

Betonieren unter Verkehr: Einschätzung der verkehrsinduzierten Schwingungen

Marian Ralbovsky¹⁾, Alois Vorwagner¹⁾, Thomas Kozakow²⁾, Michael Kleiser²⁾, Roman Geier³⁾

- 1) AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Wien, Österreich
- 2) ASFINAG BAU MANAGEMENT GMBH, Wien, Österreich
- 3) Schimetta Consult Ziviltechniker Ges.m.b.H, Wien, Österreich

1. Dynamische Interaktion bei Brückenüberfahrten

Dynamische Interaktion bei Brücken tritt immer dann auf, wenn die Bauwerke mit zeitlich veränderlichen Lasten beispielsweise bei Verkehrsüberfahrt oder Stoßbelastung beansprucht oder in ihren Resonanzfrequenzen bei periodischer Anregung (z.B. Achsabstände Eisenbahn) angeregt werden [1]. Bei Verkehrsüberfahrten von Brücken wirken zusätzlich zur statischen Belastung Trägheitskräfte, welche zusätzlich zur Gewichtskraft vom Tragwerk aufgenommen werden müssen. Bei detaillierten dynamischen Betrachtungen hat gerade die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche einen maßgeblichen Einfluss auf die entstehende dynamische Interaktion. Nguyen et al. [2] analysierten Daten aus dem Dauermonitoring der Wildbrücke und konnten dabei die Straßenraugigkeit sowie die Impulsbelastung beim Überfahren der Fahrbahnübergangskonstruktion als Hauptfaktoren identifizieren. Zhong et al. [3] untersuchten in einer numerischen Studie Brücken mit unterschiedlichen Spannweiten und Überfahrtsgeschwindigkeiten. Für einfeldrige Brücken konnte dabei ein größerer dynamischer Vergrößerungsfaktor identifiziert werden als bei mehrfeldrigen, welche auch stärker von der Überfahrtsgeschwindigkeit abhängig waren. Für den Ermüdungsnachweis im Eurocode EN 1991-2 wird im Anhang B zwischen verschiedenen Qualitätsstufen der Fahrbahnoberfläche unterschieden. Derzeit wird hier die dynamische Vergrößerung mit einem Schwingbeiwert vereinfachend mit $\phi = 1,2$ bei guter Straßenoberfläche und mit $\phi = 1,4$ bei schlechter Oberfläche unterschieden.

Die Frage der Schwingungseinwirkung in kritischen Bauzuständen wie bei Erhärtung von Materialien ist gerade im Bestandsbrückenbau eine entscheidende Frage, vor allem dann, wenn Bauabschnitte oder Verbreiterungen bei aufrechter Verkehrsführung ausgeführt werden müssen. In der Baudynamik hat sich die Schwinggeschwindigkeit oder Schwingschnelle als eine charakterisierende Größe vor allem im Erschütterungsschutz etabliert. Der Grund dafür ist das diese Größe am besten mit den inneren Verzerrungszuständen bei dynamischen Lasten korrespondiert. Der Effekt von Vibrationen auf erhärtenden Beton ist schon lange bekannt. In der Frühphase der Erhärtung wirken sich Schwingungen positiv auf die Materialverdichtung und somit auf die erzielbare Festigkeit aus und werden deshalb auch gezielt angewandt. Ab einem kritischen Aushärtungsgrad des Zementgefüges können aber intensive Schwingungen das Gefüge und damit die Verbindungen des Zementleims nachhaltig stören, womit die Betoneigenschaften wie Dichtheit oder Festigkeit abnehmen. Umfassend wurde der Effekt von Schwingungen in einer Studie von Bonzel and Schmidt [4] untersucht, und endete mit dem Resultat, dass harmonische Schwingschnellen unter 20 mm/s und kleiner Wegamplitude auch in der kritischen Erhärtungsphase zwischen Stunde 3 und 14 nach dem Anmischen keine bleibenden Schäden verursachen. Kürzlich durchgeführte Versuche mit harmonischen Anregungen bei 5 Hz, 20 Hz und 35 Hz in verschiedenen Aushärtestadien konnte bei Schwingschnellen von 20 mm/s ebenfalls bestätigen, dass die Festigkeit im Schnitt nur ca. 2-3% abgefallen ist, die Wassereindringung jedoch angestiegen ist [5].

