

Erschütterungsmessungen bei Brückeninstandsetzungen

Ph. Truffer; BIAG Bloetzer Pfanmutter & Partner AG

Erschütterungsmessungen bei Brückeninstandsetzungen

1. Ausgangslage

In der heutigen Zeit müssen relativ häufig Verkehrsbauten unter Betrieb instandgesetzt oder gar verstärkt werden. Nebst organisatorischen Randbedingungen wie Bauablaufplanung, Verkehrssicherheit, usw. ergeben sich hieraus auch Auswirkungen auf die Qualitätsanforderungen. Eine Problematik, die sich in diesem Zusammenhang stellt, sind die Erschütterungseinwirkungen infolge Verkehr auf jungen, d.h. frisch verarbeiteten Beton, welche unter Umständen bereits in einer früheren Phase zu irreparablen Schäden an der Konstruktion führen können. Im nachfolgenden Artikel soll anhand eines konkreten Beispiels diese Problematik aufgegriffen und gezeigt werden, wie mittels von begleitenden Schwingungsmessungen bei der Instandsetzung einer Brücke effiziente Massnahmen eingeleitet werden könnten, welche zu befriedigenden Resultaten führten.

Es handelt sich hierbei um die Killerhofbrücke in Stalden auf der Strasse A212 Visp - Saas Grund. Bauherr war das Baudepartement des Kanton Wallis, Sektion Kantonsstrassen und Flussbau Oberwallis. Das Büro BIAG Bloetzer Pfammatter & Partner AG wurde beauftragt, die Bauarbeiten mit Schwingungsmessungen zu begleiten und konkrete Massnahmen zur Schadensbegrenzung aufzuzeigen.

Die 1959 erbaute Brücke wurde im Sommer / Herbst 1997 instandgesetzt, wobei teilweise erhebliche Schwingungseinwirkungen infolge Verkehrseinwirkung subjektiv festgestellt wurden. Der Bauablauf der Verstärkungsmassnahmen musste aus verkehrstechnischen Gründen so gewählt werden, dass die Brücke während den Bauarbeiten zumindest einspurig befahren werden konnte. Die Hauptproblematik, die sich in diesem Zusammenhang stellte, war den Einfluss der verkehrsinduzierten Erschütterungen auf die Betonarbeiten auf der Brücke herauszufinden und allfällige Massnahmen in die Wege zu leiten. Mit Hilfe der durchgeführten Schwingungsmessungen wurden daher nachfolgende Zielsetzungen angestrebt:

- Aussagen über kritische Schwinggeschwindigkeiten und -amplituden im Hinblick auf Betonierarbeiten
- Welches sind die günstigsten Betonierzeiten?
- Welche weitergehenden Massnahmen sind bei den Betonierarbeiten vorzusehen, um Schäden infolge der Schwingeinwirkungen zu minimieren?

Während der Zeitspanne vom 22.08. bis am 03.09.1997 wurden bei der Killerhofbrücke die Schwingungsmessungen durchgeführt, direkt vor Ort ausgewertet und die Ergebnisse und Massnahmenempfehlungen den Verantwortlichen der Bauleitung sowie der Bauunternehmung mitgeteilt.

2. Grundlagen der Schwingungsmessungen und -analyse

2.1. Erschütterungseinwirkungen auf frischen und jungen Beton

Die Auswirkungen der Erschütterungseinwirkungen auf frischen und jungen Beton ist die eigentliche zentrale Frage bei der vorliegenden Problematik. Das Verformungsverhalten von frischem Beton wird durch eine Vielzahl von Einflussgrößen wie der Betonzusammensetzung insbesondere vom Wassergehalt und vom W/Z-Faktor beeinflusst.

Werden diese, den inneren Zusammenhalt des frischen Betons bestimmenden Kräfte durch ausreichend grosse äussere Krafteinwirkungen, wie etwa durch Erschütterungen, überwunden, so wird die Fliessgrenze des frischen Betons überschritten und er verhält sich weitgehend wie eine Flüssigkeit. Bei sachgemäss zusammengesetzten und verdichteten, aber noch nicht erhärteten Betonen wird dieses Fliesen zu einer **Nachverdichtung** und damit in der Regel zu einer grösseren Dichtigkeit und höheren Festigkeit des Festbetons führen.

