

ÖBB RW 08.01.04: Dynamische Berechnungen von Eisenbahnbrücken

Dipl.-Ing. Zoran BRUSCHETINI-AMBRO (ÖBB-Infrastruktur AG),
Dipl.-Ing. Günther MAYRHOFER (KMP ZT-GmbH, Linz),
Dipl.-Ing. Christian STADLER (KMP ZT-GmbH, Linz)

Allgemeines

Die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit trägt zur Attraktivierung der Bahnverbindungen in Österreich durch Verkürzungen der Fahrzeiten und Erhöhung der Kapazität bei. Höhere Fahrgeschwindigkeiten bedeuten auch, dass die Brückentragwerke höheren Beanspruchungen ausgesetzt werden. Zur Ermittlung der Auswirkungen von Hochgeschwindigkeitsverkehr werden in Österreich seit über 20 Jahren dynamische Berechnungen von Eisenbahnbrücken durchgeführt.

Im Jahr 2011 wurde basierend auf dem damaligen Erfahrungstand von der ÖBB-Infrastruktur AG eine erste *Richtlinie zur dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken* veröffentlicht. 2022 wurden die erweiterten Erkenntnisse in einer neuen Ausgabe eingearbeitet und in die aktuelle Regelwerkstruktur der ÖBB-Infrastruktur AG übergeführt. Dabei wurden auch Doppelgleisigkeiten und Widersprüche mit den bestehenden Normen, allen voran der ÖNORM EN 1991-2 und der ÖNORM B 4008-2, bearbeitet und für die Anwendung ein einheitlicher Berechnungsstandard festgelegt.

Das RW 08.01.04 besteht aus einem Grunddokument und zwei Anhänge: Zugdefinitionen und Grenzkurven.

Erfordernis und Ausnahmen für dynamische Berechnungen

Grundsätzlich besteht die Notwendigkeit einer dynamischen Berechnung für alle Brückentragwerke über die Züge mit 120 km/h oder schneller fahren sollen. Dies betrifft sowohl neue Tragwerke als auch bestehende Tragwerke, wenn beispielsweise die Streckengeschwindigkeit erhöht werden soll.

Ein weiteres Anwendungsgebiet sind Untersuchungen zur Zulassung von neuen Zügen im Streckennetz. Dies umfasst sowohl Analysen des dynamischen Verhaltens von Eisenbahnbrücken bei Überfahrt von neuen Zügen als auch Untersuchungen für Fahrten zur Abnahme von Fahrzeugen.

In manchen Fällen kann generell auf dynamische Berechnungen verzichtet werden. Dies betrifft alle Streckenabschnitte mit Fahrgeschwindigkeit unter 120 km/h, Bauwerke die mehr als 1,50m überschüttet sind sowie überschüttete Gewölbebrücken mit Stützweiten bis 10,0 m. Weiters gilt der Nachweis der dynamischen Beanspruchungen als erfüllt für Tragwerke die zumindest die Anforderungen aus den Grenzkurven in Anhang 2 (Grenzkurven) erfüllen sowie für Rahmenbauwerke bis 3,0m lichte Weite, wenn diese ausreichend starke Wände und Decken aufweisen.

Der nationale Anhang zur ÖNORM EN 1991-2 die ÖNORM B 1991-2 enthält keine weiteren Ausnahmen, es wird darin nur auf RW 08.01.04 verwiesen. Für Bestandstragwerke enthält ÖNORM B 4008-2 noch weitere Ausnahmen.

Modellierung

Für dynamische Berechnungen sind Rechenmodelle erforderlich, die über den Detaillierungsgrad für statische Berechnungen hinausgehen. Zusätzlich zur Modellierung der korrekten Steifigkeiten ist auch auf eine realistische Verteilung der schwingenden Massen zu achten. Eine Aufteilung der Wirkungen Längs- und Querrichtung in unterschiedliche Modelle ist nicht möglich, daher ist immer auch die

Quertragwirkung im Modell zu berücksichtigen. Schwingungen einer Fahrbahnplatte können durchaus auch bemessungsrelevant sein.

