

Kontinuierliches Monitoring des Brückenbauwerkes über der Bucht „Goldenes Horn“

Monitoring System of Cablestayed Bridge over “Golden Horn Bay”

Boris Resnik, Andrey Yashenko

Die Strukturen von modernen Bauwerken werden immer filigraner und graziler, während die Belastungen auf sie kontinuierlich zunehmen. Zu solchen Bauwerken gehört auch die imposante Brücke über die Bucht „Goldenes Horn“ in der russischen Hafenstadt Wladiwostok. Dieses Bauwerk wurde in den letzten Jahren bei den extrem schweren Rahmenbedingungen errichtet und befindet sich zurzeit im Betrieb. Durch Verwendung der modernen Mikroelektronik, Computertechnik und Kommunikation ist es dabei gelungen, den Zustand dieses besonders gefährdeten Bauwerkes im Laufe des ganzen Bauvorhabens auf einem wesentlich höheren technischen Niveau zu kontrollieren. Im vorliegenden Artikel wird die praktische Realisierung dieser Kontrolle sowie die Analyse von ausgewählten Ergebnissen vorgestellt.

Schlüsselwörter: Schrägseilbrücke, Monitoring, dynamische Beanspruchung, Neigungssensor, Beschleunigungsaufnehmer

While the structures of modern constructions increasingly become more delicate and filigree, loads on them rise continually. One example of such a construction is the impressive bridge over the Golden Horn Bay in the Russian port city Vladivostok. The bridge was constructed in the last years under extremely difficult environmental circumstances and is currently in operation. Through the use of modern micro electronics, IT and communication technology, the state of this particularly jeopardised building was controlled on a significantly higher technical level throughout the construction time. This article presents the practical realisation of the control measurement system and analyses selected results of the monitoring process.

Keywords: Cablestayed bridge, monitoring, dynamic characteristics, inclination sensor, accelerometer

1 BESCHREIBUNG DES BAUWERKES UND RAHMENBEDINGUNGEN DES MONITORINGS

Mit dem Ausbau der Infrastruktur in Russland wurden in den letzten Jahren viele große verkehrstechnische Bauwerke erstellt. Zu solchen Bauwerken mit überregionaler Bedeutung gehört auch die imposante Brücke über die Bucht „Goldenes Horn“ im Fernosten des Landes, die eine ununterbrochene Autoverkehrsverbindung zwischen dem Zentrum der russischen Hafenstadt Wladiwostok mit seinen Wohnbezirken auf der anderen Seite des Hafens bei laufendem Schiffsverkehr im Ozeanhafen ermöglichen soll (Abb. 1). Die ersten Vorschläge, die beiden Teile der Stadt mit einer Brücke zu verbinden,

wurden bereits zum Ende des 19. Jahrhunderts bekannt. Allerdings wurde die Realisierung dieser Vorhaben immer wieder wegen politischer und finanzieller Schwierigkeiten verschoben. Die endgültige Entscheidung wurde erst im Jahre 2008 getroffen, als das aktuelle Projekt einer Schrägseilbrücke angenommen wurde. Das Bauwerk wurde im Sommer 2012 fertiggestellt und bildet inzwischen den abschließenden Teil der Autoverkehrsader „Flughafen Knewitschi“ – „Station Sanatornaja“. Es verbindet somit den Zentralteil der Stadt mit dem zukunftssträchtigen Stadtbezirk „Goldobin“ auf dem kürzes-



Abb. 1 | Brückenbauwerk über die Bucht „Goldenes Horn“

ten Weg und gewährleistet die Ausfahrt zur ebenfalls im Jahre 2012 erstellten Brücke auf die Insel „Russkij“ über die Meereseenge „Östlicher Bosphorus“.

