

Dämpfung und Kontrolle von Brückenbewegungen

Die Franjo-Tudjman-Brücke in Dubrovnik als Beispiel

Christian Braun
Peter Huber

1. Einleitung

Im modernen Brückenbau gehen die Bestrebungen zu stets längeren, höheren und schlankeren Konstruktionen. Diese Entwicklung führt zu größeren Nachgiebigkeiten und damit zu großen, häufigen und schnellen Bauwerksbewegungen aus veränderlichen Einwirkungen wie Temperatur, Wind und Verkehr. Hinzu kommen dynamische Anregungen, z. B. Regen-Wind-induzierte Schwingungen von Seilen, personeninduzierte Schwingungen von Fußgängerbrücken oder Bauwerksauslenkungen aus Erdbebenwirkung.

Zur Beibehaltung der Gebrauchstauglichkeit benötigen derartige Bauwerke eine zusätzliche oder zumindest angepasste Brückenausstattung. Das sind im Wesentlichen:

- Fahrbahnübergänge mit großer Bewegungskapazität,
- Brückenlager für große Auflasten und aufaddierte Wege,
- Schwingungsdämpfer zur Reduktion der Bewegungen und zur Energie-dissipation,
- Isolatoren zur Entkoppelung der Tragwerke.

Fahrbahnübergänge und Brückenlager auch für große Bewegungen gehören heute zum Stand der Technik. Für den Bauingenieur ungewohnt ist jedoch der Umgang mit den aus dem Maschinenbau stammenden Dämpfungselementen. Die in besonderen Fällen notwendige elektronische Steuerungstechnik ist gänzlich fremd. Der vorliegende Beitrag zeigt nach einer groben Übersicht möglicher Systeme anhand eines Ausführungsbeispiels die Möglichkeit der Kombination mehrerer Ausstattungselemente zu einem Bauwerkschutzsystem.

2. Bewegungsgrößen

Es ist zu unterscheiden zwischen den Schnittstellenbewegungen und Querauslenkungen der Tragkonstruktion. Erstere treten z. B. zwischen Überbau und Widerlager bzw. Pfeiler auf. Die freie Beweglichkeit des Bauwerks dient hier der Vermeidung von Zwängungen oder der Entkoppelung von bewegtem Untergrund. Die in der Tabelle wiedergegebenen Bemessungsgrößen außerordentlicher Bauwerke geben eine quantitative Vorstellung der aufzunehmenden Bewegungen.

Auslenkungen quer zur Tragkonstruktion oder ihrer Elemente beeinflussen in Form von Schwingungen die Gebrauchstauglichkeit der Bauwerke. Bei Fußgängerbrücken können durch Personenanregung im Resonanzbereich vertikale oder horizontale Auslenkungen und Beschleunigungen auftreten, die eine Nutzung der Brücke unmöglich machen oder sogar deren Tragfähigkeit gefährden. Schrägseile können durch Regen-Wind-Anregung in Schwingung geraten. Die zweite Tabelle gibt wiederum exemplarisch Bewegungsdaten markanter Bauwerke wieder.

3. Brückenausstattung

Bei Fahrbahnübergängen haben sich insbesondere für große Dehnwege Lamellenübergänge durchgesetzt. Durch spezielle Bauweisen können komplexe und sehr große Bewegungen, wie in der ersten Tabelle wiedergegeben, aufgenommen werden. Eine spezielle Herausforderung ist die Aufnahme von großen Erdbebenbewegungen, hier kommen häufig Sonderkonstruktionen zum Einsatz, bei denen durch Sollbruchstellen Schäden am Bauwerk verhindert und gleichzeitig bei Beibehaltung der Verkehrssicherheit und Nutzbarkeit übergroße Konstruktionen vermieden werden.

Brückengleitlager sind bezüglich der bei derartigen Bauwerken zu erwartenden Verschiebungsamplituden wegen der Anpassbarkeit der Gleitplatten nahezu uneingeschränkt einsetzbar. Insbesondere bei Verwendung von Kallottenlagern ist auch die ausreichende Rotationskapazität gegeben. Problematisch sind die hohe zu erwartende Verschiebegeschwindigkeit und der große aufaddierte Gleitweg aus Verkehrseinwirkung.