Bei der Modellierung für dynamische Berechnungen gibt keine eindeutige „sichere Seite“, so liefert zum Beispiel der Ansatz einer zu großen Steifigkeit genauso falsche Ergebnisse, wie der Ansatz einer zu geringen Steifigkeit. Für kurzzeitige Belastungen reagieren Böden üblicherweise steifer, das darf in der dynamischen Modellierung berücksichtigt werden und hat meist einen günstigen Einfluss auf die Ergebnisse.

Änderungen in der Ausgabe 2022

Masse Schotterbett

Die Masse des Tragwerks und der Brückenausrüstung, sowie des Gleises und Schotterbettes haben einen günstigen Einfluss auf die Beschleunigungen des Brückendecks zufolge von Zugsüberfahrten. Die Begrenzung der Beschleunigungen ist auch meist das relevante Kriterium.

Messungen der ÖBB-Infrastruktur AG zeigen, dass die Dichte des Schotterbetts zwischen 1500 und 1700 kg/m³ liegt. Dabei gilt der niedrigere Wert für neu eingebauten Schotter und der höhere Wert für gebrauchten Schotter am Ende seiner Nutzungsdauer. Um die günstige Wirkung der Masse nicht zu überschätzen, wurde die Festlegung von 2000 kg/m³ (wie in ÖNORM B 1991-2 angegeben) auf 1600 kg/m³ reduziert. Eine Variation der Dichte ist nicht erforderlich, weil die Schwankungsbreite vergleichsweise gering ist.

Die Folge dieser Änderung ist, dass die Beschleunigungswerte steigen. Dies tritt aber erst bei höherer Resonanzgeschwindigkeit auf. Daher kann es sein, dass eine angeregte Frequenz nicht mehr im betrachteten Geschwindigkeitsbereich liegt.

Zusatzdämpfung aus Wagenmaterial

Für Spannweiten unter 30 m gibt es in der ÖNORM EN 1991-2 eine Zusatzdämpfung, welche die dynamischen Auswirkungen der Interaktion von Fahrzeug- und Brückenmassen abdeckt. Untersuchungen der TU Wien haben gezeigt, dass diese Auswirkungen stark vom eingesetzten Wagenmaterial abhängen und für manche Züge praktisch nicht vorhanden sind. Der Ansatz kann daher zu unsicheren Ergebnissen führen. Auf europäischer Ebene wird diese Zusatzdämpfung in der nächsten Ausgabe der Eurocodes auch nicht mehr enthalten sein.

An der TU Wien wurden für ausgewählte Züge umfangreiche Untersuchungen mit Mehrkörpermodellen (detailed interaction model, DIM) durchgeführt und mit Berechnungen mit bewegten Lasten (moving load model, MLM) verglichen. Dabei könnten für die häufig relevanten Betriebszüge der RailJet-Serie Zusatzdämpfungen ermittelt werden. In Abhängigkeit vom Tragwerkstyp Beton oder Stahl und von der Grundfrequenz des Tragwerks kann aus einem Diagramm eine zugsabhängige Zusatzdämpfung abgelesen werden.

Die Folge einer reduzierten Dämpfung ist, dass die Beschleunigungswerte im Bereich der Resonanzgeschwindigkeit steigen. Für höhere Dämpfung reduzieren sich die Beschleunigungswerte.

Entsprechend den Erkenntnissen aus diesen Untersuchungen wurde auch die früher für größere Stützweiten angesetzte mitschwingende Masse aus einem überfahrenden Zug aus dem Regelwerk entfernt. Die Auswirkungen sind wie bei der Masse der Schotterbetts beschrieben.

In diesem Bereich werden die Forschungen aktuell weiter betrieben, um auch für neue Züge, zum Beispiel neuen Garnituren von RailJet Day&Night, diese Zusatzdämpfung ansetzen zu können.

Erhöhte Dämpfung für Rahmentragwerke

Höhere Dämpfungen bewirken geringere Beschleunigungen. Aus Messreihen an Rahmenbauwerken wurden festgestellt, dass die gemessene Dämpfungswerte immer höher sind als die normgemäßen Werte. Dieser Effekt ist für kurze Stützweiten am größten. Daher wurde eine, auf der sicheren Seite liegende, erhöhte Grunddämpfung für Rahmentragwerke in das Regelwerk aufgenommen. Diese erhöhten Dämpfungswerte können daher auch für die Berechnung von Neubauten berücksichtigt werden.