In Übereinstimmung mit den Normen der geltenden Gesetzgebung in Russland gehört das behandelte Bauwerk zur Kategorie außerordentlicher Brücken. Für diese Kategorie sind die Grundanforderungen an die qualitative und quantitative Zusammensetzung von technischen Mitteln des kontinuierlichen Monitorings in den Artikeln des Föderalen Gesetzes Nr. 348 vom 30.12.2009 „Technische Regelungen über die Sicherheit von Gebäude und Bauten“ festgelegt. Die Kategorie eines Objektes wird gemäß Artikel 48 des Städtebaulichen Gesetzbuches der Russischen Föderation und im Verzeichnis „Besonders gefährliche, technische komplizierte und einmalige Objekte“ (bestätigt durch das Föderale Gesetz Nr. 232 vom 18.12.2006) bestimmt.

Die Gesamtlänge des Bauwerkes ohne Rampen beträgt etwa 1,4 km (Abb. 2). Während der Überbau des Bauwerkes etwa 64 m über dem Wasser liegt, beträgt die Höhe von den tragenden Pylonen etwa 225 m. Dieses weitgehend einmalige Bauvorhaben wurden unter sehr schweren Rahmenbedingungen realisiert. Es herrschen in der Region oftmals dichter Nebel und heftige unerwartete Niederschläge, die von einem sehr starken Wind mit Geschwindigkeiten bis zu 15 – 20 m/s begleitet werden. Die Durchführung von geodätischen Messungen bei der Erstellung der tragenden Pylonen ist außerdem durch die übliche untere Bewölkungsgrenze in einer Höhe von 70 – 80 m erheblich beeinträchtigt. Diese meteorologischen Bedingungen führen oftmals zum Verlust optischer Sicht bei Anwendung von üblichen geodätischen Instrumenten, wie z.B. elektronischer Tachymeter.

Unter Berücksichtigung der eben genannten Faktoren wurde ein automatisiertes System zur permanenten neigungsmäßigen Überprüfung der Brückenpfeiler von der Arbeitsgemeinschaft bestehend aus dem Institut „Gyprostroimost – Sankt Petersburg“, der Firmen „Engineeringcenter GFK GmbH“ und „Mostovoje Büro GmbH“ entwickelt und im Laufe der Bauvorhaben eingesetzt /Непомнящий et al. 2012/. Dieses System diente vor allem der automatischen Bestimmung und Berücksichtigung der Neigungen der Brückenpfeiler in zwei Achsen (X, Y) während der Bauphase sowie der Berechnung von Abweichungen der Ist-Koordinaten von den Projektkoordinaten bei den Absteckungsarbeiten. Das entwickelte und verwendete System war außerdem als ein Bestandteil des einheitlichen staatlichen Systems der Vorbeugung und Liquidierung von außerordentlichen Situationen konzipiert. Im Rahmen der gestellten Aufgaben wurde deswegen von Anfang an geplant, dieses System sowohl für die Bauperiode als auch für den Zeitraum des späteren Betriebes der Brücke zu realisieren.

Das entwickelte System sollte folgende Funktionen erfüllen:

- Durchführung von Messungen im Echtzeitmodus an mehreren Kontrollpunkten,
- Visualisierung der Daten über den Zustand der Konstruktionen und Erstellung von entsprechenden Berichten,
- Speicherung der Daten und Führung eines Archives mit der Möglichkeit des Fernzugriffs (über Web-Interface oder andere technische Mittel),
- Datenanalyse im Postprocessing unter Benutzung der gespeicherten Informationen,
- Treffen von Entscheidungen bzw. Handlungen, die auf verschiedenen Szenarien der möglichen Entwicklung von Ereignissen begründet wurden.

