

Adaptives Brückenmodell an der EMPA

Masoud Motavalli, Glauco Feltrin, Daniel Gsell
Abteilung Ingenieur-Strukturen, EMPA Dübendorf

1 Einleitung

Die Spannweiten der meisten bestehenden Schrägseilbrücken der Welt sind kleiner als 500 m. Das Interesse am Bau von Schrägseilbrücken grosser Spannweiten nimmt stetig zu. Ein Beispiel stellt die geplante Stonecuttersbridge in Hongkong mit einer Spannweite von 1018 m dar (Fertigstellung: 2008 [1]). Der Einsatz moderner, hochfester Werkstoffe erlaubt die Konstruktion von weit gespannten, schlanken Brücken. Dies führt zu eleganten Bauwerken, deren Seile und Brückenplatten jedoch eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Schwingungen aufweisen. Beispielsweise werden Seilschwingungen durch kombinierte Wind-Regen-Einflüsse (Beispiel: Dongting Lake Bridge [2]) wie auch durch den Verkehr angeregt. Solche Schwingungen verursachen einerseits Ermüdungsschäden und andererseits verunsichern sie die Brückenbenutzer.

In der Bauhalle der Abteilung Ingenieur-Strukturen der EMPA ist der Bau eines Schrägseilbrücken-Modells vorgesehen. Das Ziel dieses Projektes ist es, eine Brücke mit definierten Randbedingungen und Umgebungsparameter zu bauen, die mit verschiedenen Sensoren und Aktuatoren instrumentiert wird.

Hauptforschungsthemen dieses Projektes sind die Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Brücke, die Strukturidentifikation, die Langzeitüberwachung mit Sensorik, die Entwicklung von aktiven, semi-aktiven und passiven Dämpfungsstrategien und die Anwendung faserverstärkter Kunststoffe als tragende Strukturelemente (Brückenplatte und Seile). Zudem sollen die zerstörungsfreien Prüfmethoden zur Schadenerkennung an Brückenseilen weiterentwickelt werden.

Die Brücke selbst wird somit zu einer Art Forschungslabor, in welchem unterschiedlichste Themen des modernen Brückenbaues integriert und untersucht werden können. Das Projekt erlaubt es Forschung an einer komplexen und somit realitätsnahen Struktur zu betreiben. Somit stellt dieses Projekt ein Bindeglied zwischen den oftmals stark vereinfachten Laborexperimenten und der realen Tragstruktur dar.

2 Projektziele

2.1 Anwendung von modernen Materialien

Glasfaserverstärkte Kunststoff (GFK) Elemente werden vermehrt im Brückenbau eingesetzt. Der Grund für diese Entwicklung liegt vor allem bei ihrem geringen spezifischen Gewicht, der guten Korrosions- und Ermüdungsbeständigkeit sowie ihrer hohen Festigkeit. Aufgrund ihres geringen Gewichtes ist es möglich eine Brücke aus GFK-Elementen in einer sehr kurzen Zeit zu bauen, was zu grossen Kosteneinsparungen führt. Auf der anderen Seite bedingt das geringe spezifische Gewicht eine hohe Anfälligkeit auf unerwünschte Schwingungen. Ein Ziel dieses Projektes ist die Untersuchung des dynamischen Verhaltens der GFK-Elemente und die Entwicklung geeigneter Massnahmen zur Schwingungsdämpfung. Ausserdem soll eine konkurrenzfähige, modulare Brückenplatte aus GFK entwickelt werden,

welche für Fussgänger-Schrägseilbrücken unterschiedlicher Spannweiten eingesetzt werden kann.

Zwei CFK-Vorspannkabel wurden 1996 als Schrägkabel der Storchenbrücke in Winterthur, Schweiz, eingesetzt [3]. Das war weltweit die erste Anwendung von CFK-Kabeln dieser Art. Das Ziel ist der Einsatz von CFK-Kabeln für weit gespannte Schrägkabel-Brücken, bei denen das geringe Gewicht dieses Materials gegenüber Stahlkabeln eine wichtige Rolle spielt. Unerwünschte Schwingungen der CFK-Kabel könnten jedoch ihre Anwendung beschränken. Diese Problematik soll untersucht und geeignete Dämpfungsstrategien entwickelt werden.

