

Verformungsmessungen an horizontal belasteten, freistehenden Brückenpfeilern

Deformation measurements on free-standing bridge piers subjected to horizontal load

von P. Schwarz* und H.-G. Kempfert**

ZUSAMMENFASSUNG

An zwei Pfeilern der Sinntalbrücke Schaippach (Neubaustrecke Hannover-Würzburg der Deutschen Bundesbahn) wurden Belastungsversuche durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung der Steifigkeit des Systems Bauwerk-Boden. Über ein Spannglied wurde am Pfeilerkopf eine horizontale Last aufgebracht. Bei der Entlastung bestand die Möglichkeit, durch schlagartiges Lösen des Spanngliedes ein unbehindertes Aus-schwingen des freistehenden Pfeilers herbeizuführen.

Die Verformung des Bauwerks, insbesondere die Auslenkung des Pfeilerkopfes, wurden mit mehreren Meßsystemen vergleichend untersucht. Hierbei kamen neben herkömmlichen Techniken, wie dem Einsatz von Wegaufnehmern oder geodätischen Methoden, auch ein in zwei Achsen messendes Neigungsmeßgerät zur Ermittlung der räumlichen Biegelinie sowie ein Lasermeßsystem zum Einsatz.

Die Verschiebungsgrößen blieben aufgrund der geringen maximal zugelassenen Horizontallast von 350 kN insgesamt relativ klein. Die Pfeilerkopfauslenkung erreichte eine absolute Größe von lediglich 2 bis 3 mm.

SUMMARY

Load tests were carried out on two piers of the Sinntal bridge near Schaippach (new line of the German Federal Railway, under construction between Hannover and Würzburg). These investigations were aimed at determining the stiffness of the system structure and soil. By means of a cable, a horizontal load was applied to the top of the pier. Unconfined oscillations were set up in the free-standing pier by abruptly releasing the tension in the cable.

Deformations caused to the structure, particularly the deflection of the pier top, were comparatively investigated by using several measuring systems. For this purpose, not only conventional techniques were used, as for example dial gauges and geodetic surveys, but also an inclinometer measuring in two axes to determine the three-dimensional bending line, as well as a laser measuring system.

Owing to the low value of the permitted horizontal load of 350 kN, the rates of displacement generally remained relatively small. The absolute value of deflection of the pier top amounted to only 2 to 3 mm.

1. VORBEMERKUNGEN ZUR AUFGABENSTELLUNG

Die Trassenführung der Neubaustrecke Hannover - Würzburg der Deutschen Bundesbahn erfordert den Bau zahlreicher hoher Talbrücken. Diese sollen z.T. als mehrteilige Tragwerke mit hintereinander gereihten Einfeldträgern erstellt werden.

Ein wichtiger Faktor für die Realisierbarkeit dieser Bauweise mit durchgehend geschweißter Schiene ist die Unterbausteifigkeit des Brückensystems, da sie die Abtragung der Längskräfte aus Brems- und Anfahrlasten sowie Temperaturschwankungen und damit die auf ein bestimmtes Maß begrenzten Schienenspannungen über den Auflagerpunkten beeinflussen.

Gemäß (1), (2) und Bild 1 setzt sich die Unterbausteifigkeit k (kN/cm) aus der Biegesteifigkeit der Pfeiler bzw. der Widerlager k_p , dem Widerstand des Bodens unter dem Fundament bzw.

der Pfahlgründung gegen Verkantung k_v und der Horizontalverschiebung k_h zusammen.

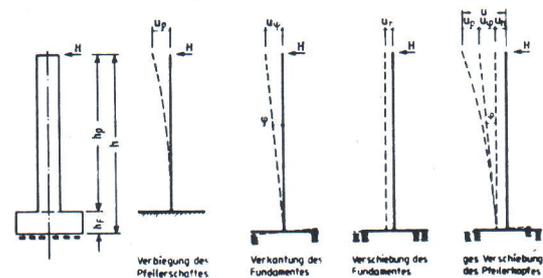


Bild 1
Anteil der Verschiebung eines Pfeilerkopfes in Brückenlängsrichtung (aus 2)

- Verbiegung des Pfeilerschaftes
- Verkantung des Fundamentes
- Verschiebung des Fundamentes
- Gesamtverschiebung des Pfeilerkopfes

Um die der statischen Berechnung zugrunde gelegten Unterbausteifigkeiten überprüfen und Rückschlüsse auf künftig zur Ausführung kommende Talbrücken der Neubaustrecke ziehen zu können, wurden durch die Deutsche Bundesbahn, Bundesbahn-Zentralamt München (BZA) begleitende Messungen beim Bau der Sinntalbrücke Schaippach veranlaßt.