Mit zunehmender Zeit nimmt durch das beginnende Erhärten die Fähigkeit des Betons, durch Erschütterungen ins Fliesen zu geraten, mehr und mehr ab. Nach einem bestimmten anfänglichen Erhärten führen äussere Erschütterungen nicht mehr zu einem Fliesen, sondern bewirken Zug- und Scherbeanspruchungen im Beton. Werden dabei die Dehnfähigkeit und die zunächst sehr geringe Festigkeit des jungen Betons überschritten, so treten **Gefügelockerungen** und **Risse** auf, die eine verminderte Festigkeit zur Folge haben können. Die für den Beton kritische Phase ist überwunden, wenn im Verlauf der weiteren Erhärtung die Festigkeit ausreichend gross ist, um die erschütterungsbedingten Beanspruchungen ohne negative Folgen zu ertragen. Beginn und Ende des für die Einwirkung von Erschütterungen kritischen Zeitraums sind insbesondere von der verwendeten Zementart und Festigkeitsklasse, dem W/Z-Wert, der Frischbetonkonsistenz und der Betontemperatur beim Betonieren und während der Erhärtung abhängig.

2.2. Zulässige Schwingeinwirkungen

2.2.1. Allgemeines

Inwieweit welche Erschütterungsgrößen zu welchem Zeitpunkt im Alter des jungen Betons zu Schäden führen, ist nicht normiert, d.h. es liegen keine verbindlichen Grenzwerte vor. Die Forschung so u.a. die EMPA in Dübendorf befasst sich derzeit in Projekten mit der aufgeworfenen Problematik. Entsprechende Resultate liegen noch nicht vor. Es liegen einzig mehr oder weniger umfassende Literatur- und Laborauswertungen aus den Anfangszwanzigerjahren aus Deutschland vor. Die daraus hergeleiteten Bedingungen und Einflussgrößen werden noch heute bei der Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf jungen Beton zugrunde gelegt und sind nachfolgend zusammenfassend aufgeführt.

2.2.2. Einfluss von Art und Stärke der Erschütterungen

Bei Betonen üblicher Zusammensetzung und sachgerechter Herstellung und Verdichtung führen Erschütterungen mit **Schwinggeschwindigkeiten** um weniger als **20 mm/sec** unabhängig vom Zeitpunkt des Auftretens im allgemeinen nicht zu nachteiligen Folgen für die Festbetoneigenschaften. Diese Aussage ist durch die ausgewerteten Untersuchungen nur abgedeckt, solange die **Amplituden** der Erschütterungen etwa **0.7 mm** nicht überschreitet.

Treten im Einzelfall grössere Schwinggeschwindigkeiten während den Betonierarbeiten auf, so sind entweder Erhärtungsprüfungen mit dem vorgesehenen Beton und der entsprechenden Schwingbeanspruchung durchzuführen oder andere Massnahmen wie organisatorische oder materialtechnologische einzuleiten.

2.2.3. Einfluss von Zeitpunkt und Dauer der Erschütterungen

In den ersten Stunden nach dem Einbringen wird der Beton durch die Erschütterungen nachverdichtet, d.h. es treten keine Schäden auf, die Betonqualität wird im Gegenteil erhöht. Wie bereits unter 2.1. aufgeführt, treten ab einem kritischen Zeitpunkt beim jungen Beton durch Erschütterungen Gefügelockerungen und Risse auf. Diese kritische Phase lässt sich aufgrund der ausgewerteten Versuche auf einen Zeitraum von **etwa 3 bis 14 Stunden nach der Betonherstellung** eingrenzen. Danach sind die Festigkeitswerte des jungen Betons in der Regel genügend, um die dynamischen Einwirkungen schadlos zu überstehen.

3. Messeinrichtung

Massgeblich für die Beurteilung von Erschütterungen, welche auf bauliche Anlagen einwirken, ist die **Schwinggeschwindigkeit**, gemessen in mm/s. Das menschliche Empfinden ist überdies im Frequenzbereich von 5 bis 80 Hz proportional zur Schwinggeschwindigkeit. Für die durchgeführten Messungen wurden einerseits drei **Uniaxial**-Sensoren (Messung der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten) und andererseits ein **Triaxial**-Sensor (Geschwindigkeitsaufnehmer für alle drei Richtungen an einem bestimmten Punkt) eingesetzt. Mit den Triaxialmessungen konnte ergänzend die vektorielle Summe der einzelnen Schwinggeschwindigkeiten ermittelt werden. Die eingesetzten Geschwindigkeitssensoren haben einen effektiven Messbereich von 0.003 bis 114 mm/s. Die Datenauswertung erfolgte mit einem sehr umfangreichen und leistungsfähigen Signalverarbeitungsprogramm.

Für die Auswertung spielen nur diejenigen Ereignisse (events) eine Rolle, welche im Bereich oder über den unter Punkt 2.2.2. festgehaltenen Richtwerten liegen. In der Messeinrichtung konnte daher jeweils ein Empfindlichkeitswert (trigger level) eingegeben werden. Es wurden folglich nur diejenigen Ereignisse aufgezeichnet, welche über dem eingegebenen trigger level lagen.

