung zwischen den einzelnen Messstellen ermöglichte eine präzise und zuverlässige Aussage über das Setzungsverhalten des Bauwerkes sowie lokale Höhenänderungen infolge der unmittelbaren Bauarbeiten oder der verkehrsbedingten Mehrbelastung.

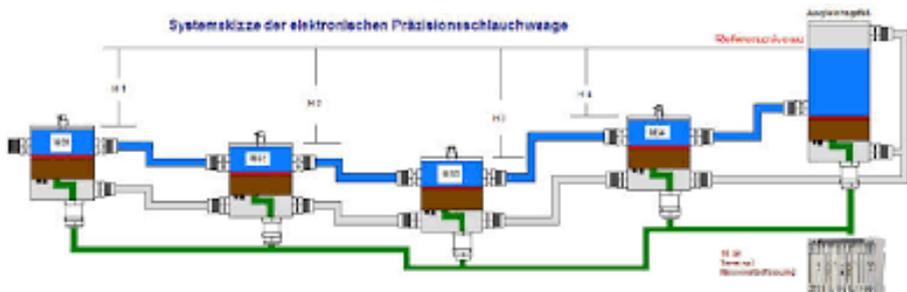
Für jede Messlinie wurde ein Referenz- bzw. Nullpunktgefäß an den nicht setzungsgefährdeten Widerlagern montiert. Diese Messstellen dienen als Höhenfixpunkte, um die Höhendifferenz zu allen anderen Objektpunkten derselben Linie bestimmen zu können.

### 3. Einrichtung und Betrieb eines Monitoringsystems

#### 3.1. Sensorik und Installation

Das Überwachungsmesskonzept sah die Verwendung einer automatischen Druckschlauchwaage vor. Die Arbeitsweise dieses Schlauchwaagen-Systems beruht auf der Messung des hydrostatischen Differenzdrucks in den jeweiligen Messgefäßen einer Linie (siehe Abbildung 4).

Eine Änderung der relativen Höhenlage bewirkt eine proportionale Druckänderung, welche über das spezifische Gewicht der Flüssigkeit in eine Höhendifferenz umgerechnet werden kann. Die Messpunkte können unter Beachtung des Messbereiches an beliebiger Stelle am Messobjekt platziert werden.



**Abbildung 4:** schematische Darstellung einer elektronischen Druckschlauchwaage (NATEROP 2008)

Die einzelnen Messstellen wurden mit kalibrierten Präzisionsdrucksensoren ausgestattet, die eine Genauigkeit von  $\pm 0,09\%$  FS bei einem Messbereich von 0 bis 500 mm hydrostatischer Höhe aufweisen.

Die einzelnen Drucksensoren sind untereinander mit einer Hydraulikleitung sowie zur Kompensation von Luftdruckunterschieden zwischen den einzelnen Messstellen mit einer Pneumatikleitung verbunden. Erfahren die Messstellen eine Höhenänderung gegenüber dem Referenzgefäß, wird die entsprechende Druckänderung mit dem im Schlauchwaagengehäuse verbauten Drucksensor erfasst und über die Datenkabel an den Datenlogger übertragen.

Die Schlauchwaagendrucksensoren sind mit einem internen Temperaturfühler ausgestattet, sodass für jede Messstelle und registrierten Messwert auch die aktuelle Temperatur erfasst wurde. Hierdurch können Druckunterschiede, die aus einem Temperaturgradienten zwischen den Schlauchwaagengefäßen resultieren in gewissen Grenzen kompensiert werden.

Zudem wurde an jedem Teilbauelement noch ein zusätzlicher Temperaturfühler installiert, sodass simultan auch die Betontemperatur geloggt wurde, um temperaturinduzierte von nicht durch Verkehrslast hervorgerufenen Bauwerksdeformationen trennen zu können.

Die Installation des Schlauchwaagenmesssystems, die zum Teil von bis zu 6 Ingenieuren und Technikern vor Ort durchgeführt wurde, kann hinsichtlich der örtlichen Gegebenheiten, des parallel laufenden Baugeschehens und des sehr kurzen Zeitfensters für die Montage als durchaus herausfordernd betrachtet werden.

Insbesondere die Montage des Schlauchwaagensystems in einer Höhe von etwa 4 m ohne Einrüstung und insbesondere ohne die Möglichkeit des Setzens von Bohrungen sowie die parallel stattfindenden Erdarbeiten unterhalb der Brücke waren wesentliche Erschwernisse bei der Installation.