*) Dipl.-Ing. P. Schwarz, Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München

***) Dipl.-Ing. H.-G. Kempfert, Bundesbahn-Zentralamt München, Dezernat Tunnel-, Erd- und Grundbau

Hierbei sollten die Unterbausteifigkeiten in Brückenlängsrichtung an zwei Pfeilern getrennt nach Pfeilerschaft- und Gründungssteifigkeit durch Zugversuche am Pfeilerkopf bestimmt werden.

2. MESSTECHNIK

Für die Versuchsdurchführung wurden die Pfeiler 7 und 8 mit Pfeilerhöhen von rd. 18,4 m bzw. 18,2 m über OK Fundament ausgewählt. Weitere Abmessungen sowie die Lage einiger Meßgeber sind in Bild 2 eingetragen. Das Fundament- und Pfeilergewicht beträgt zusammen rd. 10 MN.

Neben den nachfolgend dargestellten Messungen der Pfeilerkopfverschiebungen (vgl. Abschnitt 4) wurden die Fundamentverkantungen, die Sohlspannungen unter den Fundamenten sowie Verformungen, Beschleunigungen und Temperaturen an mehreren Punkten am Pfeilerschaft gemessen (vgl. Bild 2).

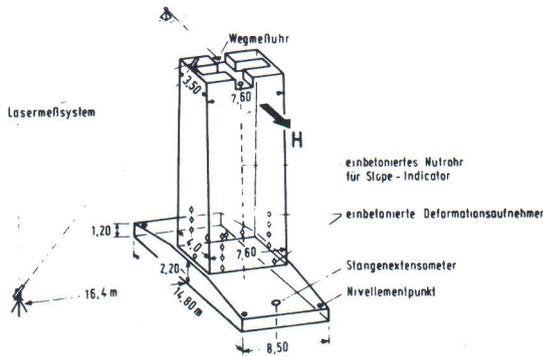


Bild 2
Meßeinrichtungen

Die Messung der Biegelinie der Pfeiler bei Anbringung einer Horizontallast am Pfeilerkopf erfolgte durch ein Neigungsmeßgerät (Slope Indicator der Fa. SINCO). Das Gerät wird in einem in die Pfeilerwand einbetonierten Meßrohr geführt und gestattet die Messung der Neigung an beliebigen Punkten in zwei zueinander senkrechten Richtungen.

Bei diesem Neigungsmeßgerät wird ein Drehspulsystem, an dessen Zeiger eine Masse befestigt ist, je nach Neigungswinkel ausgelenkt. Ein elektronischer Regelkreis erzeugt ein Rückführungssignal, das den Zeiger in der Nulllage festhält und dessen Größe ein Maß für den Neigungswinkel ist (vgl. Bild 3a, b).

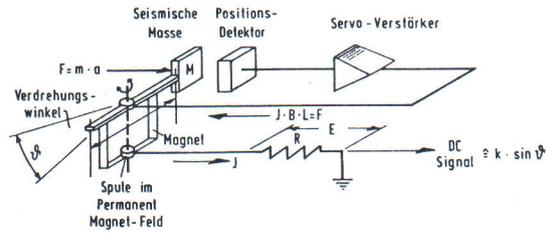


Bild 3a
Funktions-Prinzip Slope-Indicator

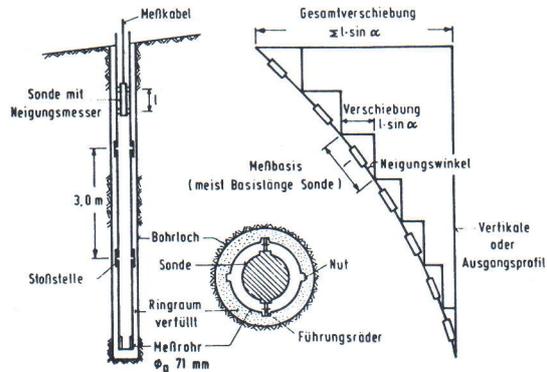


Bild 3b
Prinzip der Verschiebungsmessung

Das Meßrohr wurde bis zur Fundamentunterkante geführt, so daß der Fußpunkt als möglichst unbeeinflußter Bezugspunkt für die Messungen zur Verfügung stand.