Alle genannten Prozesse sollten den ständigen Zugriff für eine beliebige Zahl von Benutzern ermöglichen. Die Datenausgabe an die Benutzer musste dabei in Übereinstimmung mit den Forderungen des Nationalen Standards der RF GOST R 22.1.12-2005 und der Methodik des Monitoring des Zustandes der tragenden Konstruktionen von Gebäuden und Bauwerken entsprechen. Die graphische Darstellung der Daten in allen Ebenen musste je nach Bedarf für jeden einzelnen Messpunkt und für jeden einzelnen Parameter zusammengefasst werden, die auf der Nutzeroberfläche in der Regel in Form einer Ampel abgebildet werden. Die von Mitarbeitern des Institutes „Gyprostroimost – Sankt Petersburg“ vorbereiteten und vom Auftraggeber bestätigten normativen Betriebsunterlagen regel-

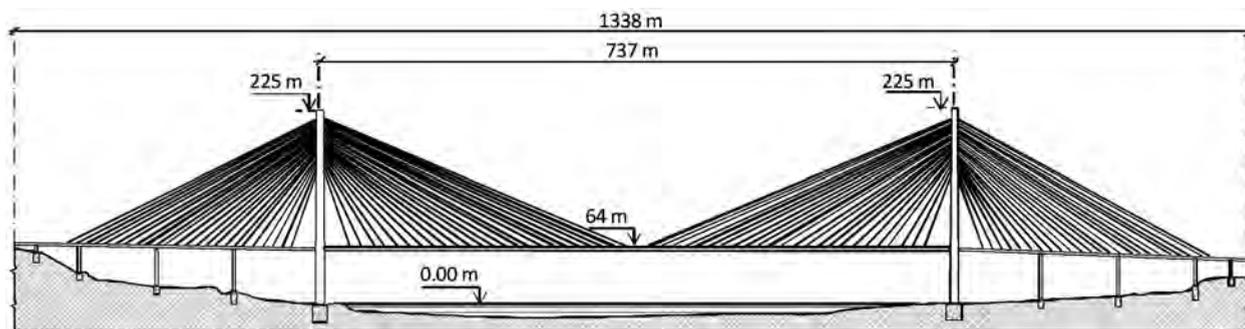


Abb. 2 | Schematische Darstellung des Bauwerkes

ten die Handlungen des Personals bei der operativen Reaktion auf alle möglichen außerordentlichen Situationen, die mit dem beschriebenen System festgestellt werden könnten.

2 BESCHREIBUNG DES MONITORINGSYSTEMS

Als Grundlage zur Projektierung des Monitoringsystems diente die vom „Institut Gyprostroi most – Sankt Petersburg“ entwickelte Methodik, die u.a. ein Verzeichnis der zu messenden Werte beinhaltet und die Periodizität der Messungen, Verteilung der Sensoren sowie Methoden der mathematischen Datenauswertung beschreibt. Für die behandelte Schrägseilbrücke wurden folgende Parameter kontrolliert:

- mechanische Spannungen der Konstruktionen,
- Verschiebungen (Neigungswinkel der Brückenpfeiler, Drehwinkel in den Querschnitten, Verschiebung der Brückenpfeilerspitzen und der Mitte des Brückenüberganges),
- Umwelteinflüsse an einigen charakteristischen Stellen (Temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Luftfeuchtigkeit usw.),
- Vibrationen, die die eigenen Schwingungsformen der Konstruktion des Brückenüberganges im Ganzen und ihrer Elemente im Einzelnen bestimmen lassen.

Da eine ausführliche Beschreibung des Monitoringsystems den Umfang des Beitrages sprengen würde, können hier nur einige ausgewählte Bestandteile näher behandelt werden. So wurden die Neigungssensoren vom Typ Leica Nivel 220 auf den Höhen +63 m, +130 m, +175 m der Brückenpfeiler parallel bzw. senkrecht zur Brückenachse installiert (*Abb. 3*). Das Messsystem auf der Höhe +63 m wurde hinter dem Pfeiler untergebracht, weil auf dieser Höhe der Brückenübergang zwischen den Pfeilern verläuft. Das Trägergestell des Brückenüberganges liegt unter dieser Höhe und besitzt eine maximale Widerstandskraft gegen lineare und Drehungsdeformationen. Die zwei weiteren Sensoren wurden unterhalb und oberhalb der Schrägseilbefestigungen installiert. Alle Sensoren wurden in einem lokalen Netzwerk miteinander verbunden und über Kommunikationskanäle an den Server für die Erfassung der geotechnischen (geodätischen) Daten angeschlossen. Die Erfassung der Daten erfolgte mit unterschiedlichen Frequenzen, die in Anhängigkeit von den gestellten Aufgaben gewählt wurden.