2. Studie und Kalibration am konkreten Brückenobjekt

Auf der kürzesten, jedoch meistbefahrensten Autobahn Österreichs, der A23 Südost-Tangente fahren rund 145.000 Kraftfahrzeuge täglich. Die schlanke Brückenkonstruktion der Hochstraße Inzersdorf war aufgrund einiger konstruktiver Details mit wirtschaftlich sinnvollen Mitteln nicht mehr zu sanieren und wurde unter Aufrechterhaltung sämtlicher Fahrstreifen und Relationen komplett abgetragen und neu errichtet. Die Aufrechterhaltung des Verkehrs war eine der Grundbedingungen für den gesamten Bauablauf. Deshalb wurden, wie in Bild 1 ersichtlich, die Tragwerke in Etappen hergestellt und die Arbeitsfuge unter aufrechtem Verkehr geschlossen. Beim untersuchten Tragwerk (Bild 1) handelt es sich um eine Plattenbrücke mit einer Regelspannweite von 19,5 m und Plattenstärke von 90 cm. Ursprünglich war entlang der Arbeitsfuge der Brücke eine Unterstellung vorgesehen, welche die Verkehrsschwingungen zum Zeitpunkt des Zusammenschlusses der einzelnen Bauabschnitte minimieren sollte. Die entscheidende Frage war, ob die verkehrsinduzierten Schwingungen den gewählten Grenzwert von 20 mm/sec erreichen werden oder nicht, und ob die Unterstellung nicht überhaupt eingespart werden kann [7,8].

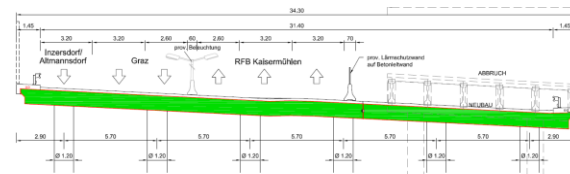


Bild 1: Übersicht des betrachteten Bauabschnittes (links) und Querschnitt des neuen Brückentragwerks (rechts). Der rechte Teil der Brücke wird nach dem Abbruch der Bestandsbrücke an die bereits befahrene Brücke angeschlossen.

Mittels Dauermessungen der Schwingungen über 7 Tagen, gezielten Verkehrsüberfahrten und Scan der Straßenoberfläche mit dem AIT- Messfahrzeug RoadSTAR wurde ein FEM Berechnungsmodell an die Messergebnisse kalibriert und zahlreiche Überfahrtsvarianten untersucht. Die Erkenntnisse waren erwartungsgemäß, dass die Durchbiegungen und Dehnungen des untersuchten Tragwerks hauptsächlich durch die Fahrzeugmasse beeinflusst werden, während die dynamischen Schwinggeschwindigkeiten hauptsächlich von Straßenprofiltyp, Profiltiefe, sowie von der Fahrtgeschwindigkeit abhängig sind. Eine Tragwerksunterstellung wirkt sich generell schwingungsmindernd aus, jedoch ist ihre Wirksamkeit stark vom Straßenprofil abhängig. Die Begrenzung der Fahrtgeschwindigkeit wirkt sich tendenziell positiv auf die Schwingungsminderung aus, jedoch ist auch hier das Straßenprofil maßgeblich, und der positive Effekt kann nicht in allen Fällen garantiert werden. Daher konnten hier die Gesetzmäßigkeiten betreffend Fahrtgeschwindigkeit und Tragwerksunterstellung nur grundsätzlich identifiziert werden, da die Ergebnisse stark zwischen verschiedenen Straßenprofilen variierten [8].

2. Parameterstudie und Abschätzungsformel der Schwinggeschwindigkeit

Auf den projektspezifischen Ergebnissen der A23 aufbauend wurde nun eine tiefgreifende Parameterstudie durchgeführt, um eine Einschätzung der verkehrsinduzierten Schwingungen bei ähnlichen Projekten schon in der Planungsphase zu ermöglichen. Zwei Brückengrundtypen wurden dabei betrachtet: die Platten- und die Plattenbalkenbrücke. Dynamische Interaktion wurde in Summe für 570.000 unterschiedliche Kombinationen der Brücken-, Fahrbahn- und Überfahrtsseigenschaften berechnet, um die Auswirkungen auf die Schwinggeschwindigkeit auszuwerten. Die Grundlage war der am AIT entwickelte parametrisierte FEM-Solver basierend auf Stabelementen, anhand dessen die Einzelüberfahrten eines 45t LKW Mehrkörpermodells (4 Achser) am Hochleistungsrechnersystem durchgeführt wurden. Die variierten Parameter können unterteilt werden in:

Überfahrtsparameter:

- Verschiedene Straßenprofilklassen und lokale Unstetigkeitsstellen
- Fahrtgeschwindigkeit: v_{car} (30 – 100 km/h)
- Spurführung: Brückenrand und Brückenmitte

Tragwerkparameterspezifische Parameter

- Spannweite L , Breite B
- Schlankheit als Verhältnis zur Tragwerkshöhe H : L/H
- Statisches System Einfeld / Mehrfeld
- Kreuzungswinkel 75° oder 90°
- Trägersteifigkeiten wie Trägerschlankheit, Anzahl, Abstände sowie Zustand (gerissen/ ungerissen)

Exemplarisch sind folgend Ergebnisse der maximal errechneten Geschwindigkeiten v_{max} aus den parametrisierten FEM - Berechnungen der Plattenbrücken dargestellt:

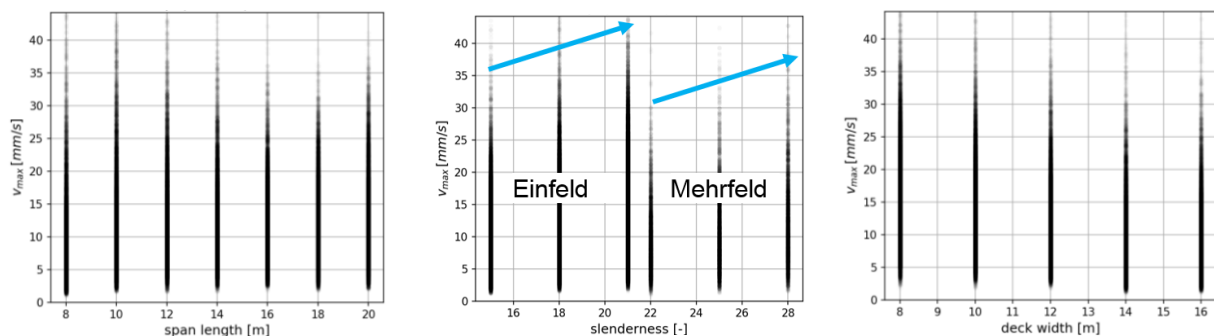


Bild 2: Punktwolke der Ergebnisse der Plattenbrücke v_{max} : Einfluss der Spannweite L (links), Schlankheit (mitte) und Brückenbreite (rechts).

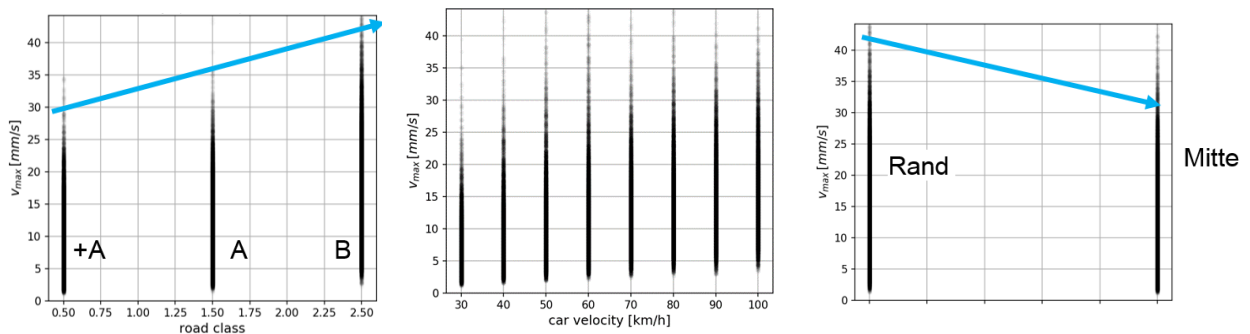


Bild 3: Plattenbrücke: Einfluss der Rauigkeit der Straßenoberfläche Klassen nach ISO 8606 (links), Fahrzeuggeschwindigkeit der Überfahrt (mitte) und Fahrzeugposition (rechts).