**Abbildung 5:** Schlauchwaagendrucksensor und Temperaturfühler

Eine strikte Vorgabe des Auftraggebers bestand darin, dass eine Fixierung der Befestigungswinkel für die Drucksensoren und für die Kabelkanäle an den Bauwerksunterseiten nur mittels Spezialkleber erfolgen durfte. Durch den Verzicht auf gebohrte Befestigungen sollte eine eventuelle Beschädigung der Bewehrung und Spannbewehrung vermieden werden.

Größtenteils war die Montage der Schlauchwaagenmesssystems nur mit Leitern oder einer Teleskoparbeitsbühne möglich. Abbildung 5 zeigt die installierte Schlauchwaage nach Abschluss aller Erdarbeiten unterhalb der Brücke. Um einseitige Sonneneinstrahlung und die daraus resultierenden wärmeimplizierten Druckänderungen zu verhindern, wurden entlang der gesamten Messlinien Kabelkanäle und zum Teil notwendige zusätzliche Sonnenblenden montiert.

Da ein durchgängig horizontaler Flüssigkeitshorizont aufgrund des Längsgefälles der beiden Teilbauwerke über die gesamte Beobachtungsstrecke nicht realisiert werden konnte, mussten die Messlinien in insgesamt 10 Einzellinien aufgeteilt werden. An den jeweiligen Übergabepunkten von einer Linie zur nächsten wurden Doppelgefäße montiert, um eine hypothesenfreie Berechnung der Deformationen über die gesamte Brückenlänge zur ermöglichen. Zur Herstellung eines gleichförmigen Flüssigkeitshorizonts und des notwendigen Initialdrucks wurden entsprechend viele Ausgleichgefäße installiert (Abbildung 6).

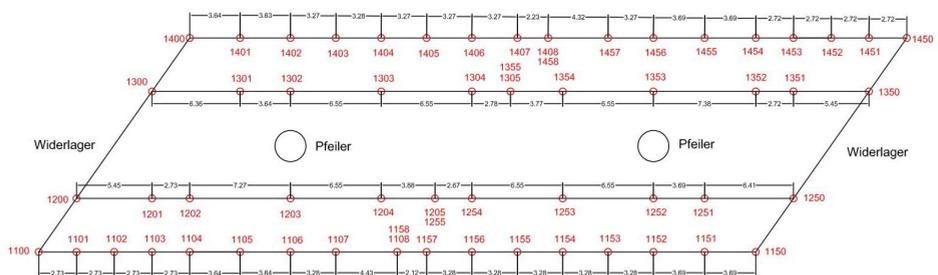


**Abbildung 6:** Datenlogger und Ausgleichgefäße (links), Übergabepunkt zwischen zwei Messlinien (rechts)

Insgesamt wurden bei diesem Projekt verbaut:

- BW 3075a 60 Drucksensoren  
8 Ausgleichgefäße  
61 Temperatursensoren
- BW 3075 8 Drucksensoren  
2 Ausgleichgefäße  
9 Temperatursensoren

Einen exemplarischen Überblick für das Teilbauwerk BW 3075a samt installierter Messstellen und Linien gibt die Abbildung 7.



**Abbildung 7:** Skizze Messstellen BW 3075a – Teilbauwerk RF Kassel

Die Verlegung der Flüssigkeits- und Luftschläuche sowie der Datenkabel erfolgte in den montierten Kabelkanälen und entlang der Widerlager durch zusätzliche Fixierungen.

### 3.2. Systemarchitektur und Webportal

Das Gesamtsystem bestand wie bereits erwähnt aus 10 Messungslinien, die als separate Sensorknoten betrachtet werden und an insgesamt zwei Datenlogger (8 Linien + 2 Linien) angeschlossen waren. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte grundsätzlich in Taktzyklen von 60 Sekunden für alle 68 Schlauchwaagengefäße. Die zum zentralen Monitoringserver übertragenen Daten wurden jedoch von der Nullmessung hin zum Regelbetrieb aus Gründen des Datenvolumens auf 15 Minuten tiefpassgefiltert.

Neben den rohen Messwerten der Schlauchwaagen wurden auch die in den Gefäßen registrierten Temperaturwerte, sowie die Bilder einer auf das rückzubauende Brückenbauwerk im Abstand von 10 Minuten auf den Server übertragen. Für die Datenübertragung kamen LTE Modems zum Einsatz, um die anfallenden Datenmengen zeitnah zu übertragen.