Darüber hinaus wurden auf jeder der angegebenen Höhen und auf der Höhe +3 m die Temperatursensoren STS an den Außenseiten der Brückenpfeiler angebracht und mit dem Netzwerk verbunden. Hierbei gab es ebenfalls die Möglichkeit der Datenerfassung (Datenabnahme) in unterschiedlichen Abfrageperioden und nach den vorab erstellten Szenarien. Für die Bestimmung der Werte der einwirkenden meteorologischen Faktoren wurde auf dem Brückenübergang außerdem ein Wettersensor installiert, dessen Informationen auf den Server für die Verarbeitung der meteorologischen Daten weitergeleitet werden. Auf diesem Wetterserver wurden die http-Seiten erstellt, die folglich in den Internetressourcen untergebracht wurden. Der Server war im Büro der Niederlassung der „Mostovoje Büro GmbH“ in Wladiwostok installiert, welches sich in einer Entfernung von 400 m vom Pfeiler 8 und 1100 m vom Pfeiler 9 auf dem anderen Ufer der Bucht befindet (*Abb. 4*).

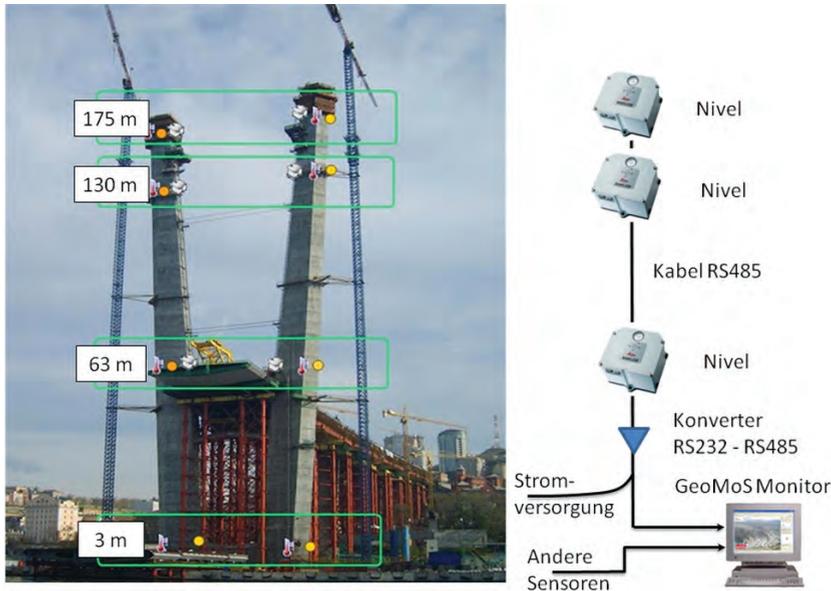


Abb. 3 | Monitoringsystem

Das Monitoringsystem hat unterschiedliche Kommunikationskanäle für eine sichere Datenübertragung verwendet. Außerdem wurden für die Gewährleistung der ununterbrochenen Funktionsfähigkeit im Stromversorgungssystem unterschiedliche abschaltgeschützte Energiequellen eingebaut. Die gesamte Hardware wurde in speziellen Schränken montiert und somit gegen äußere Beschädigungen geschützt. Um den Betrieb unter Winterbedingungen zu sichern, wurden die Schränke mit thermostabilisierten elektrischen Heizungssystemen versorgt.