Formgedächtnislegierungen (Shape Memory Alloy oder SMA) weisen den ungewöhnlichen thermomechanischen Formgedächtniseffekt auf. Quasi plastische Verformungen können durch Erwärmen rückgängig gemacht werden [4]. Im Rahmen des vorliegenden Projektes sollen die Eigenschaften dieses Werkstoffes ausgenutzt werden, um eine adaptive (geregelt) Vorspannung der Brückenplatte, mit dem Ziel die Biegemomente zu kompensieren und somit die Durchbiegungen klein zu halten, zu erreichen. Das heisst, die Brückenplatte wird bei Bedarf automatisch vorgespannt. Im Rahmen einer Diplomarbeit an der EMPA konnte gezeigt werden, dass sich Steifigkeit und Festigkeit eines mit SMA bewährten Betonträgers variieren lässt, und dass sehr grosse plastische Verformungen rückgängig gemacht.

2.2 Langzeitmonitoring und Schadensdetektion

2.2.1 Monitoring von modalen Parameter

Monitoring stellt im Bauingenieurwesen ein relativ neuer Begriff dar. Das Ziel ist eine kurz- oder langzeitige Zustandserfassung der Struktur. Der Gesundheitszustand des Bauwerkes, im Hinblick auf Schäden und auf die Fähigkeit zur zukünftigen Erfüllung der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit, soll erfasst und dargestellt werden. Bisher wurden von der EMPA zur Entwicklung eines Langzeitüberwachungssystems einmalige Untersuchungen an zwei Brücken durchgeführt (Projekt SIMCES [5], Projekt Hergiswil [6]). Dabei wurden die modalen Parameter über die Zeit beobachtet und zur Zustandsbeurteilung angewendet. Zur Erfassung der modalen Parameter werden üblicherweise Beschleunigungsaufnehmer verwendet, die auf der Oberfläche der Struktur angebracht werden. Im Rahmen des vorliegenden Projektes soll der Einsatz von integrierten Sensoren wie optische und piezokeramische Fasern untersucht werden. Zusätzlich zu den Beschleunigungsmessungen, welche die translatorischen Freiheitsgrade erfassen, werden mit diesen Fasern Dehnungen in den Strukturelementen gemessen, woraus direkt auf Krümmungen geschlossen werden kann. Dies soll eine bessere Identifikation der Systemparameter erlauben. Im Gegensatz zu früheren EMPA-Untersuchungen im Feld schafft die Modellbrücke in der Bauhalle die Möglichkeit, die gesamte Untersuchung unter wohl definierten Randbedingungen durchzuführen.

2.2.2 Monitoring von Magnetischen 'Flux Leakage' in Brückenseile

Die zerstörungsfreie «Gesundheitskontrolle» mit Hilfe induzierter Magnetfelder wird schon seit langem bei der Untersuchung von Seilbahnkabeln angewandt. Diese Methode wurde nun für die Prüfung von Brückentragseilen weiterentwickelt [7]. Entstanden ist eine mobile, einfach zu handhabende Messapparatur, mit der schnelle Resultate über den Zustand von Brückenseilen zu erhalten sind. Sie lässt Defekte innerhalb der freien Schrägseillänge erkennen, bevor diese ein gefährliches Ausmass annehmen können.