Die Berechnung der Höhenunterschiede sowie die Prüfung auf Überschreitung der vom Auftraggeber definierten Grenzwerte samt anschließender Alarmierung erfolgte im hauseigenen Monitoringsystem GeoSCADA, welches seit 2010 durch dhpI entwickelt und um vielfältige Sensorschnittstellen erweitert worden ist.

Abbildung 8 zeigt die Gefäßhöhen einer Schlauchwaagenlinie während des Rückbaus einer der Brückenteile. Die durch die Abbruchmaschinen erzeugten Schwingungen im Schlauchwaagensystem sind ab dem ersten Drittel der Zeitreihe klar zu erkennen.

Wunsch des Auftraggebers war zudem eine direkte Alarmierung mehrerer Mitarbeiter des NLStBV im Falle von definierten Grenzwertüberschreitungen per Email und SMS. Um bestimmte systematische Effekte wie Schwingungen aufgrund von starker Vibration vorab prüfen zu können, wurde ein zweiter interner Alarmkreis mit niedrigerer Auslöseschwelle eingerichtet, über den nur Mitarbeiter der beteiligten Vermessungsbüros vorab informiert wurden.

Nach Abschluss des Rückbaus wurde das Monitoringsystem aufgrund der sehr guten Ergebnisse für die Dauer von 2 Monaten weiter betrieben, um Informationen über das Normalverhalten des noch bestehenden Brückentyps für weitergehende Auswertungen zu erhalten. Abbildung 9 zeigt die Deformationen der zum rückgebauten Brückenbauwerk hin gelegenen Linie 1100 über einen Zeitraum von 10 Wochen. Es ist gut zu erkennen, dass durch die sinkende Lufttemperatur Deformationen (Absenkungen) in einer Größenordnung von bis zu 5 mm hervorgerufen werden, die von den Widerlagern zur Brückenmitte hin größer werden.

## 4. Erfahrungen mit Schlauchwaagen im hochdynamischen Umfeld

Die Installation eines Schlauchwaagensystems außerhalb von Gebäuden, insbesondere an Orten, die im Hinblick auf Sonneneinstrahlung exponiert und von zum Teil sehr starken Vibrationen beeinflusst sind, ist als Anwendung im Grenzbereich zu sehen.

Vor allem unter diesen Bedingungen ist eine sehr sorgfältige Installation der Gefäße, Verlegung der Leitungen sowie der Schutz der flüssigkeitsführenden Leitungen vor unterschiedlicher Erwärmung von höchster Priorität, um Nutzsignal von Störeinflüssen unterscheiden zu können.

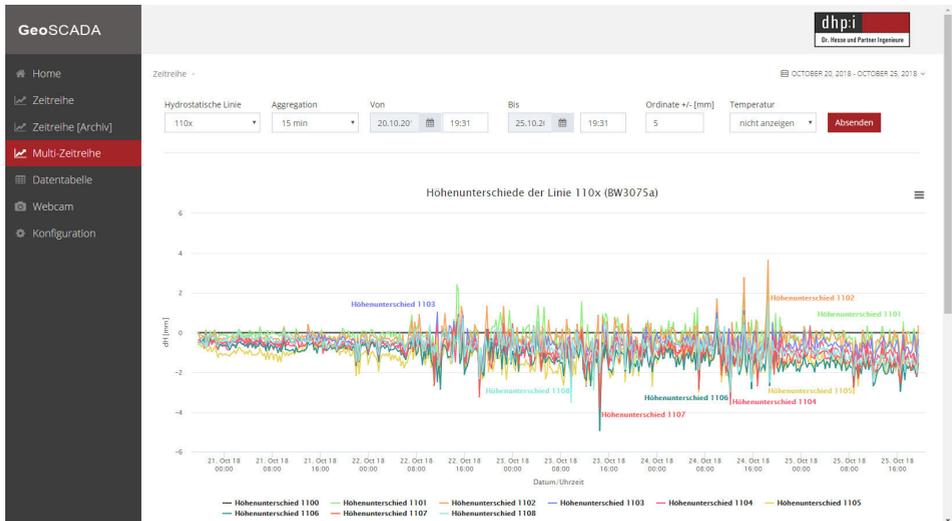


Abbildung 8: Darstellung von Zeitreihen während des Rückbaus.