Den Kern des Monitoringsystems bildete das Programm GeoMoS. Das Modul GeoMoS Monitor führte die Abfrage der Sensoren nach einem bestimmten Zeitprogramm durch und speicherte die Information in der SQL-Datenbank auf dem Server. Dieses Modul überwachte alle im System auftretenden Ereignisse wie z.B. Verschiebungen, Stromausfall und die Arbeit mit Reservestromquellen. Beim Auftreten und Registrieren eines Ereignisses erfolgte die Benachrichtigung der verantwortlichen Personen über Fax, SMS, E-Mail oder das Einschalten von Signalanlagen (Ampel, Sirene, Schranken). Das Modul fertigte auch Reservekopien der Daten an. Mittels zusätzlicher Software konnten diese Daten regelmäßig an Adressen in festgelegten Reserve- oder Informationsaustauschräumen übersendet werden. Das Modul Leica GeoMoS Web ermöglichte den Zugriff zu Monitoringdaten über Standard-Web-Browser (Abb. 5). Die Regeln des Zugriffs wurden individuell festgelegt. Jeder autorisierte Benutzer hatte die Möglichkeit, die Monitoringdaten auf seinem PC, Kommunikator oder Handy, einschließlich der Bilder von der Web-Kamera, abzurufen.

Auf einigen Etappen des Bauvorhabens wurde dieses System mit Schwingungssensoren erweitert, um die Möglichkeiten dieses Verfahrens im Rahmen der Überwachung zu testen. Bei den verwendeten digitalen 3-Achsen-MEMS-Beschleunigungssensoren handelte es sich um Sensoren der Firma ST Microelectronics. Sie haben eine Größe von ca. 7 mm x 7 mm x 2 mm und ein Gewicht von ca. 0,2 g. Der Messbereich von diesen Sensoren wird mit ± 2 g und die Sensorauflösung mit etwa 0,06 mg (16 Bit) angegeben. Auf Basis von diesen MEMS-Beschleunigungssensoren wurden vom Ingenieurbüro JHG Berlin in Zusammenarbeit mit der Beuth Hochschule für Technik Berlin in den letzten Jahren unterschiedliche prototypische feldtaugliche Sensorsysteme entwickelt und erfolgreich bei mehreren Projekten eingesetzt /Resnik, Gerstenberg 2011/. Da für einige Anwendungen ein autonomer Sensor von Vorteil wäre, wurde u.a. ein Messsystem in einem frostsicheren und spritzwassergeschützten Gehäuse mit einer internen Stromversorgung, einer Speicherkarte und WLAN entwickelt, das auch beim betrachteten Projekt eingesetzt wurde (Abb. 6).

