

Erfahrungen über die ganzheitliche Betrachtung zum Fahrwegverhalten unter Hochgeschwindigkeitsverkehr

Experiences with the Comprehensive Examination of the Track-Behaviour under High-Speed Railway Traffic

Prof. Dr.-Ing, Kempfert, Hans-Georg – *Universität Kassel, Kassel, Deutschland*
Dipl.-Ing. Stadel, Michael, *Kempfert + Partner Geotechnik, Konstanz, Deutschland*
Dr.-Ing. Raithel, Marc, *Kempfert + Partner Geotechnik, Würzburg, Deutschland*

ZUSAMMENFASSUNG: Die Neubaustrecken Köln-Rhein/Main und Nürnberg-Ingolstadt der Deutschen Bahn AG werden vollständig mit der Oberbaukonstruktion Feste Fahrbahn geplant und hergestellt. Zur Aufrechterhaltung der langfristigen Gebrauchstauglichkeit und Verfügbarkeit des Fahrweges unter HG-Verkehr wurden die Erd- und Kunstbauwerke so geplant und hergestellt, dass die geringen zulässigen Verformungen der FF nicht überschritten werden. Um dies gewährleisten zu können, wurden ganzheitliche Betrachtungen zum Verhalten der Fahrwege unter HG-Verkehr (GBF) durchgeführt. Es werden über die bei der Bearbeitung der GBF gesammelten praktischen Erfahrungen berichtet.

ABSTRACT: The new high-speed railways from Köln to Frankfurt (Airport) and from Nürnberg to Ingolstadt of the Deutsche Bahn AG were planned and constructed as concrete tracks. To guarantee the serviceability and the functional safety of the railroad driveway under high speed traffic, the earth structures and the buildings (such as bridges) are planned and constructed in view of the permissible deformations of the slab track. Therefore a comprehensive examination of the track-behaviour under high-speed railway traffic (GBF) was carried out. In this paper the experiences by the practical treatment of this examination were reported.

1 Einleitung

Die Neubaustrecken (NBS) Köln-Rhein/Main und Nürnberg-Ingolstadt der Deutschen Bahn AG wurden bzw. werden als Steckenkategorie P 300 (Hochgeschwindigkeitsverkehr mit 300 km/h) vollständig mit der Oberbaukonstruktion Feste Fahrbahn (FF) Bauart *RHEDA* geplant und hergestellt.

Nach dem technischen Regelwerk der DB AG sind zur Aufrechterhaltung einer langfristigen Gebrauchstauglichkeit und Verfügbarkeit des Fahrweges – bestehend aus Oberbau, Unterbau und Untergrund – unter HG-Verkehr die Erd- und Kunstbauwerke einer Strecke so zu planen und herzustellen, dass die geringen zulässigen Verformungen der FF nicht überschritten werden.

Um die Anforderungen des technischen Regelwerks gewährleisten zu können, müssen die Verformungen des Unterbaus und Untergrunds der einzelnen Erd- und Kunstbauwerke entlang des Fahrweges hinsichtlich Größe und zeitlichem Verlauf für maßgebende Zeitpunkte rechnerisch bestimmt, mit den während dem Bau des Fahrweges gemessenen tatsächlichen Verformungen verglichen und deren Verträglichkeit für die FF vor dem Einbau der FF nachgewiesen werden.

Diese Art des Nachweises wird auch als *Ganzheitliche Betrachtung zum Verhalten des Fahrweges unter HG-Verkehr* (GBF) bezeichnet, wobei die GBF selbstverständlich auch den Nachweis für den fertigen Fahrweg unter Betrieb umfasst.

Der Beitrag berichtet über die bei der Bearbeitung der GBF für die Neubaustrecken Köln-Rhein/Main Los A und Nürnberg-Ingolstadt Los Nord gesammelten praktischen Erfahrungen.

2 Verformungsberechnungen

2.1 Erdbauwerke

In der ersten Stufe der GBF wurden für alle Erdbauwerke – ausgenommen Einschnitte und Geländegleichlagen – im Rahmen der Ausführungsplanung die Untergrund- und Eigensetzungen bestimmt. Die Untergrundsetzungen wurden mit Hilfe von dreidimensionalen Setzungsrechnungen über jeweils die vollständige Länge eines Erdbauwerks abgeschätzt. Im Bereich von Hinterfüllungen zu Brücken wurden die Untergrundsetzungen unter Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Erd- und Kunstbauwerk bestimmt (Gesamtbetrachtung).