2.2.3 Zerstörungsfreie Prüfung der Brückenseile im Ankerkopfbereich

Die zerstörungsfreie Untersuchung der Kabel im Ankerkopfbereich kann nicht magneto-induktiv erfolgen, da der metallische Ankerkopf die elektromagnetischen Felder zu stark stört. Aufgrund der maximalen Beanspruchung des Seiles im Ankerkopfbereich (grösste Biegemomente überlagert mit der Zugkraft) muss eine alternative Prüfmethode gefunden werden. Dazu sollen an den Enden der einzelnen Litzen Strukturwellen in die Seile eingeleitet werden. Ein allfällig vorhandener Litzenbruch wird das einfallende Wellenpaket reflektieren, welches somit am Ort der Anregung wieder detektiert werden kann. Im Falle der Litzen können Wellen angeregt werden, welche sich in axialer Richtung ausbreiten und durch die ‚freie‘ Oberfläche geführt werden. Man spricht von ‚Guided Wave Propagation‘. Im vorliegenden Fall ist es wichtig, dass ein so genannter Wellenmode verwendet wird, welcher nur sehr kleine Oberflächenverschiebungen aufweist. Dadurch kann der störende Einfluss der Verankerung minimiert werden [8].

2.3 Passive, Aktive und Semiaktive Schwingungsdämpfung

Zurzeit sind folgende Projekte an der EMPA in Bearbeitung:

- Semi-aktive Dämpfung von Seilschwingungen:
An der Abteilung Ingenieur-Strukturen der EMPA wird zurzeit ein adaptives Dämpfungssystem für schwingende Brückenseile entwickelt [9]. Es wird versucht, mittels eines regelbaren Dämpfers (magnetorheologischer Fluidtdämpfer) die Schwingungen möglichst wirksam zu reduzieren. Aufgrund des aktuellen Schwingungszustandes des Seiles wird computergestützt die optimale Dämpferkraft berechnet und in einem geschlossenen Regelkreis eingestellt. Im Vergleich zum Seil mit nicht geregelter Dämpfer konnte so am Prüfstand (Abb. 1) bis anhin eine Schwingungsreduktion von bis zu 36% verifiziert werden.

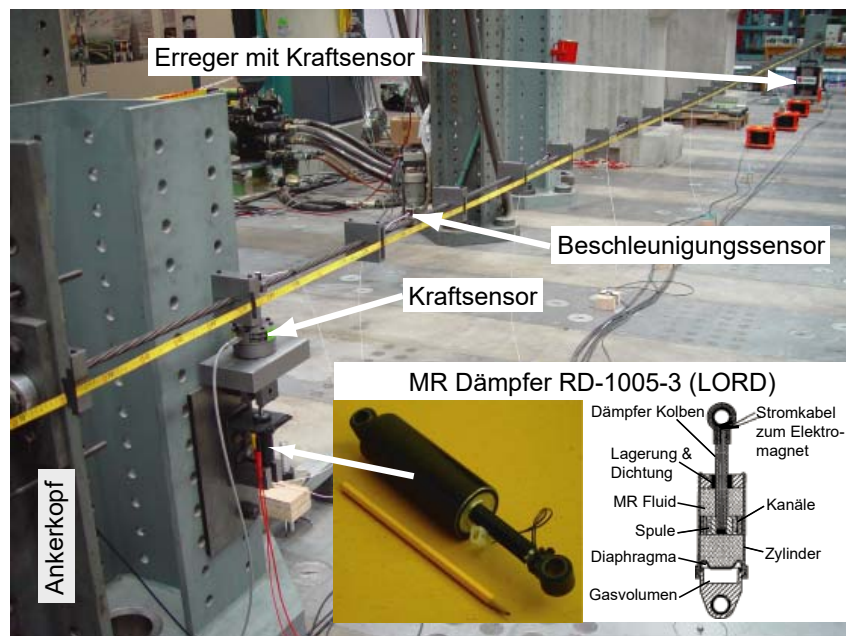


Abb. 1: Dämpfung von Seilschwingungen mit geregelter magnetorheologischer Dämpfer, Prüfstand im Labor der Abteilung für Ingenieur-Strukturen, EMPA Dübendorf.