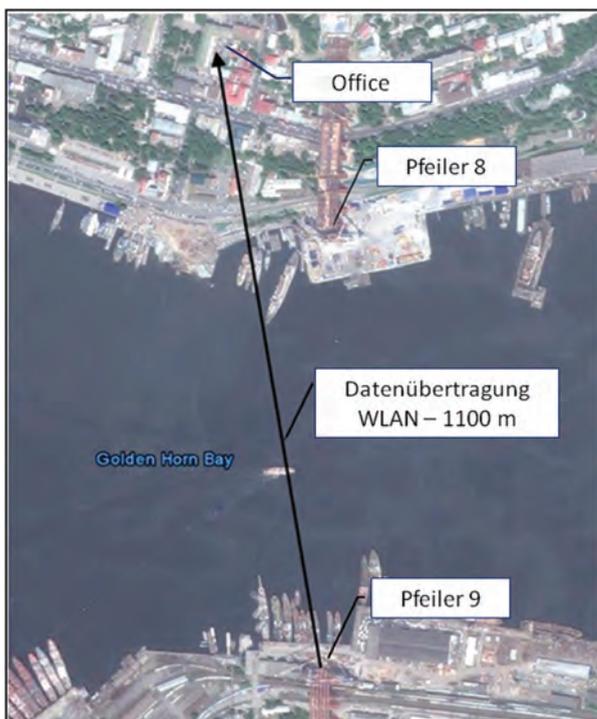


Abb. 4 | Datenübertragung

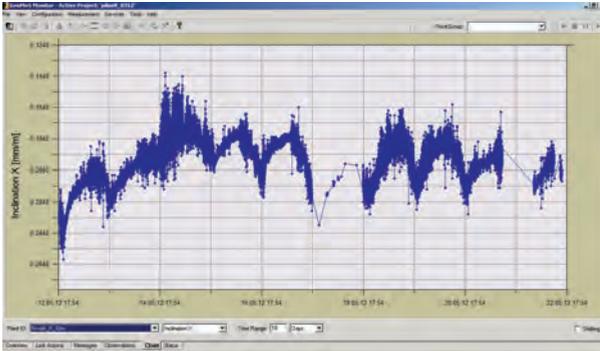


Abb. 5 | GeoMoS Monitor mit den aktuellen Neigungen in einer Achse



Abb. 6 | Anbindung der Beschleunigungsaufnehmer während der Bauzeit

3 AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE DES MONITORINGS

Den Entwicklern des Monitoringsystems gelang es, auf allen Etappen des Bauvorhabens ein Gleichgewicht zwischen maximal möglicher Informationsmenge und minimaler Anzahl der Kontrollpunkte zu erreichen. Die für jeden Sensortyp festgelegten Grenzwerte ermöglichten dabei die sichere Durchführung von unterschiedlichen Bauschritten. Dabei wurden die sehr umfangreichen Daten gesammelt und analysiert, die sicherlich bei der Durchführung von weiteren Projekten dieser Art von großem Nutzen sein werden. Da die Beschreibung von allen Ergebnissen den Umfang des Beitrages sprengen würde, werden hier nur ausgewählte Beispiele dieser Art näher behandelt.

Es ist bekannt, dass die räumliche Lage der zu errichtenden Brückenpfeiler aufgrund der starken und schnellen Erwärmung ihrer Oberflächen infolge der Sonneneinstrahlung erheblich beeinflusst wird. Wegen Temperaturdifferenzen auf beiden Seiten der tragenden Pylonen führen diese immer etwa ellipsenförmige Bewegungen aus, die mit großen Schwingungsamplituden durch Windstöße und die Arbeit von Hebemechanismen begleitet werden. In *Abb. 7* werden exemplarisch die gefilterten Ergebnisse zur Bestimmung von Neigungen eines Kontrollpunktes auf der Messstation in der Ebene von +175 m (*Abb. 6*) in Längsrichtung des Bauwerkes präsentiert. Wie auch zu erwarten war, ergeben sich die Längsverformungen entlang der Brückenachse nach Norden gerade dann, wenn die Sonne um 13:00 Uhr lokaler Zeit im Süden steht. Um 18:00 und 8:00 Uhr lokaler Zeit sind dagegen die entsprechenden Biegungen in der Querrichtung zu erwarten. Die ermittelten Verformungen an den unterschiedlichen Punkten und Zeitabschnitten stimmen sehr gut miteinander und mit den Ergebnissen von anderen, ähnlichen Messungen am Bauwerk überein. Sie beschreiben somit das „Normalverhalten“ des Bauwerkes und erlauben, bei den folgenden Überwachungsmessungen an denselben Messpunkten