Die Setzungen der Erdbauwerke und Bauwerksübergänge wurden nach Größe und zeitlichem Verlauf, ggf. unter Berücksichtigung von Maßnahmen zur Ertüchtigung des Untergrunds, abgeschätzt. Es wurden folgende Setzungsanteile unterschieden:

- Setzungen des Untergrunds s_U infolge Eigenlast des Erdkörpers und des Oberbaus.
- Setzungen des Erdkörpers s_E infolge Eigenlast und Eigenlast des Oberbaus.
- Setzungen der oberen Schichten des Erdkörpers (ungebundene Tragschichten) s_V infolge dynamischer Lasteinwirkungen aus Verkehr.

2.2 Kunstbauwerke

Die Setzungen von Brücken, Tunneln und Trögen wurden ebenfalls im Rahmen der Ausführungsplanung bestimmt. Weiterhin wurden die für die verformungsrelevanten Bauteile der Kunstbauwerke wie z. B. die vertikalen Verformungen von Brückenüberbauten und die Endtangentialdrehwinkel der Überbauten infolge Verkehrslast und Langzeitverformungen (Kriechen und Schwinden) ermittelt.

3 Verformungsbeobachtungen

Zur Überprüfung des tatsächlichen Baugrund- und Baustoffverhaltens der Bauwerke wurden in der zweiten Stufe der GBF an den entstehenden und fertigen Bauwerken Verformungsbeobachtungen durchgeführt.

Der Regelabstand der Messquerschnitte für Erdbauwerke wurde mit 100 m gewählt. Bei setzungsgefährdeten Dämmen wurde der Abstand bis auf 20 m verringert. Im Bereich von Übergängen zu Kunstbauwerken wurde der Abstand generell mit 20 m festgelegt. In Einschnitten und Geländegleichlagen wurden Messpunkte nur eingerichtet, sofern die Gradienten mit Grenzparametern für das Streckenlängsgefälle (40 ‰) und den Ausrundungsradius (kleiner 36.000 m) trassiert wurde. Für Brücken wurde in jedem Auflagerpunkt ein Messquerschnitt eingerichtet. Für Tunnel und Tröge wurde der Abstand der Messquerschnitte je nach Länge des Bauwerks und Geologie zwischen 50 und 200 m gewählt.

Die Messquerschnitte für die Erdbauwerke wurden mit hydraulischen Setzungsaufnehmern in der Dammaufstandsfläche und mit geodätischen Messpunkten auf dem Planum bzw. Erdplanum bestückt. Die Messquerschnitte für die Kunstbauwerke wurden ausschließlich mit geodätischen Messpunkten bestückt. Die Messpunkte wurden für die Erdbauwerke in der Achse

des Fahrweges und für die Kunstbauwerke an den Eckpunkten der Gründungen sowie auf den Überbauten von Brücken gesetzt um auch die Größe möglicher Verkantungen der Gründungen und die Durchbiegungen der Überbauten bestimmen zu können. Nach der Herstellung des Betontroges der FF auf den Erdbauwerken wurden die Messpunkte vom Erdplanum auf die Trogwangen versetzt.

Die geodätischen Messungen erfolgten mit einer Genauigkeit für die Höhe von etwa ± 1 bis 2 mm. Die erzielbare Genauigkeit der Höhenmessungen mit den hydraulischen Setzungsaufnehmern betrug aufgrund des Messverfahrens nur etwa ± 1 bis 2 cm, was jedoch ausreichend war, da diese Messungen nur bei setzungsgefährdeten Dämmen durchgeführt wurden und ausschließlich Erkenntnisse über die Dauer der Untergrundsetzungen liefern sollten.

Die Zeitpunkte für die einzelnen Höhenbestimmungen der Messpunkte wurden dem Bauablauf und dem Verlauf der Verformungen angepasst. In der Regel wurden die Messpunkte in Abständen zwischen etwa 2 Wochen und einem Monat eingemessen. Sämtliche Setzungsbeobachtungen wurden in einer Datenbank verwaltet und für jeden Messpunkt als Zeit-Setzungs-Linie dargestellt.