Bauwerk	Bewegungsart	Bewegungsgröße
Harilaos Trikoupis Brücke Rion Antririon Griechenland	Verschiebungen am Fahrbahnübergang im Gebrauchszustand Verschiebungen am Fahrbahnübergang im Erdbebenfall	längs 2480 mm, quer ± 100 mm, vertikal 63 mm längs 5010 mm, quer ± 2600 mm, vertikal 320 mm
Transrapid Trasse Hamburg Berlin	Gleitgeschwindigkeit bei Überfahrt Aufaddierter Gleitweg	15 mm/sec 50.000 m
Tejo Brücke „25. April“ Lissabon Portugal	Gleitgeschwindigkeit bei Zugüberfahrt Längsverschiebung aus Zugüberfahrt Aufaddierter Gleitweg	15 mm/sec ± 150 mm 10.000 m / Jahr
Sutong Brücke Hangzhou Bay, China	Verschiebungen am Fahrbahnübergang im Gebrauchszustand	längs 2600 mm

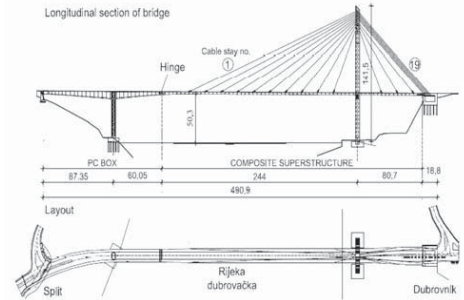
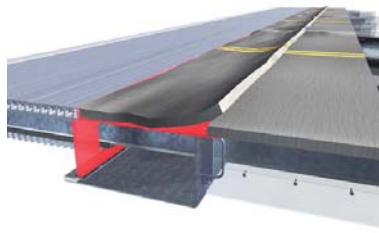
Bewegungsgrößen an außerordentlichen Bauwerken

Bauwerk	Bewegungsart	Bewegungsgröße
Millenium Fußgängerbrücke, London, Großbritannien	Horizontalbeschleunigungen	ungedämpft 0,25g gedämpft 0,02 g
Coimbra Fußgängerbrücke, Coimbra, Portugal	Vertikalbeschleunigungen Horizontalbeschleunigungen	vertikal ungedämpft 0,1 g vertikal gedämpft 0,04 g horizontal ungedämpft 0,3 g horizontal gedämpft ≤ 0,02 g
Franjo Tudjman Brücke, Dubrovnik, Kroatien	Auslenkung aus Wind-Regen induzierten Schwingungen	Seilschwingungen > 1m Deckschwingungen > 10mm

Beispiele der Schwingungsanregung von Bauteilen



Fahrbahnübergang DS 2480 F mit »Fuse Box« an der Harilaos-Trikoupis-Brücke in Griechenland



Temperaturbedingte Bewegungen spielen hierbei eine untergeordnete Rolle. Das üblicherweise eingesetzte Gleitmaterial PTFE erreicht bei 10 km Weg bzw. 2 mm/s Geschwindigkeit seine Grenzen, es werden deshalb besondere Gleitmaterialien erforderlich. Hohe Auflasten z. B. bei Pylonlagerungen erfordern kompakte Bauweisen.

Insbesondere seilabgespannte Fußgängerbrücken großer Spannweite sind sehr weich und manche ihrer Eigenfrequenzen liegen im Bereich der Schrittfolge von deren Nutzern. Die Schwingungen werden in der Regel durch Einbau elastisch und gedämpft gelagerter Sekundärmassen, deren Schwingverhalten genau an die Bauwerkschwingungen angepasst werden muss, reduziert.

Hydraulische Dämpfer werden immer häufiger für die Bedämpfung von Brücken in Erdbebengebieten, von Fußgängerbrücken oder von Seilen, die Regen-Wind-induzierten Schwingungen ausgesetzt sind, verwendet. Von maßgeblicher Bedeutung sind neben der Dämpfungskapazität die Anpassung an die veränderlichen Bauwerksanforderungen und klimatischen Bedingungen sowie die Dauerhaftigkeit.