- Passive und aktive Dämpfung von Seilschwingungen mit einem sekundären Seil:
Mit dem Hauptkabel, welches die grossen Vorspannkraft aufnimmt, wird ein Sekundärkabel so verbunden, dass die Verschiebungen quer zum Seil gekoppelt

sind. Nun soll über passive (Dämpfer) oder aktive (Aktuatoren) Beeinflussung des Sekundärseiles in axialer Richtung die Vibrationen des Hauptseiles gedämpft werden. Der Hauptvorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die grossen Vorspannkräfte nicht über die Dämpfer bzw. die Aktuatoren geführt werden müssen.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes werden die oben genannten Projekte in die Modellbrücke integriert und weiterverfolgt.

Ein weiteres Projekt ist die Weiterentwicklung des klassischen Schwingungstilgers (Tuned Mass Damper). Der Tilger soll sich ändernden Systemresonanzfrequenzen der zu dämpfenden Struktur anpassen können. Dies ist für sehr leichte Strukturen, bei denen die Eigenfrequenzen massgeblich vom aktuellen Belastungszustand abhängig sind, notwendig. Aber auch die Veränderungen der Frequenzen mit der Temperatur kann so berücksichtigt werden. Ein solcher adaptiver Schwingungstilger kann realisiert werden, indem während seines Betriebes aktiv seine Federsteifigkeit oder Masse angepasst wird.

2.4 Aktive Beeinflussung der Randbedingungen

Horizontale Relativbewegungen des Bauwerkes infolge Erdbeben bewirken aufgrund der Massenträgheit riesige Kräfte bei den festen Brückenlagern, welche die Zerstörung dieser zur Folge haben können. Bei Auflagern äussert sich dieses Problem in grossen Relativverschiebungen. Im Rahmen des Brückenprojektes soll zu dieser Problematik der folgende Lösungsansatz untersucht werden: Bei festen Lagern sollen die horizontalen Kräfte kontrolliert werden. Bei der Überschreitung einer vorgegebenen Schwelle, sollen bewusst Verschiebungen zugelassen werden, wodurch der weitere Anstieg der Lagerkraft kontrolliert werden kann. Ein entsprechender Ansatz kann auch bei den Auflagern verfolgt werden. Dabei gilt es den Relativverschiebungen zwischen Lager und Tragwerk, oberhalb einer definierten Schwelle, gezielt Kräfte entgegenzusetzen um die Verschiebungen zu kontrollieren.

2.5 Plattform für Forschung und Lehre

Die Modellbrücke dient als Forschungsplattform für unterschiedliche Forschungsprojekte auf der Basis eines realistischen Tragwerkes unter kontrollierbaren Rand- und Umgebungsbedingungen. Nationale und internationale Forscher werden die Gelegenheit haben, auf dieser Plattform zu kooperieren. Ausserdem soll die Möglichkeit geschaffen werden, Studenten und Baufachleute in verschiedenen Bereichen der Strukturdynamik an einem realistischen Objekt auszubilden.

3 Beschreibung des Brückenmodells

3.1 Konstruktion und Design

Die Schrägseilbrücke weist eine Spannweite von 19.2 m und eine begehbare Breite von 1.6 m auf (Abb. 2). Die Brückenplatte wird auf der einen Seite festgehalten, während sie beim Pylon und auf der anderen Seite einfach aufgelegt ist. Die Auflager werden so gestaltet, dass bei Bedarf die Auflagerbedingungen variiert werden können. Der Pylon besteht in einer ersten Projektphase aus zwei HEB 200 Stahlprofilen. Die Höhe beträgt 7.5 m. Der Pylon wird im Aufspannboden der EMPA-Bauhalle eingespannt. In einer späteren Phase ist geplant, selbst den Pylon aus glasfaserverstärktem Kunststoff zu fertigen.