Unabhängig von der Bestimmung der Biegelinie wurde die Verschiebung des Pfeilerkopfes am Pfeiler 8 mit einem elektronisch-optischen Bewegungsmesssystem (Typ JENZER-OCULUS OCL 2) gemessen. Hierbei wird ein ruhender, richtungsstabiler He-Ne-Laserstrahl auf einen am Pfeilerkopf montierten und dessen Bewegungen mitvollziehenden Empfänger gerichtet.

Der Laserstrahl wird mit Hilfe eines Theodolitfernrohres auf die Mattscheibe des Empfängers zentriert und fokussiert. Der auftreffende Lichtfleck wird durch eine Optik verkleinert auf eine 4-Quadranten-Silizium-Photodiode (Fläche 24 x 24 mm) abgebildet, die positionsabhängige Teilströme liefert. Die dem Empfänger nachgeschaltete Elektronik berechnet hieraus die zwei Verschiebungskoordinaten.

Als weitere Vergleichsmessung wurde die Verschiebung des Pfeilerkopfes im Vergleich zu einem in Brückenlängsrichtung 8 m entfernt stehenden Hilfspfeiler herangezogen. Die Verschiebung

zwischen einem auf dem Hilfspfeiler unverschieblich, auf dem Meßpfeiler hingegen verschieblich gelagerten Stahlträger und dem Meßpfeiler wurde mit einer Wegmeßuhr (1/100 mm Skalenteilung) ermittelt.

3. LASTAUFBRINGUNG UND MESSWERTERFASSUNG

Die Aufbringung der horizontalen Last am Pfeilerkopf mit anschließender schlagartiger Entlastung wurde einem Subunternehmer (Starkstrom-Anlagen-Gesellschaft, Versuchs- und Trainingszentrum Langen) übertragen.

Bild 4 zeigt schematisch den Aufbau zur Aufbringung der Horizontallast am Pfeilerkopf.

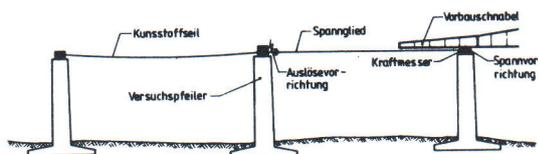


Bild 4
Prinzip der Lastaufbringung

Ein aus 16 Einzelspanndrähten (je $\varnothing 7$ mm) aufgebautes Spannstahlglied wurde mit einer Auslösestelle am Meßpfeiler befestigt und von einem Nachbarpfeiler aus verspannt. Das Spannglied war bis zu einer Nennkraft von 566 kN ausgelegt und zugelassen.

Bei den Versuchen zur Messung des Ausschwingverhaltens des Versuchspfeilers mußte das Spannglied auf dem Meßpfeiler unter Last schlagartig getrennt werden. Dazu wurde zwischen dem Befestigungsanker und den einzelnen Spanndrähten eine Sollbruchstelle eingebaut.

Ein für die statische Last gerade noch ausgelegter Aluminium-Bolzen wurde durch eine gekapselte Schußanlage angeschossen und sein wirksamer Querschnitt dadurch soweit geschwächt, daß er selbständig riß.

Zum Aufbringen der statischen Last und für den Fall einer Fehlauflösung war die Sollbruchstelle mit zwei Bolzen gesichert. Das bei diesem Versuch freiwerdende Spannglied wurde von zwei Kunststoffseilen ($\varnothing 30$ mm), die auf dem anderen benachbarten Pfeiler bzw. auf einem Hilfsfundament befestigt waren, abgefangen.

Die Belastung wurde in der Regel in mehreren Schritten bis zum Erreichen der für die Versuche zugelassenen Maximallast von 350 kN gesteigert. Insgesamt wurden an den zwei Versuchspfeilern 22 Belastungsversuche vorgenommen, davon 12 Versuche mit schlagartiger Entlastung.