Zur Interpretation der Ergebnisse und Ermittlung von Abschätzungsformeln für künftige Baumaßnahmen wurden basierend auf dem FEM-Datensatz eine Polynomannäherung durch multivariable Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei wurden die Koeffizienten c_i für einfache Abschätzungsformel bestimmt, welche hier beispielsweise für die Plattenbrücke wie folgt angegeben werden können:

$$v_{max, assess} = k \cdot (c_0 + c_{1,L} \cdot L + c_{1,B} \cdot B + c_{1,v} \cdot v_{car} + c_{1,SL} \cdot SL + c_{jump} \cdot h_{jump} + c_{dep} \cdot h_{dep}) < v_{grenz}$$

Zur besseren Anpassung an die FEM-Ergebnisse wurde eine Unterteilung auf mehrere Gruppen durchgeführt, deren Einteilung vom statischen System (Ein-, Mehrfeld), Fahrbahnrauigkeit (Klassen nach ISO 8606) und Position der Überfahrt (Mitte oder Rand) abhängt. Für jede Gruppe wird ein Set an Koeffizienten c_i ermittelt, anhand dessen die maximale Schwinggeschwindigkeit $v_{max, assess}$ abgeschätzt werden kann. Ein Korrekturterm k ermöglicht generell eine bessere Anpassung der Abschätzungsformeln an die Berechnungsergebnisse.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Generelle Trends und Einflüsse sind aus dem FEM Datensatz prinzipiell erkennbar, jedoch stark von der genauen Überfahrtskonfiguration abhängig. Es wurde erkannt, dass die Brückenschiefe wenig Einfluss hat. Erwartungsgemäß sind Mehrfeldtragwerke weniger anfällig als Einfeldtragwerke, ebenso nehmen mit schlankeren Bauteilen die Schwingungen zu. Bei Plattenbrücken verringert sich mit zunehmender Plattenbreite die Schwingschnelle. Der Einfluss der Geschwindigkeit ist tendenziell gegeben. Die Verkehrsüberführung kann die Schwingungsbelastung verbessern, wenn das Tragwerk in der Mitte statt am Rand überfahren wird. Eine verbesserte Straßenrauigkeit, insbesondere in Spannweitenmitte, wirkt sich positiv auf die Schwingungsminderung aus. Abschätzungsformel mit vereinfachtem linearem Ansatz und Korrekturfaktor für die Streubreite ergeben eine Richtgröße für möglicherweise auftretende Schwingschnellen.

Diese Arbeit wurde mit finanzieller Unterstützung der ASFINAG Bau Management GmbH durchgeführt. Die Autoren möchten an dieser Stelle ihren Dank für die erfolgreiche Kooperation zum Ausdruck bringen.

Referenzen

- [1] Flesch, R.: Baudynamik praxisgerecht, Bauverlag, ISBN 3-7625-3072-6, 1997.
- [2] Nguyen, K., Freytag, B., Ralbovsky, M., Rio, O., 2015. Assessment of serviceability limit state of vibrations in the UHPFRC-Wild bridge through an updated FEM using vehicle-bridge interaction. Computers and Structures, vol. 156, p.29-41.
- [3] Zhong, H., Yang, M., Gao, Z.J., 2015. Dynamic responses of prestressed bridge and vehicle through bridge-vehicle interaction analysis. Engineering Structures, vol. 87, p. 116-125.
- [4] Bonzel, J., Schmidt, M., 1980. Einfluß von Erschütterungen auf frischen und jungen Beton. Beton ISSN: 0005-9846, vol. 30 Issue 9, p.333-337 & vol. 30 issue 10, p.372-378. In: Beton-Verlag, Düsseldorf.
- [6] Mähner, D., Basler, F. and Hesselink, J. (2019), Einfluss von Erschütterungen auf jungen Beton. Beton- und Stahlbetonbau, 114: 176-184. doi:10.1002/best.201800086
- [7] Kozakow, T.: Abbruch und Neubau unter vollem Verkehr- Hochstraße Inzersdorf und Neilreichbrücke. Brückenbau ISSN 1837-643X. 9. Jahrgang Ausgabe 1/02 2017, 17. Symposium Brückenbau in Leipzig, Februar 2017.
- [8] Ralbovsky M., Vorwagner A., Kozakow T., Geier R.: Einflüsse auf die Amplitude verkehrsinduzierter Schwingungen bei Arbeiten auf Bestandsbrücken. Im Tagungsband des 3. Brückenkolloquium Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken. ISBN/ISSN-Nummer: 978-3-943563-03-0. S: 499-505 Juni 2018.