Am Beispiel der Franjo-Tudjman-Brücke soll exemplarisch der Einsatz von Dämpfern mit unterschiedlichen Funktionen als Bestandteile eines Bauwerkschutzsystems vorgestellt werden.

4. Das Bauwerkschutzsystem der Franjo-Tudjman-Brücke

4.1 Die Franjo-Tudjman-Brücke

Die 518 m lange Franjo-Tudjman-Brücke überspannt in einer Höhe von 51 m die große Meeresbucht im Nordwesten der Stadt Dubrovnik. Der Brückenzug besteht aus einer unsymmetrischen Schrägseilbrücke in Verbundbauweise und einer Spannbeton-Zubringerbrücke. Die Schrägseilbrücke hat eine Hauptspannweite von 244 m und eine Nebenspannweite von 80,70 m. Das Hauptfeld schließt an die 60 m lange Auskragung der Massivbrücke an. 2002 wurde die Franjo-Tudjman-Brücke eröffnet. Das Bauwerk steht in erdbebengefährdetem Gebiet.

4.2 Das Bauwerkschutzsystem

Am Widerlager Split, der Trennfuge zwischen Schrägseil- und Spannbetonbrücke, sowie am Pylonauflager kamen Topfgleitlager für Auflasten bis 18,60 MN zum Einsatz. Die Lager an der Trennfuge erhielten Abhebesicherungen für den Erdbebenfall. Am Trennpfeiler und in der Pylonachse dienen je zwei bewehrte Elastomerlager mit Gleiteinrichtung zur seitlichen Führung sowie am Widerlager Split zur Abhebesicherung. Am Widerlager Dubrovnik ist die



Franjo-Tudjman-Brücke in Dubrovnik

Schrägseilbrücke mit dem Bauwerk fest verbunden, eine Sollbruchstelle schützt hier vor Überbeanspruchung aus Erdbebeneinwirkungen.

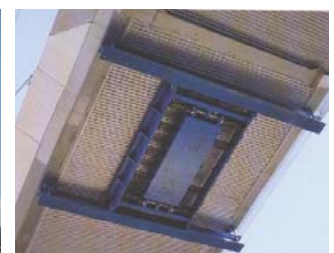
Am Widerlager Split kam ein Fahrbahnübergang vom Typ DS 400/440 zum Einsatz. Die maximalen Bewegungen im Gebrauchszustand wurden mit 173 mm, aus Erdbeben zusätzlich mit 249 mm angesetzt. Die besondere Herausforderung war hier der besonders schräge Fugenverlauf mit einem Winkel von ca. 37° zwischen Fugen- und Brückenachse. Wegen der zusätzlichen Abweichung von ca. 11° zwischen Brückenachse und Bewegungsrichtung wurde eine Querbeweglichkeit von ± 50 mm gefordert. Hinzu kam ein Horizontalknick im Bereich der Abbiegespur. Die Trennfuge wurde mit einem Fahrbahnübergang vom Typ DS 640/750 für 431 mm Gebrauchsbewegung und zusätzlich 310 mm Erdbebenbewegung in Brückenlängsrichtung ausgestattet. Wegen der Anfälligkeit der Schrägseile gegen Regen-Wind-induzierte Schwin-



MSM®-Kalottenlager für die Tejo-Brücke »25. April« in Lissabon



Horizontale Schwingungsdämpfer für Olympiabridge Ponte MOI in Turin



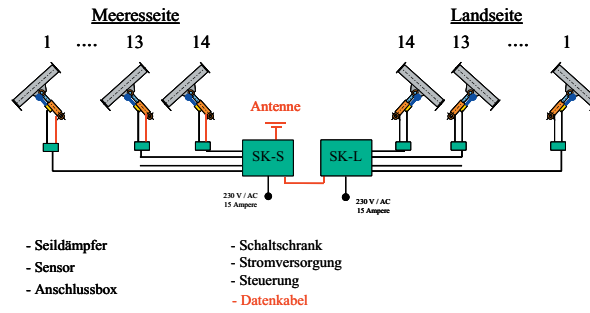
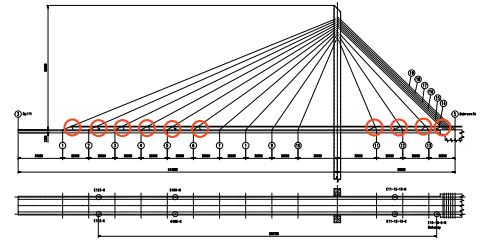
gungen erhielten die Schrägseile nachträglich adaptive hydraulische Dämpfer. Um die Horizontalverschiebungen aus Erdbebeneinwirkung zu reduzieren, wurden am Widerlager Split ebenfalls zwei hydraulische Dämpfer mit Lastbegrenzungsfunktion eingebaut.