Die Meßwerterfassung wurde wie folgt durchgeführt:

Die Kabel der verschiedenen Aufnehmerarten wurden zunächst im Inneren der Pfeilerschäfte zusammengeführt und an Verteilertabletts (VT 10 Hottinger) angeschlossen.

Bei den statischen Versuchen kam eine automatische Meßstellen-Umschaltanlage (Hottinger, UPH 3200) zum Einsatz, die durch einen Tischrechner (HP 85 H, 16 K Speichererweiterung, GP-IO Steuerinterface, BCD-Interface) gesteuert wurde. Alle Meßstellen wurden innerhalb eines Zyklus von 60 sec. abgefragt.

Die Daten wurden auf Magnetbandkassetten gespeichert. Die grafische Darstellung erfolgte auf einem Plotter (HP 7225 A).

Bei den Ausschwingversuchen wurde eine unabhängige Meßwerterfassung mit folgenden Gerätekomponten eingesetzt:

Ein Umformer und Signalwandler (16-Kanal-Trägerfrequenz-Meßverstärker), ein rechnergesteuertes Meßwerterfassungssystem (B+S, Multidata II) sowie ein Tischrechner (CBM 8032) mit den Peripheriegeräten Matrixdrucker (CBM 4022) und Doppelfloppy (CBM 8050). Bei einer Amplitudenauflösung von 12 Bit wird eine Speichertiefe von ca. 15 000 Werten erreicht. Die Abtastrate im Mehrkanalbetrieb beträgt 6 KHz.

Ein Großteil der Auswertung der Versuchsergebnisse wurde mit denselben Recheneinheiten vorgenommen.

Auch bei diesen Versuchen mußten sich die an den Messungen Beteiligten mit den besonderen Schwierigkeiten auseinandersetzen, die der Abwicklung größerer Meßprogramme an Großbaustellen entgegenstehen. Probleme der Planabstimmung, des Gebundenseins an nicht genau vorgebbare Bautermine, Behinderungen durch nicht vorhersehbare örtliche Gegebenheiten und Termindruck bei der Durchführung der Arbeiten bedingen Mehraufwendungen, die es geraten sein lassen, bei der Planung ähnlicher

Aufgaben den Posten "Unvorhergesehenes" reichlich zu bemessen.

4. KRITISCHE WERTUNG DER MESSGERÄTE

Der Einbau des Meßrohres für Messungen mit dem Slope-Indicator bedeutet bereits eine aufwendige Maßnahme als Vorbereitung. Die Messung selbst nimmt längere Zeit in Anspruch und ist nur bei statischen Versuchen möglich. Das Ergebnis liegt nicht sofort vor, wobei zu berücksichtigen ist, daß eine vollständige Biegelinie ermittelt wird.

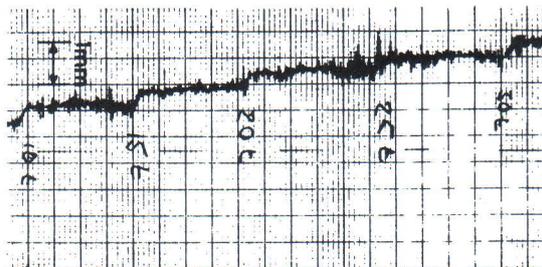
Die Auflösungsgrenze des Meßgerätes liegt nach Herstellerangaben bei etwa ± 10 Bogensekunden. Die erreichbare Meßgenauigkeit hängt erfahrungsgemäß auch von den jeweiligen Gegebenheiten der Meßstelle sowie der Sorgfalt bei der Handhabung des Gerätes ab.

Die Bestimmung der Biegelinie und damit der Pfeilerkopfverschiebung mit dem Slope-Indicator erwies sich im vorliegenden Fall aus mehreren Gründen als schwierig. Eine Messung nahm jeweils 20 - 25 Minuten in Anspruch. Alle während dieser Zeit zusätzlich auftretenden Pfeilerverformungen (z.B. aus Temperatur) konnten nicht getrennt erfaßt werden. Besonders im oberen Drittel des Pfeilerschaftes machte sich auch die Beanspruchung durch Wind bemerkbar.