4 Verformungsanforderungen

Die nach Fertigstellung der FF, d. h. nach Einbau des Füllbetons zwischen den Schwellen, eintretenden Gesamt-Restsetzungen s_R bei Erdbauwerken dürfen nicht zu Gleislageveränderungen führen, die die Sicherheit des Eisenbahnbetriebes gefährden oder die Streckenverfügbarkeit beeinträchtigen können. Aufgrund der systembedingt begrenzten Ausgleichsmöglichkeit von vertikalen Verformungen in der Schienenbefestigung (Höhenkorrektur) sieht (1) vor, dass maximale Höhenkorrekturmaß nach Einbau der FF (z. B. 20 mm bei der Bauart *RHEDA*) abzüglich 5 mm, die für den Ausgleich von Setzungen aus Verkehrsbelastung vorzuhalten sind, nicht zu überschreiten. Bei Erdbauwerken mit gleichmäßigem Setzungsverhalten über Längen von mehr als 20 m sind Restsetzungen bis zum 2fachen des reduzierten Korrekturmaßes zulässig (z. B. 15 mm bei der Bauart *RHEDA*).

In Ausnahmefällen dürfen Setzungsmulden mit einer maximalen Restsetzung von bis zu 6 cm zugelassen werden, wenn diese durch Ausrundung der Gradienten nach der fahrdynamischen Bedingung (Komfortkriterium)

$$R_a \geq 0,4 \cdot V_e^2 \quad (1)$$

mit R_a als Ausrundungsradius in m und V_e als Entwurfsgeschwindigkeit in km/h ausgeglichen werden können. Bei einer Entwurfsgeschwindigkeit von 300 km/h muß der Ausrundungsradius damit mindestens 36.000 m betragen.

An die Übergänge zwischen Erd- und Kunstbauwerken werden folgende Verformungsanforderungen gestellt:

- Innerhalb eines Abstands von 20 m vom Kunstbauwerk dürfen die Setzungsunterschiede aus Restsetzungen gegenüber den Setzungen des Kunstbauwerks 3 cm sowie einen bezogenen Setzungsunterschied von 1/500 nicht überschreiten.
- Am Übergang vom Kunstbauwerk dürfen keine Restsetzungen auftreten, die zu einer Überbeanspruchung der FF bzw. von Übergangskonstruktionen führen, weshalb Setzungsunterschiede (Setzungssprung) am unmittelbaren Übergang einen Wert von 5 mm nicht überschreiten dürfen.

Interessant ist hierbei, dass sich aus den Verformungsanforderungen an Übergänge über die Beziehung nach (3)

$$\Delta s = \frac{\Delta l^2}{4 \cdot R_a} \quad (2)$$

nur ein Ausrundungsradius von 3.333 m ermittelt. Dies steht deutlich im Gegensatz zu den Anforderungen für Erdbauwerke und widerspricht dem Grundsatz eines stetigen Fahrweges. Ähnliche Ausrundungsradien ergeben sich auch nach bodenmechanischen Verformungsbetrachtungen aus Modellversuchen nach (4).

Als zulässige vertikale Verformungen von Brückenüberbauten infolge Verkehrslast sind die Grenzwerte nach (2) einzuhalten. Zusätzlich ist nach (1) ein Verformungsnachweis zu führen, bei dem der Anteil aus Langzeitverformungen (Kriechen und Schwinden) berücksichtigt wird. Weiterhin sind bei der FF die zulässigen Endtangentialdrehwinkel nach (1) infolge Verkehrslast und Langzeitverformungen einzuhalten.

5 Vergleich zwischen Berechnung und Beobachtung

In der dritten Stufe der GBF wurden als Grundlage im jeweils betrachteten Streckenabschnitt die durchgeführten Verformungsmessungen zusammenfassend dargestellt und im Hinblick auf die nach Einbau der FF zu erwartenden Gesamt-Restsetzungen ausgewertet und beurteilt.

Bei der Prognose der Restsetzungen ($s_{U,R} + s_{E,R}$) nach Einbau FF wurden Setzungen infolge Verkehrsbelastung nicht betrachtet, da diese direkt durch die Reduzierung der Regulierungsmöglichkeit in der Schienenbefestigung von 20 auf 15 mm berücksichtigt wurden.