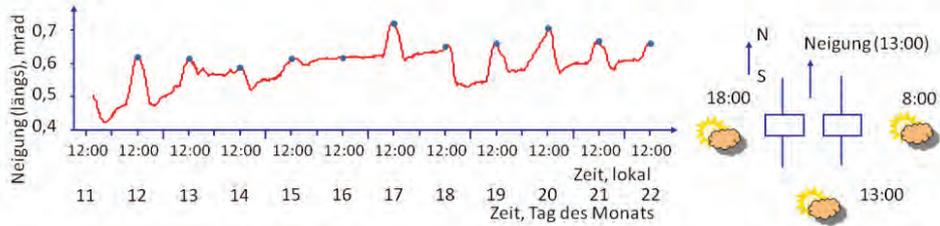


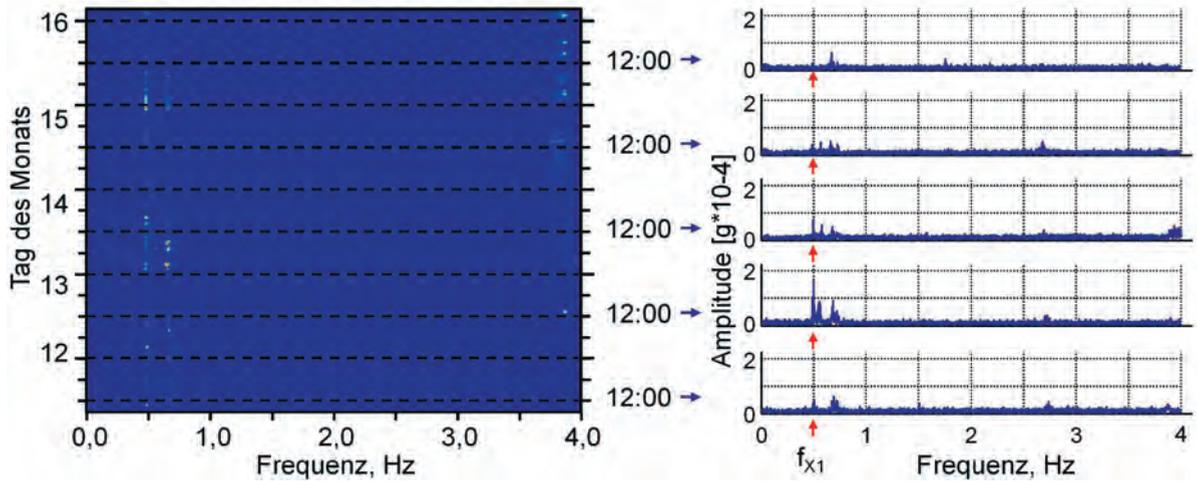
Abb. 7 | Einfluss der Temperaturdifferenzen auf die Ergebnisse der Neigungsmessungen

rechtzeitig erste Gefahrenzeichen zu erkennen und notwendige Maßnahmen zu ergreifen.

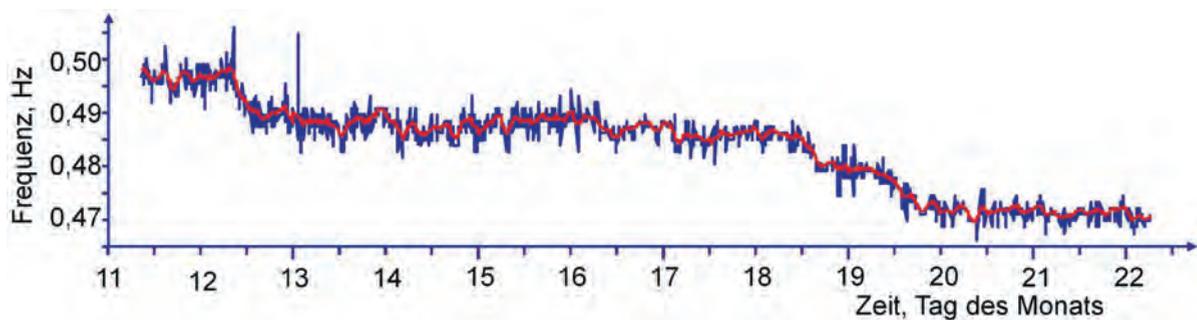
Durch Messung und Analyse des realen Schwingungsverhaltens im Rahmen des fortschreitenden Bauvorhabens parallel zu den beschriebenen Neigungsmessungen konnten Ergebnisse erzielt werden, die weit über die Möglichkeiten herkömmlicher Kontrollmessungen hinausgegangen sind und für diese von großem Nutzen waren. Die Vorgehensweise bei der Analyse und Präsentation dieser Ergebnisse sollte hier ebenfalls nur an einem typischen Beispiel veranschaulicht werden. Wenn man mit solchen Ergebnissen konfrontiert wird und eine einfache Vorstellung über ihre Haupteigenschaften erhalten will, sind sowohl die sog. Trendkarten als auch die übersichtlichen Grafiken zu den Änderungen von einzelnen Eigenfrequenzen im Rahmen der Online-Beobachtung sinnvoll /Resnik 2010/. In

Abb. 8 werden exemplarisch die Ergebnisse zur Bestimmung des Schwingungsverhaltens eines Kontrollpunktes auf der Messstation in der Ebene von +175 m (Abb. 6) in Längsrichtung des Bauwerkes präsentiert.