4.3 Selbstregulierende und adaptiv wirkende Seildämpfer für Schrägseile

Der Fjordeingang kanalisiert in diesem Fall den Wind wie eine Düse und gibt so die Hauptwindrichtung vor. Infolge ihrer Schlankheit und der geringen Materialdämpfung der Seile konnten seit der Eröffnung der Brücke im Jahr 2002 immer wieder Seilschwingungen von ca. +/- 1 m und mehr bei Wind in Fjordrichtung in Kombination mit leichtem Regen bzw. Schnee beobachtet werden. Für die effektive Bedämpfung der Schrägseilschwingungen wurden daher nachträglich adaptive Seildämpfer (ACDs) an zehn Stellen angebracht. Die ACDs sind magneto-rheologische Fluid-Dämpfer. Das Fluid im ACD besitzt die Eigenschaft, seine Scherfestigkeit unter dem Einfluss eines Magnetfeldes verändern zu können. Entsprechend dem anliegenden Strom kann somit die Dämpferkraft im ACD-Arbeitsbereich geregelt werden. Die ACDs passen ihre Antwortkraft mittels einer Steuerelektronik an die variierenden Schwingungseigenformen der Seile optimal an. Hierfür misst ein Wegaufnehmer am Dämpfer die Bewegung des Seils. Aus dieser Messinformation werden zusammen mit den Kenndaten des Seils (Gewicht, Länge, Zugkraft im Seil usw.) die Eigenschwingformen des Seils und die erforderliche Dämpferkraft ermittelt. Die Mess- und Regelungsdaten der Schrägseildämpfer sind per Internet abrufbar. Damit können die Seilschwingungen sowie Seilspannungen jederzeit beobachtet werden. Das ermöglicht die Überwachung von Grenzwerten sowie die Feststellung von Störungen der Regelungstechnik. Softwarepflege und die Einspeisung veränderter Steuerungsalgorithmen erfolgen ferngesteuert. Das Seilkraftmonitoring ist eine nicht zu verachtende Zusatzleistung dieses adaptiven Systems.



Anordnung der adaptiven Seildämpfer



Regelungstechnik der adaptiven Seildämpfer



Die Seildämpfung konnte mit den ACDs um den Faktor »9« gegenüber ohne Dämpfer erhöht werden. Es ist somit eine effektive Kontrolle der maximalen Seilamplituden auch unter widrigen Regen-, Schneefall- und Windbedingungen möglich.

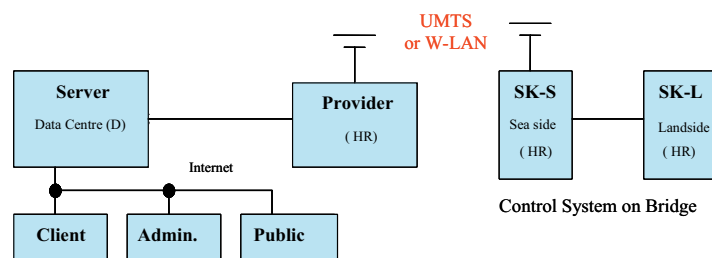
4.4 Erdbebendämpfer

Für die wirtschaftliche und ästhetisch schlanke Gestaltung von Brücken sind in Erdbebengebieten oftmals Dämpfer notwendig, welche das Bauwerk horizontal während des Erdbebens stabilisieren, die maximalen Horizontalbewegungen limitieren und die Beanspruchungen auf das Bauwerk abmindern. Im vorliegenden Fall war von einer Bemessungs-Bodenbeschleunigung von 0,37g und der Baugrundklasse B auszugehen. Eine dynamische Analyse mittels der Zeitverlaufmethode diente der Optimierung des Bauwerkschutz-

systems sowie der Tragelemente der Franjo-Tudjman-Brücke. Am Widerlager Split, Achse 1, wurden demzufolge zwei hydraulische Erdbebedämpfer (Typ MHD), welche auf eine horizontale Längskraft von jeweils 2.000 kN und eine Bewegungskapazität von 500 mm ausgelegt sind, eingebaut.