In der Regel wurde hierbei auf eine formalisierte Prognose auf mathematischer Grundlage verzichtet, sondern es wurde auf eine ingenieurmäßige Abschätzung des weiteren Setzungsverlaufes zurückgegriffen. In Bild 1 ist ein gemessener Setzungsverlauf exemplarisch dargestellt. Die ingenieurmäßige Abschätzung der Restsetzung wurde mit 0 bis 5 mm vorgenommen.

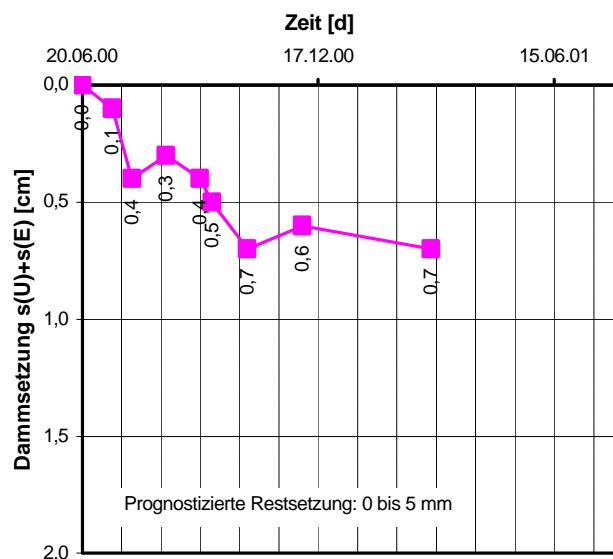


Bild 1: Gemessene Zeit-Setzungs-Linie

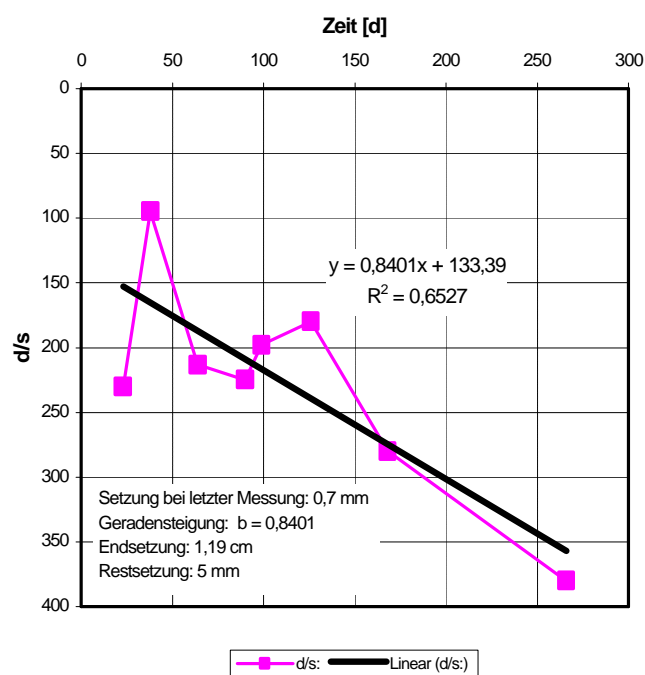


Bild 2: Linearisierung der Zeit-Setzungs-Linie

Zwar wurden für die maßgebenden Messpunkt auch Setzungsprognosen mittels des bekannten Verfahrens nach (5) durchgeführt, jedoch wurden überwiegend nur geringe Korrelationskoeffizienten bei der Linearisierung der Zeit-Setzungs-Linie erhalten.

In Bild 2 ist die Auswertung nach (5) dargestellt. Zwar werden hierbei auch Restsetzungen von 5 mm prognostiziert, jedoch ist bei dem vorliegenden geringen Setzungsbeträgen die Gültigkeit dieser Prognose generell in Frage gestellt. Dies hat z. B. zur Folge daß schon bei der Erhöhung des letzten Messwertes um nur 2 mm (entspricht der Messgenauigkeit) schon mehr als doppelt so hohe Restsetzungen von 12 mm prognostiziert werden.