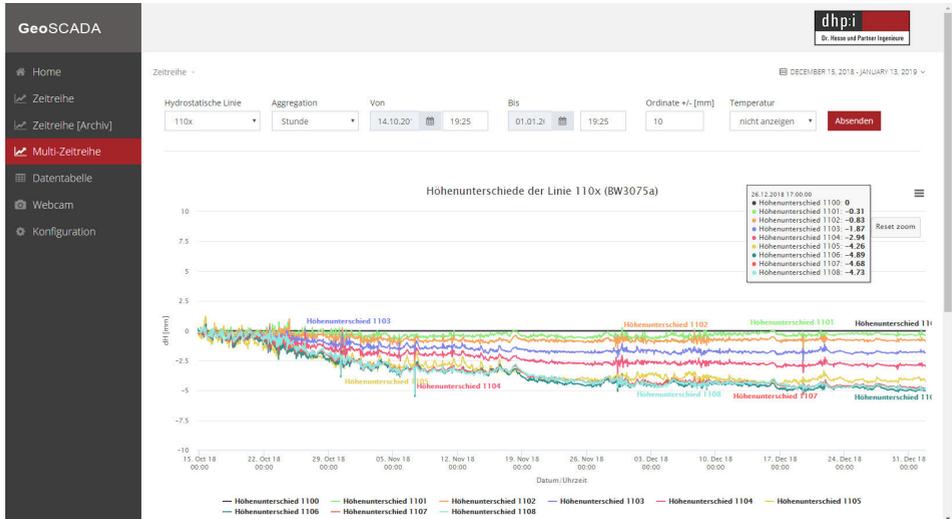


Abbildung 9: Zeitreihe aller Gefäße von Linie 1100 über 10 Wochen Messdauer

Die mehr als 20-jährige Erfahrung der Beteiligten bei der Installation und dem Betrieb von Schlauchwaagensystemen war diesbezüglich von Vorteil.

Wie nahe die eigentlichen Abbrucharbeiten an den installierten Schlauchwaagengefäßen stattfanden, ist in Abbildung 10 zu sehen. Der langgestreckte, horizontal unter der Brücke verlaufende, Streifen ist der Kabelkanal samt daneben installierten Schlauchwaagengefäßen, der sich in einem Abstand von etwa 10 cm von der Schnittstelle zwischen beiden Brücken befindet. Auch nach Rückbau der Teilbrücke war diese Linie noch vollständig intakt und übermittelte Daten.

Es sei dennoch darauf hingewiesen, dass vor allem die starken Vibrationen während des Rückbaus trotz starker Tiefpassfilterung der Daten von 60 Sekunden auf 15 Minuten zu einer spürbaren Beeinträchtigung der Messwerte führten. Während der 9-tägigen Rückbauphase wurde aus diesem Grund vom Monitoringserver vereinzelt Alarm ausgelöst, obwohl keine dauerhafte Deformation des Brückenkörpers vorlag. Dieser Umstand konnte im Zuge der 24/7 Bereitschaft stets unverzüglich untersucht werden, so dass die Integrität des Bauwerks über die gesamte Zeit gewährleistet werden konnte.

## Literatur

- NIEDERSÄCHSISCHE LANDESBEHÖRDE FÜR STRASSENBAU UND VERKEHR (2018): Ausführungszeichnungen, Bad Gandersheim.
- NATEROP, D. (2008): Dichte Siedlungsräume und beweissichernder Einbezug der Nachbarliegenschaften in Projektierung und Bau: Massnahmen, Sinn und Zweck.
- HESSE, C. & HADRYCH, I. (2012): Verzahnung von Bauprozess und Ingenieurgeodäsie am Beispiel des Elbtunnel Hamburg, DVW Seminar Messen im Bauwesen, Weimar.
- HESSE, C., NEUMANN, I., WODNIOK, J. & LIPPMANN, G. (2016): Monitoring von Großbauwerken an der Schnittstelle zwischen Geodäsie, Bauingenieurwesen und Maschinenbau am Beispiel des Schiffshebewerkes Lüneburg. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), Nr. 5/2016, S. 306 – 316, Wißner Verlag, Augsburg.
- HESSE, C., WILLEMSSEN, T., LEITZ, S., NEUMANN, I., WODNIOK, J. & HAKE, F. (2018): Durchführung von interdisziplinären Monitoringprojekten in der Praxis - Ergebnisse und Erfahrungen. In: Busch W. (Hg.): GeoMonitoring 2018. Clausthal-Zellerfeld.



Abbildung 10: Web-Cam-Bilder während des Rückbaus (oben), nach erfolgreichem Rückbau (unten).