Leider ist dieser Effekt nur für Biegeeigenformen, bei denen die Hinterfüllung dynamisch aktiviert wird, ausreichend gut abgesichert. Daher dürfen diese Dämpfungswerte nur für Biegeeigenformen 1. Ordnung angewendet werden. Daraus ergeben sich zwei Einschränkungen. Erstens können diese Dämpfungswerte nur in Berechnungsverfahren angewendet werden, die dies unterstützen (z.B. Modale Analyse, aber nicht Zeitschrittintegration). Zweites kann es bei schiefen Rahmen sein, dass es keine reine Biegeformen 1. Ordnung auftreten. In diesen Fällen darf die erhöhte Dämpfung ebenfalls nicht angesetzt werden.

Änderungen in der Ausgabe 2023

Aktuell ist eine Überarbeitung von RW 08.01.04 in Ausarbeitung und soll Ende Sommer / Anfang Herbst 2023 veröffentlicht werden. Darin werden auch neue Züge und aktualisierte Grenzkurven enthalten sein.

Ansatz der vertikalen Bettung

Modelle mit weichen Bettungen zeigen oft Eigenschwingformen, bei denen das ganze Tragwerk oder eine ganze Unterbauachse schwingt. Diese Schwingformen werden Starrkörperschwingungen genannt und treten in der Realität nicht auf, weil sie durch Energiedissipation im Boden gedämpft werden.

Wir haben dazu detaillierte Untersuchungen angestellt und dabei unterschiedliche Bodensteifigkeiten, Dämpfungswerte und Stützweiten im Hinblick auf die errechneten Überbaubeschleunigungen verglichen. Ausführliche Zeitschrittrechnungen haben gezeigt, dass der Ansatz von starrer Bettung (ohne Strahlungsdämpfung) im Vergleich mit weichen Bettungen unter Berücksichtigung der Strahlungsdämpfung zumindest gleich große Beschleunigungsergebnisse liefert.

Daher kann, auch wenn für dynamische Einwirkungen keine genaueren Bodenkennwerte vorliegen, eine in vertikaler Richtung starre Bettung angenommen werden. Dies vereinfacht die dynamischen Berechnungen und liefert vor allem bei kurzen Stützweiten realistischere Berechnungsergebnisse. Bei großen Stützweiten sind die Ergebnisse von Tragwerksschwingungen dominiert und daher der Einfluss aus der Bodensteifigkeit von untergeordneter Bedeutung.

Übergangselemente

Insbesondere bei direkter Zeitintegration treten rechnerisch Stoßeffekte am Beginn und Ende einer Überfahrt auf. Diese können bei kurzen Stützweiten auch relevant für das Berechnungsergebnis sein. Künftig ist es daher zulässig, Übergangselemente zwischen freier Strecke und Tragwerk zu verwenden, welche die Last auf 1,20 m verteilen und somit eine kontinuierliche Lastaufbringung bzw. Lastentfernung sicherstellen. Diese Elemente dürfen keinen Einfluss auf die Eigenfrequenzen und Eigenformen des Tragwerks haben, Daher sind diese masselos zu modellieren und gelenkig an das Tragwerk anzuschließen. Details dazu siehe künftige Fassung der RW 08.01.04.

Neue Züge

Die Definitionen der Züge sind in Anhang 1 beschrieben. Das sind alle bisherigen Züge wie HSLM-A und HSLM-B sowie einige Betriebszüge. Diese wurden bereits 2022 um 7 neue Zugskonfigurationen ergänzt. Für 2023 sind 10 weitere Zugskonfigurationen vorgesehen.

Grenzkurven

Um für übliche Tragwerkstypen nicht in jedem Fall eine dynamische Berechnung durchführen zu müssen wurden Grenzkurven ermittelt und die erste Ausgabe bereit 2008 veröffentlicht, damals als Teil der „Planungsgrundsätze“, der später als Anhang 1 von RW 08.01 in das Regelwerksschema aufgenommen wurde. Bei Einhaltung der Kriterien der Grenzkurven ist keine dynamische Berechnung erforderlich.