Die Messungen unter Last (Anregung durch Wind bzw. Bauarbeiten) zeigten immer eine eindeutige dynamische Charakteristik des Tragwerkes mit mehreren Eigenfrequenzen als einzelne Frequenzspitzen in den Spektrogrammen (die entsprechenden vertikalen Linien in den Trendkarten – Abb. 8 oben). Bei diesen Werten ergaben sich erwartungsgemäß die wesentlichsten Unterschiede im Laufe der Zeit. So sind z.B. die festgestellten Verschiebungen der Frequenz f_{x1} von etwa 0,5 Hz in der Abb. 8 (unten) deutlich zu erkennen. Zum Vergleich dienen die früher beschriebenen Ergebnisse der Neigungsmessungen an dem gleichen Punkt (Abb. 7), die allerdings ganz



Ergebnisse der Messungen (exemplarisch)



Änderung der Eigenfrequenz f_{x1} im Laufe der Zeit (exemplarisch)

Abb. 8 | Typische Ergebnisse der Online-Überwachung

andere physikalische Prozesse widerspiegeln. Die Ursachen und der Ablauf dieser Änderungen wurden folglich unter Beteiligung der verantwortlichen Bauingenieure genauer untersucht, wobei keine signifikanten Abweichungen vom Normalverhalten festgestellt wurden.

4 AUSBLICK

Der Betrieb des entwickelten Monitoringsystems bewährte sich positiv während der Bauphase. Der Abschluss der Beobachtungsperiode fällt auf den Zeitpunkt der Beendigung der Asphaltierungsarbeiten auf der Brückenüberfahrt und der Einbringung des Brückenüberganges in die Projektlage. Nach dem Abschluss dieser Vorhaben werden Arbeiten zur Montage und etappenweisen Inbetriebnahme eines Monitoringsystems für eine weitere Benutzung bei laufendem Betrieb des Brückenüberganges durchgeführt.

LITERATUR

Resnik B. (2010): Realisierung und Analyse von Schwingungsmessungen im Rahmen des Monitorings am Beispiel eines Brückenwerkes in Armenien. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 117(2010)6, 227-232.

Resnik B.; Gerstenberg J. (2011): Entwicklung eines Messsystems für Schwingungsmessungen im Rahmen des geodätischen Monitorings. In: Grimm-Pitzinger/Weinold (Hrsg.): 16. Internationale Geodätische Woche Obergurgl. Wichmann Verlag.

Resnik B.; Yashenko A.; Petter A. (2013): Anwendung von Schwingungssensoren im Rahmen des kontinuierlichen Bauwerksmonitoring. In: Hanke/Weinold (Hrsg.): 17. Internationale Geodätische Woche Obergurgl. Wichmann Verlag.

Непомнящий В.Г., Яценко А.И., Осадчий Г.В. (2012): Непрерывный мониторинг мостового перехода через бухту Золотой Рог. Дороги. Москва. Heft 5. <http://techinform-press.ru/PDFS/roads19.pdf>.

Prof. Dr.-Ing. Boris Resnik

BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN
FACHBEREICH BAUINGENIEUR-
UND GEOINFORMATIONSWESEN

Luxemburger Straße 10 | 13353 Berlin
resnik@beuth-hochschule.de



Dipl.-Ing. Andrey Yashenko

DIRECTOR COMMUNICATION AND
INFRASTRUCTURE
ENGINEERING CENTRE GFK LTD

Petrowskaya 1 - 304 | 111524 Moskau, Russland
aiy@icentre-gfk.ru