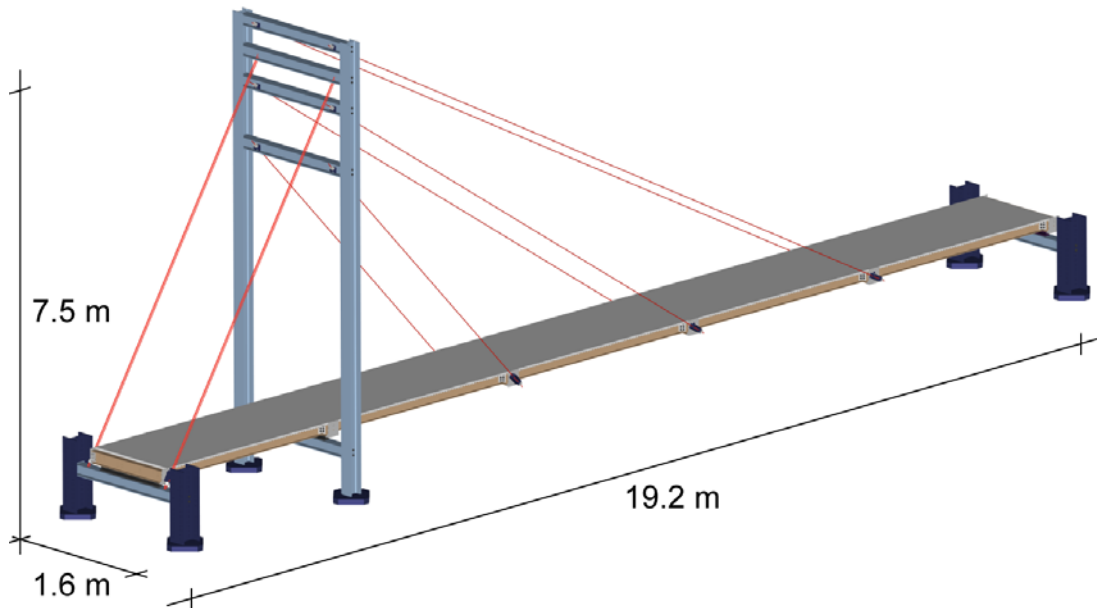


Abb. 2: Skizze der geplanten Fussgängerbrücke, die als Schrägseilbrücke mit GFK-Fahrbahnplatte realisiert wird.

Zu Beginn des Projektes werden 7-drahtige Stahllitzen als Schrägseile verwendet. Die freie Spannweite wird mit Hilfe von drei Kabelpaaren der Längen 5.8m, 9.4 m und 13.3 m überbrückt. Der Pylon wird mit Hilfe von je 3 Litzen der Länge 6.8 m rückverankert. Die Stahllitzen werden in einem späteren Zeitpunkt durch CFK-Zugglieder ersetzt.

Die Brückenplatte besteht aus fünf Modulen: vier der Länge 3.9 m und eines mit einer Länge von 3.6 m. Die einzelnen Plattenelemente werden in Längsrichtung aus vier I-200 GFK Standartprofilen aufgebaut (Abb. 3). Die Querträger bestehen aus je zwei verklebten I-200 GFK-Profilen. Um eine biegesteife Verbindung zwischen Längs- und Querträger zu erhalten, werden Beschläge aus Edelstahl verwendet.