Mit der Überarbeitung der RW 08.01.04 deckten die bisherigen Grenzkurven die aktuellen Anforderungen nicht mehr ab. Neue Züge, geringere Schottermasse und die Änderung der Zusatzdämpfung machen neue Grenzkurven notwendig, weshalb die bisherigen Grenzkurven zurückgezogen wurden.

Im ersten Schritt werden Rahmentragwerke ausgewertet. Berücksichtigt werden dabei alle neuen Züge, die neuen Bodenansätze, sowie die Übergangselemente. In den letztgültigen Berechnungen werden 2280 unterschiedliche Rahmen (2 Querschnitte, 2 Höhen, 26 Weiten, mehrere Schlankheiten) untersucht und über 18 Mio. Zugüberfahrten ausgewertet, dabei sind Voruntersuchungen nicht mitgezählt.

Die meisten Änderungen (neue Züge, Reduktion der Schottermasse, Entfall der globalen Zusatzdämpfung und der Zugsmasse) bewirken höhere Beschleunigungen des Tragwerks und damit größere Tragwerksstärken, um die Grenzwerte einzuhalten: Günstig zeigen sich die Effekte aus der zugabhängigen Dämpfung für Railjet-Konfigurationen und die erhöhte Dämpfung für Rahmen.

Um unter diesen Randbedingungen wirtschaftlich und nachhaltige Tragwerke mit den Grenzkurven abdecken zu können, wurde entschieden, dass im Gegensatz zu früher nur zweigleisige Tragwerk untersucht werden. Diese weisen aufgrund der größeren Tragwerksmasse geringere Beschleunigungen auf und erlauben damit größere Schlankheiten in dynamischer Hinsicht.

Die neuen Grenzkurven werden folgende Rahmentragwerke abdecken:

- von 3,0 m bis 15,0 m lichte Weite
- Schlankheit bis 25
- zweigleisige Tragwerke
- zwei Regelquerschnitte:
 - RQ1: bis 160 km/h Streckengeschwindigkeit (120 km/h und 160 km/h)
 - RQ2: bis 250 km/h Streckengeschwindigkeit (160 km/h, 200 km/h und 250 km/h)
- Neubauten und Bestandstragwerke
- offene und geschlossene Rahmen
- gerade Tragwerke und Tragwerke mit geringer Schiefe

Grenzkurven für Platten- und WIB-Tragwerke sind in Planung und werden folgen.

Bestandstragwerke - Messungen

Bei Bestandstragwerken ist auch die Messung von Systemparametern möglich. Diese ermöglicht in vielen Fällen, bei denen sich mit Normansätzen rechnerisch kritische Ergebnisse gezeigt haben, dass die Nachweise erfüllt trotzdem werden können.

Eine Messung braucht immer auch eine Berechnung, um die Messung gut vorbereiten zu können und die relevanten Messwerte auswählen zu können. Daher dieser Ablauf:

- Grundrechnung:
Dynamischer Berechnung mit Materialkennwerten aus Regelwerken, aber mit einem erhöhten Grenzwert von $6,0 \text{ m/s}^2$ für die zulässige Beschleunigung.
- Messung:
Details dazu in RW 08.01.05 bzw. im anschließenden Vortrag.
- Adaptionsrechnung: Berechnung unter Verwendung der Messwerte. Vor allem eine höhere Dämpfung reduziert die Beschleunigungen am Tragwerk deutlich.

Zusammenfassung

RW 08.01.04 ist ein Regelwerk der ÖBB-Infrastruktur. Es ist inhaltlich gut abgestimmt mit den aktuellen Normen, speziell mit Eurocode 1 (ÖNORM EN 1991-2) und der Norm für Nachrechnungen ÖNORM B 4008-2.

Es gibt eine klare Schnittstelle zum Regelwerk für dynamische Messungen, RW 08.01.05

Der Anhang enthält alle aktuellen Betriebszüge, es sind keine weiteren Dokumente zum Nachschlagen erforderlich.

Neu sind u.a. die geringere Schottermasse, die geänderte Zusatzdämpfung, die Ergänzungen für Rahmen, neue Erkenntnisse zu den Bodenansätzen.

Neue Grenzkurven sind in Ausarbeitung.