Bei der Messung mit dem Laserstrahlmeßgerät ist die leichte und schnelle Montage an beliebigen Punkten des Bauwerks hervorzuheben. Die Messung erfolgt kontinuierlich und zeitgleich mit der Bewegung des Meßobjekts. Das Ergebnis liegt z.B. in Form eines Schriebes sofort vor. Die Meßauflösung wird vom Hersteller mit 0,2 - 1‰ angegeben, dies entspricht bei einem Meßbereich von ± 20 mm und optimalen Verhältnissen einer Auflösung von 0,02 mm.

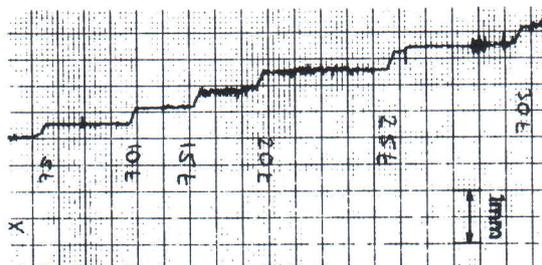
Während der Messungen verursachten jedoch Sonneneinstrahlung und hohe Lufttemperaturen (bis 37°C) starkes Luftflimmern, das zu einem Rauschen des Meßsignals von 0,2 - 0,5 mm führte (vgl. Bild 5).

Die Messung gegen den Hilfspfeiler mit Hilfe einer Wegmeßuhr wurde zunächst nicht sehr hoch bewertet. Zu groß erschienen die Unsicherheiten aus temperaturbedingten Verformungen des aus Stahlprofilen bestehenden Hilfspfeilers sowie die Beeinflussung seines Fundaments durch die Bewegungen des benachbarten Pfeilerfundaments.



Versuchsbeginn: 12.7.1982 16.10 h

Lufttemperatur: 34 °C, Sonne



Versuchsbeginn: 13.7.1982 5.20 h

Lufttemperatur: 17 °C, vor Sonnenaufgang

Bild 5
Schriebe des Laserstrahlmeßgeräts

Durch die Meßergebnisse wurde jedoch die wertvolle Ergänzung und orientierende Hilfe mechanischer Meßverfahren erneut deutlich gemacht. Die Errichtung eines Hilfspfeilers zu Meßzwecken alleine dürfte sich jedoch nur in Ausnahmefällen lohnen.

In Bild 6 sind Ergebnisse der drei Meßverfahren für einen günstigen und einen ungünstigen Meßtermin nebeneinandergestellt. Eine wenig temperaturbeeinflusste Messung der Pfeilerkopfverschiebung unter 350 kN Horizontallast ergab Abweichungen zwischen Meßuhr und Laser von 0,1 bis 0,2 mm, während das Ergebnis des Slope-Indicators 0,3 bis 0,6 mm von den beiden anderen abwich.

Eine stark temperaturbeeinflusste Messung führte zu Abweichungen von 0,4 bis 1 mm zwischen Slope-Indicator und Wegmeßuhr. Der Schrieb des Laserstrahlmeßgeräts wies in diesem Fall anfängliche Unklarheiten auf und erbrachte Abweichungen von ca. 1 bis 1,3 mm von beiden anderen Meßsystemen.

Bei den Versuchen zum freien Ausschwingverhalten der Pfeiler mußte die Meßuhr sowie jegliche Verbindung zum Hilfspfeiler entfallen. Auch der Slope-Indicator erwies sich als nicht geeignet, da der Regelkreis nur langsame Neigungsänderungen verarbeiten kann und durch die auftretenden Beschleunigungen weit übersteuert wurde. Das