Folgende unterschiedlichen Lastfälle werden mit den MHDs berücksichtigt:

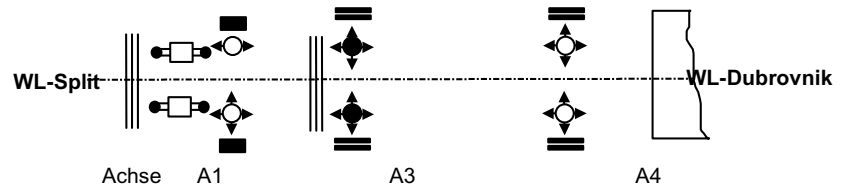
- Fall 1: »Langsame Bewegungen«, z. B. aus Schwinden oder Temperaturveränderungen, verursachen keine nennenswerten Antwortkräfte im Dämpfer.
- Fall 2: »Gebrauchslast«, d. h., der MHD blockiert die Bewegung bei plötzlich auftretenden Horizontallasten aus Wind, Verkehr etc. und hält das Brückendeck in Position.
- Im Fall 3 »Erdbeben« bewegt sich der MHD bei gleichbleibender Reaktionskraft.



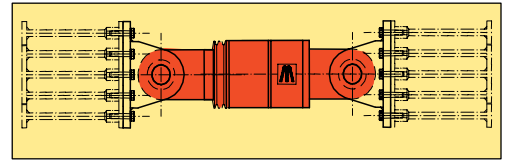
Kommunikationsstruktur des Monitoringsystems

Die beiden Dämpfer wurden im Widerlager »Split« mit entsprechenden Betonzugankern und Halterungen stirnseitig verankert.

Dieses Dämpfersystem gewährleistet die Abtragung der horizontalen Gebrauchslasten, ohne dass sich das Bauwerk bewegt. Im Lastfall »Erdbeben«, wenn die Energiezufuhr zu groß wird, bewegt sich der Dämpfer mit gleichbleibender Kraftantwort und lässt eine kontrollierte Bauwerksverschiebung für das Bemessungserdbeben von ca. ± 155 mm zu, wobei im Dämpfer Bewegungsenergie in Wärme umgesetzt wird. Aufgrund dieser kontrollierten und bedämpften Überbaubewegungen kommt es zu insgesamt 4.000 kN Horizontalkraft in den beiden Dämpfern, was im Vergleich zu einer Festhaltung mittels Festlagern um den Faktor 3–6 geringer ist. Die Dämpfer verhindern plastische Verformungen der Brücke, bei Auftreten des Bemessungserdbebens treten am Bauwerk keine Schäden auf.



Bauwerkschutzsystem aus Dämpfern auf Achse 1, Lagern und Dehnfugen



Hydraulische Dämpfer mit schematischer Verankerung

5. Ausblick

Das Bauwerkschutzsystem der Franjo-Tudjman-Brücke wurde in enger Zusammenarbeit mit den beiden auftraggebenden Firmen Walter Bau-AG und DSI International, der EMPA Zürich sowie Prof. Zavor von der Universität Zagreb entwickelt und realisiert. Eine weitere Herausforderung stellt die gerade im Bau befindliche Brücke

Sutong über die Hangzhou Bay in China dar. Mit 8,20 km Brückenlänge, 1.088 m Spannweite zwischen den Pylonen und 588 m maximale Seillänge stellt diese Schrägseilbrücke der Superlative einen neuen Weltrekord dar. Als Brückenausstattung kommen Fahrbahnübergänge für 2.600 mm Dehnweg und insgesamt 276 Seildämpfer zum Einsatz, 48 davon wiederum als adaptive Dämpfer.



Sutong-Brücke über die Hangzhou Bay in China