Überwiegend wurden bei der formal mathematischen Analyse noch deutlich geringere Korrelationskoeffizienten ermittelt. Teilweise konnte das Verfahren nicht mehr verwendet werden, da keine Linearisierung der Zeit-Setzungs-Linie mehr möglich war. Die Anwendung von formal mathematischen Verfahren zur Restsetzungsprognose ist somit nur noch eingeschränkt möglich, da die erreichbare Messgenauigkeiten (± 2 mm) in Bezug auf sehr hohen Anforderungen hinsichtlich der Größe der zulässigen Restsetzung (15 mm) zu gering ist. Die Reduktion auf eine formal mathematische Vorgehensweise wird somit der Komplexität und Problematik der Aufgabe einer ganzheitlichen Betrachtung nicht gerecht.

Abschließend erfolgt anhand der nach den Verformungsmessungen zu erwartenden Gesamt-Restsetzungen nach Einbau der FF die Bewertung und Einteilung des betrachteten Streckenabschnitts in Bereiche. Für die Unterteilung gelten folgende Definitionen:

a) Die Gesamt-Restsetzungen sind unkritisch. Die Gesamt-Restsetzungen nach Einbau der FF sind mit hoher Wahrscheinlichkeit unkritisch ($s_{U,R} + s_{E,R} \rightarrow 0$ bzw. bei Übergängen $\Delta s_{U,R} + \Delta s_{E,R} \rightarrow 0$), d. h. im Bereich der freien Strecke werden die zulässigen Regulierungsmöglichkeiten in der Schienenbefestigung von 15 mm und in den Übergängen vom Erdbauwerk zum Kunstbauwerk die zulässigen Verformungen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht überschritten.

b) Die Gesamt-Restsetzungen sind wahrscheinlich unkritisch. Die Gesamt-Restsetzungen nach Einbau der FF sind wahrscheinlich unkritisch ($s_{U,R} + s_{E,R} \leq 15$ mm bzw. bei Übergängen $\Delta s_{U,R} + \Delta s_{E,R} \leq 25$ mm), d. h. die zulässigen Regulierungsmöglichkeiten in der Schienenbefestigung und die zulässigen Verfor-

mungen werden wahrscheinlich nicht überschritten.

c) Die Gesamt-Restsetzungen sind kritisch. Die Gesamt-Restsetzungen nach Einbau der FF sind mit hoher Wahrscheinlichkeit kritisch ($s_{U,R} + s_{E,R} > 15$ mm bzw. bei Übergängen $\Delta s_{U,R} + \Delta s_{E,R} > 25$ mm), d. h. die zulässigen Regulierungsmöglichkeiten in der Schienenbefestigung und die zulässigen Verformungen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit überschritten.

Aufgrund dieser Unterteilung erfolgte dann die Festlegung der Bereiche für die Freigabe zum Einbau der FF.

6 Anforderungen an die Freigabe zum Einbau der FF

Die Deutschen Bahn AG forderte als Voraussetzung für die Freigabe zum Einbau der FF, dass die nach der Abnahme (Inbetriebnahme) des Fahrweges noch eintretenden Restsetzungen durch die zulässige Höhenkorrektur in der Schienenbefestigung (reduziertes Korrekturmaß) ausgeglichen werden können.

Unter Zugrundelegung dieser Forderung erfolgte die Freigabe zum Einbau der FF in den unkritischen und i.d.R. in den wahrscheinlich unkritischen Bereichen.

Sofern die für die FF zulässigen Verformungen nicht eingehalten werden könnten, wurden bautechnische und/oder bautechnologische Gegenmaßnahmen erforderlich.

Quellennachweis

1. Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn. Deutsche Bahn AG, 3. überarbeitete Auflage 1995
2. Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke. DS 804 (B6) Deutsche Bahn AG, 2000
3. Vogel, W., Grübl, W.: Erdbauwerke von Neubaustrecken für Feste Fahrbahnen. Grundsätze und Hinweise zur Ausführung. ETR 42, 1993, Heft 9, S. 603-610
4. Jaup, A., Kempfert, H.-G.: Setzungen im Hinterfüllungsbereich von Eisenbahnbrückenwiderlagern. Die Bautechnik, Heft 9, 2001
5. Sherif, G.: Setzungsmessungen an Industrie- und Hochbauten und ihre Auswertung. Mitt. VGB Aachen 47, 1973