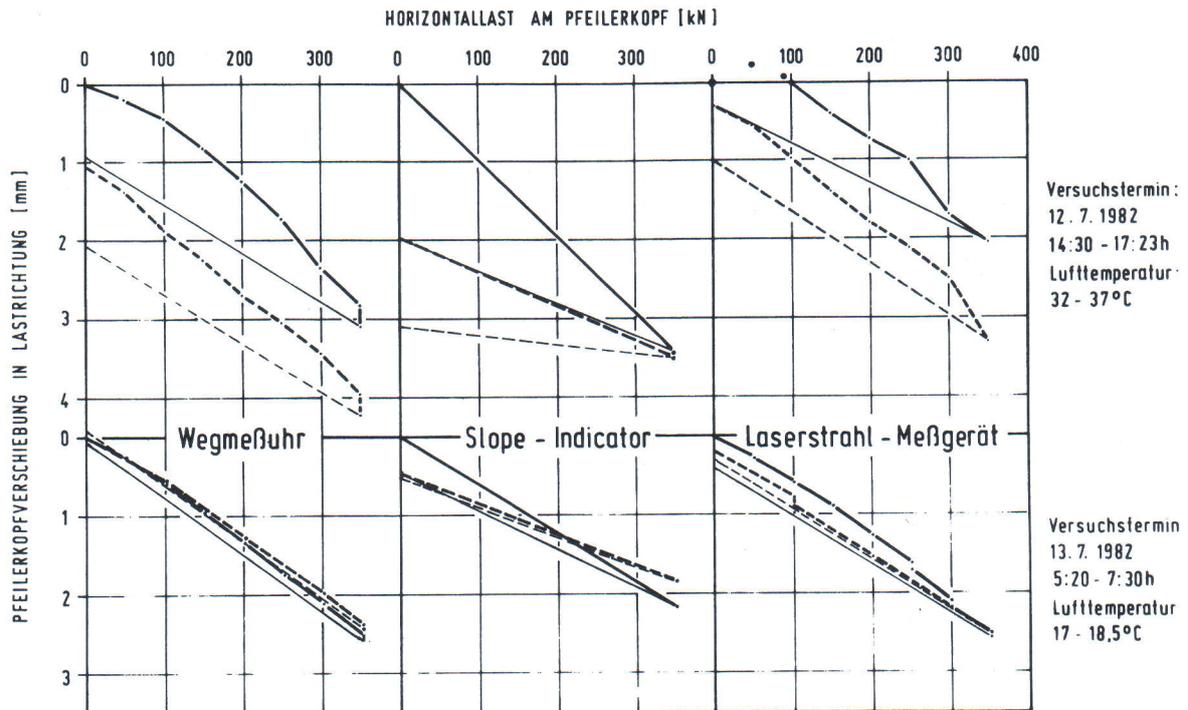


Bild 6
Vergleich der gemessenen Pfeilerkopfverschiebungen

Laserstrahlmeßgerät hingegen lieferte eindeutige Messungen (Bild 7).

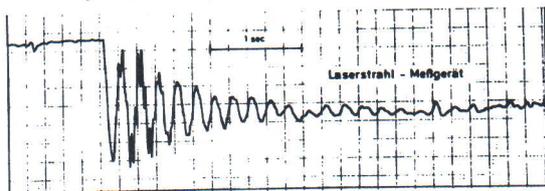


Bild 7
Versuch zum Ausschwingverhalten

5. BEDEUTUNG DER MESSUNGEN

Die Meßergebnisse wurden zwischenzeitlich vom Bundesbahn-Zentralamt München im Hinblick auf die Aufgabenstellung (vgl. Abschnitt 1) ausgewertet und werden zu gegebener Zeit an anderer Stelle mitgeteilt.

Neben den untergrundspezifischen Erkenntnissen durch die Messungen an den Pfeilerfundamenten wurde bei der Rückrechnung der gemessenen Biegelinie des Pfeilerschaftes festgestellt, daß der E-Modul des Betons bei den Versuchspfeilern niedriger war als die aus DIN 4227 zu entnehmenden Rechenwerte. Den Messungen kommt damit u.a. auch eine Bedeutung für die Sicherheit der im Zuge der Neubaumaßnahmen der DB noch zu erstellenden zahlreichen hohen Talbrücken zu, indem

daraus die Forderung nach verstärkter Güte- und Qualitätssicherung des Pfeilerbetons abgeleitet wurde.

LITERATUR

- (1) GERLICH, K. / PAHNKE, U. (1982):
Abtragung der Längskräfte im Eisenbahnbrückenbau
AET (37), S. 19 - 30
- (2) Voraussgabe (DS 899/59) DB:
Besondere Bestimmungen für Eisenbahnbrücken
und sonstige Ingenieurbauwerke in Strecken
mit Geschwindigkeiten über 160 km/h (BesB)
vom 01.01.82