4. Messresultate

4.1. Uniaxialmessungen

Während den nachfolgend aufgeführten Zeitspannen wurden Schwingungsmessungen bei den in den Beilagen bezeichneten Messpunkten durchgeführt.

<u>Messbeginn</u>			<u>Messende</u>	
• Freitag, 22.08.1997	15.36 Uhr	bis	• Samstag, 23.08.1997	08.34 Uhr
• Montag, 25.08.1997	08.23 Uhr	bis	• Montag 25.08.1997	11.10 Uhr
• Dienstag, 26.08.1997	18.13 Uhr	bis	• Mittwoch, 27.08.1997	07.56 Uhr
• Mittwoch, 27.08.1997	17.21 Uhr	bis	• Donnerstag, 28.08.1997	09.13 Uhr
• Donnerstag, 28.08.1997	16.25 Uhr	bis	• Freitag, 29.08.1997	13.16 Uhr
• Freitag, 29.08.1997	16.38 Uhr	bis	• Samstag, 30.08.1997	19.10 Uhr
• Dienstag, 02.09.1997	20.25 Uhr	bis	• Mittwoch, 03.09.1997	07.34 Uhr

Nachfolgend sollen an Hand von ausgewählten Einzelmessungen die wesentlichsten Erkenntnisse kurz besprochen werden:

- **Schwinggeschwindigkeiten**

Die Brücke wird durch die Überfahrt schwerer Fahrzeuge (vor allem Lastwagen) in Schwingungen versetzt, wobei die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten teilweise 2 bis 3-fach über dem empfohlenen Richtwert von 20 mm/s liegen. Die Messungen bestätigten, dass praktisch jede Überfahrt eines Lastwagens zur angesprochenen Überschreitung führte. Die grössten Werte wurden jeweils in Brückenmitte (Channel 3) gemessen. Vereinzelt wurde der Richtwert der Schwinggeschwindigkeit auch im Messpunkt Channel 2 überschritten, wobei die Absolutwerte jeweils kleiner waren als im Messpunkt Channel 3.

- **Amplituden**

Die gemessenen Amplituden der Deformationssignale sind ebenfalls um den Faktor 3-4 über dem festgelegten Richtwert von 0.7 mm.

- **Zeitpunkt der Erschütterungen**

Wie bereits angesprochen, führten vor allem die Lastwagenüberfahrten zu den Richtwertüberschreitungen. Damit kann auch die zeitliche Verteilung der Überschreitungen erklärt werden (siehe Beilagen). Während des Tages werden die Richtwerte relativ häufig mehr oder weniger regelmässig überschritten. Es konnte diesbezüglich keine eindeutige Phase ohne Überschreitungen festgestellt werden. Hingegen lassen die Überschreitungen der Richtwerte gegen Abend nach. Ab ca. 19.00 bis 20.00 Uhr fanden nur noch vereinzelt Überschreitungen statt. Während der Nacht konnte praktisch nie eine solche festgestellt werden. Am frühen Morgen ab 05.00 Uhr, wenn die ersten Busse die Brücke befahren, werden die Richtwerte wieder regelmässig überschritten. Es konnte daher eine klare Phase während der Nacht (ab ca. 20.00 bis gegen 05.00 Uhr) herauskristallisiert werden, während

welcher die Schwingungen des Bauwerks keinen negativen Einfluss auf den jungen Beton haben.

4.2. Triaxialmessungen

In Brückenmitte wurde ein Dreiweg-Sensor aufgestellt und während den folgend beschriebenen Zeitspannen Messungen durchgeführt:

<u>Messbeginn</u>			<u>Messende</u>	
• Dienstag, 26.08.1997	07.51 Uhr	bis	• Dienstag, 26.08.1997	14.34 Uhr
• Dienstag, 02.09.1997	07.34 Uhr	bis	• Dienstag, 02.09.1997	16.26 Uhr

Zusätzlich zu den Erkenntnissen der Uniaxial-Messungen (siehe 4.1.) lässt sich betreffend den Dreiwegmessungen folgendes aussagen:

- **Schwingungsverhalten in Querrichtung**

Die Killerhofbrücke schwingt infolge Verkehrseinwirkungen nebst in vertikaler auch relativ stark in Querrichtung. Die gemessenen Werte in Querrichtung sind ca. 3 bis 4 mal kleiner, bei Einzelereignissen durchaus nur die Hälfte kleiner, gegenüber denen in vertikaler Richtung.