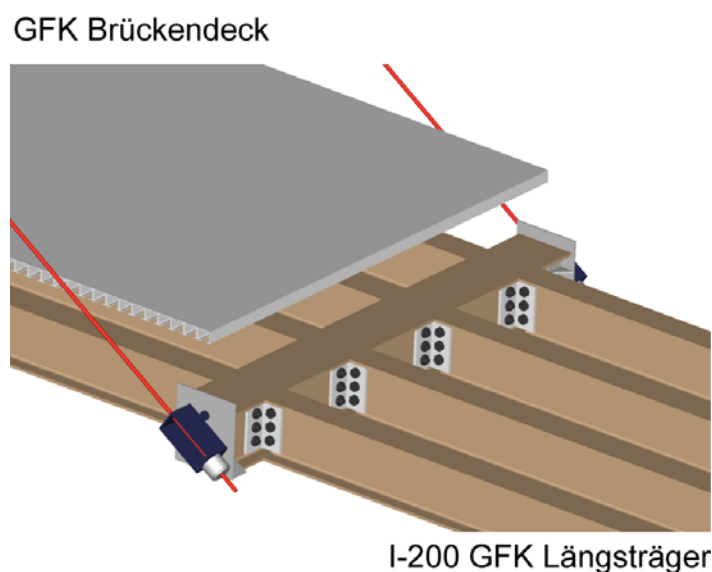


Abb. 3: Detail der Plattenkonstruktion mit abgehobenem Brückendeck. Längs- und Querträger bestehen aus I-200 GFK Profilen, während die Verbindungen zwischen den einzelnen Elementen mit Hilfe von Stahlprofilen erfolgt.

Der Anschluss an die Seile erfolgt über Stahlelemente, welche die konzentrierte Seilkraft auf die Kunststoffprofile überleiten. Für das Brückendeck wird ein pultrudiertes Plankenprofil der Firma Fiberline S/A (Dänemark) verwendet, welches die äusseren vertikalen Lasten auf die Längsträger abgibt. Diese Scheibe wird zudem benutzt, um den Brückenträger in Querrichtung zu versteifen.

In verschiedene Brückenelemente (Seile, Platte, etc) werden optische und/oder piezokeramische Fasern zur Online-Messung von Dehnungen integriert. Die Daten dieser Sensoren werden einerseits zur Brückenüberwachung und andererseits als Input für die Steuerung der Aktuatoren verwendet.

3.2 Modellierung

Die mathematische Modellierung der Brücke erfolgt mit Hilfe eines finiten Elementen Modells. Um eine maximale Flexibilität dieses numerischen Modells zu gewährleisten wurde die FE-Simulation mit Hilfe des Mathematik Software Paketes Matlab[®] durchgeführt. Als Basis dienen dreidimensionale Stabelemente, welchen die Balkentheorie nach Timoshenko zu Grunde liegt. Aufgrund der kleinen Schubsteifigkeit der GFK-Profile, müssen die Schubverformungen berücksichtigt werden, wodurch der Einsatz der Timoshenko-Theorie begründet ist. Das Tragwerk wird aufgrund der Lastannahmen gemäss Eurocode 1 dimensioniert.

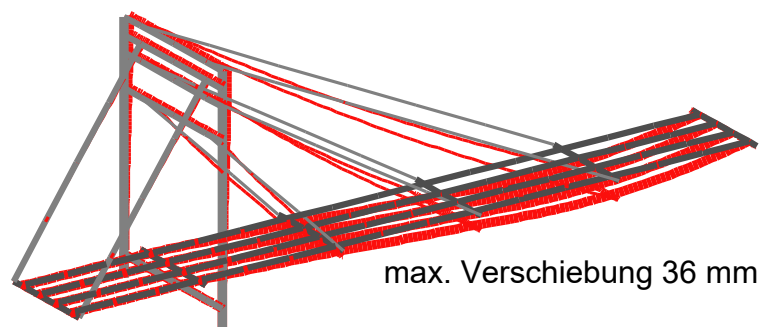


Abb. 4: Vertikale Verschiebungen infolge einer gleichmässig über das Brückendeck verteilten Last von 5 kN/m^2 .

Das Verhältnis zwischen der maximalen Nutzlast der Brücke (153.6 kN) und der Last des Brückenträger (13.0 kN) beträgt 11.8, was durch die leichten jedoch trotzdem widerstandsfähigen glasfaserverstärkten Kunststoffprofile bedingt ist. Dieses hohe Verhältnis hat auch zur Folge, dass der Nutzungszustand einen grossen Einfluss auf die Grösse der Eigenfrequenzen hat, wie dies unten in Abb. 5 anhand des ersten Biege-Eigenmodes illustriert ist. Auf der linken Seite ist das dynamische Verhalten der unbelasteten Struktur und rechts der maximal belasteten Struktur abgebildet.

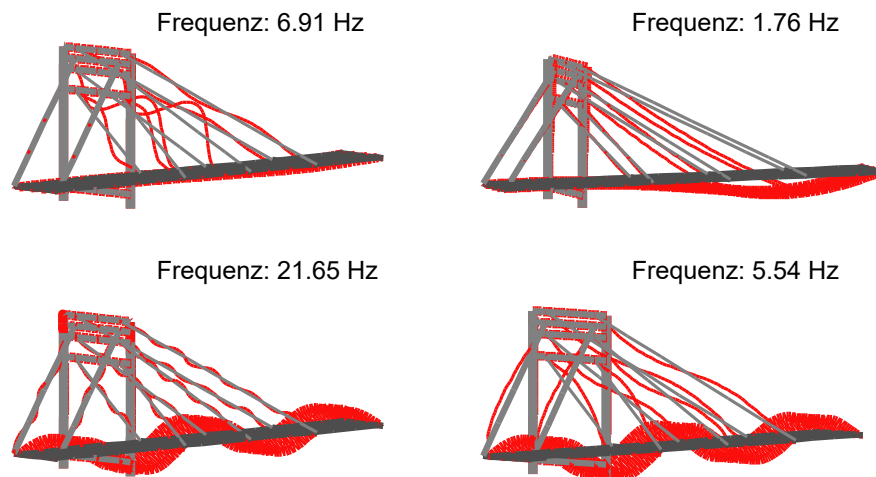


Abb. 5: Darstellung einiger Eigenmoden der geplanten Schrägseilbrücke. Links vom unbelasteten und rechts vom maximal belasteten Tragwerk.

4 Finanzierung des Projektes

Das Projekt wird von der Gebert Rüt Stiftung in Basel, Fiberline S/A in Dänemark sowie der EMPA unterstützt. Zurzeit werden weitere Kollaborationen mit schweizerischen und europäischen Projektpartner (Brückenseil-, Brückenlager-, Dämpfer-, GFK-Element-Hersteller, etc) verhandelt.

5 Referenzen

- [1] Stonecutters Bridge confirmed as record-breaker, Bridge Update, The newsletter for subscribers to Bridge design & engineering, ISSUE 15, October 2000
- [2] Ko J. M., Zheng G., Chen Z. Q. and Ni Y. Q., Field Vibration Tests of Bridge Stay Cables Incorporated with Magneto-Rheological (MR) Dampers, Proceedings of SPIE Vol. 4696, pp. 30-40, San Diego, Cal., 17-21 March 2002
- [3] Meier H., Meier U. und Brönnimann R., Zwei CFK-Kabel für die Stochenbrücke, SIA Nr. 44, 24 Oktober 1996
- [4] Czaderski C, Motavalli M., Formgedächtnislegierungen im Bauingenieurwesen – eine Vision, tec 21, Nr. 19, 9. Mai 2003
- [5] Maeck, J. and G. De Roeck, Damage assessment using vibration analysis on the Z24-bridge. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003. 17(1): p. 133-142.
- [6] Feltrin, G., Temperature and Damage Effects on Modal Parameters of a Reinforced Concrete Bridge, in Proceedings of the 4th International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn 2002, Munich, Germany, H. Grundmann and G.I. Schüller, Editors. 2002: Lisse, Netherlands. p. 373-378.
- [7] Bergamini A., Nondestructive Testing of Stay Cables - Field Experience in South East Asia, Proceeding 3rd World Conference on Structural Control, Como, Italy, 2002
- [8] Beard M.D., Lowe M.J.S. and Cawley P., Development of a guides wave inspection technique for rock bolts, Insight 34 (1), 2002, p. 19-24
- [9] Weber F., Feltrin G., Motavalli M. and Aalderink B. J., Cable Vibration Mitigation Using Controlled Magnetorheological Fluid Dampers: A Theoretical and Experimental Investigation, International Conference on Footbridge, Paris, France, November 20-22, 2002.