5. Massnahmen

Das Geschehen während der Überfahrt eines schweren Fahrzeuges über eine Brücke wird von einer vielschichtigen Interaktion zwischen Fahrzeug und Brücke bestimmt. So ist beispielsweise das Eigenverhalten der Fahrzeuge in starkem Masse vom Anregungsspektrum (Spektrum der Fahrbahnebenenheiten und von der Fahrzeuggeschwindigkeit) abhängig. Die Interaktion zwischen Fahrzeug und Brücke wird ebenfalls durch die Aufhängung (Blattfedern oder Luftfedern) der schweren Fahrzeuge bestimmt. Im vorliegenden Fall beschränkte man sich folglich auf die qualitative Analyse der Messresultate.

Aufgrund der Messresultate konnte relativ rasch festgestellt werden, dass die verkehrstechnischen Erschütterungen auf der Killerhofbrücke zu Schwingungen führten, die teilweise massiv über den empfohlenen Richtwerten ($v < 20$ mm/s und $A < 0.7$ mm) lagen und somit eine Beeinträchtigung der vorgeschriebenen Betonqualität wahrscheinlich wurde. Die Messresultate zeigten aber auch deutlich, dass die die Richtwerte überschreitenden Einwirkungen durch die Überfahrt primär schwerer Fahrzeuge wie Lastwagen und Busse hervorgehoben wurden. Desweiteren liess sich über die Tagesperiode betrachtet eine Phase herauskristallisieren, in welcher keine oder nur wenige Richtwertüberschreitungen registriert wurden (ab 20.00 Uhr bis ca. 05.00 Uhr). Dies ist dadurch erklärbar, dass im Normalfall während der Nacht kein Schwerverkehr die Brücke passiert.

Die eingeleiteten Massnahmen stützten sich im wesentlichen auf die oben beschriebenen Erkenntnisse ab. Zusammen mit der Bauleitung, dem beauftragten Ingenieur sowie der Bauunternehmung wurde folgendes Massnahmenpaket in die Wege geleitet.

- Vor den Fahrbahnübergängen wurden die Schlaglöcher und die grösseren Belagsunebenheiten durch den Einbau von **Kaltbelag** ausgeglichen. Diese Massnahme wurde vor den eigentlichen Betonierarbeiten durchgeführt.
- Aufgrund der Messungen konnte relativ eindeutig eine Zeitphase herauskristallisiert werden, an welcher die empfohlenen Richtwerte nicht überschritten wurden. Für jungen Beton stellt die Zeit zwischen 3 bis 14 Stunden nach der Verarbeitung hinsichtlich Erschütterungseinwirkungen eine kritische Phase dar (siehe 2.3.3.). Aus diesem Grunde wurden die **Betonierzeiten** so angesetzt (ca. 17.00 Uhr), dass in der beschriebenen kritischen Zeitphase keine oder nur wenige Schwerverkehrereignisse stattfanden.
- Desweiteren wurde eine **betontechnologische** Massnahme vorgenommen. Um vor den Morgenstunden eine bereits ausreichende Betonqualität (sprich Betondruck- und -zugfestigkeit) zu haben, wurde dem Beton ein Hochleistungsverflüssiger mit erhärtungsbeschleunigender Wirkung zugemischt, welcher die Frühfestigkeit des Betons fördert. Es handelte sich hierbei jedoch nicht um einen Abbindebeschleuniger.
- Letztlich wurden die vorgängig als definitive Verstärkungsmassnahme eingebauten Stahlträger in Brückenquerrichtung satt untergestopft
- Die durch die Bauleitung angeordneten Massnahmen zur Betonnachbehandlung wurden wie geplant realisiert. Als weiterer Pluspunkt in diesem Zusammenhang gilt der Umstand, dass die Schalung der Brückenkonsolen nicht separat abgestützt und fundiert, sondern direkt am Brückenkörper befestigt wurde. Somit konnten zusätz-

liche Relativbewegungen zwischen Brückenkonstruktion und Schalung vermieden werden.

Auf weitergehende organisatorische Massnahmen beim Verkehr wie

- Geschwindigkeitsbeschränkungen oder
 - Lastwagenverbot ab einer bestimmten Tageszeit
- wurde verzichtet.

Mit den auf den Schwingungsmessungen abgestützten eingeleiteten Massnahmen konnten beim vorliegenden Objekte ohne nennenswerte Einschränkungen oder umfassende Zusatzaufwendungen Schäden infolge Verkehrserschütterungen vermieden werden.

Philipp Truffer, dipl. Bauing. ETH/SIA

c/o BIAG Bloetzer Pfammatter & Partner AG