

Verformungsprognosen und messtechnische Überwachung der Brücken- und Erdbauwerke der Hochgeschwindigkeitsstrecke Beijing-Tianjin

Dr.-Ing. Marc Raithel

Kempfert + Partner Geotechnik

Dipl.-Ing. Andreas Kirchner

Kempfert + Partner Geotechnik

Dipl.-Ing. Alfred Kneißl

Max Bögl Bauunternehmung GmbH & Co.KG

1 Einleitung

Im Rahmen der bis zum Jahr 2020 geplanten Modernisierung ihres Eisenbahnnetzes forciert die Volksrepublik China den Bau neuer Hochgeschwindigkeitsstrecken für den Personenverkehr. Derzeit werden die Strecken Beijing – Tianjin, Zheng Hou – Xi An und Wu Han – Guang Zhou mit dem Oberbausystem Feste Fahrbahn gebaut. Als erste dieser reinen Hochgeschwindigkeitsstrecken ($v_e = 350 \text{ km/h}$) wird dabei die in Bild 1 dargestellte Verbindung zwischen der Hauptstadt Beijing und der südöstlich davon gelegenen aufstrebenden Metropole Tianjin mit einer Gesamtlänge von etwa 115 km noch vor Beginn der Olympischen Spiele 2008 in Betrieb gehen.

Der gesamte Fahrweg dieser Strecke besteht aus Gleistragplatten des Feste Fahrbahn (FF) Systems Bögl, wobei die Planung der Strecke dabei in Händen eines chinesischen Planungsinstitutes liegt und die Bauarbeiten von chinesischen Baufirmen ausgeführt werden. Der Bau der Hochgeschwindigkeitsstrecke ist zum Zeitpunkt der Berichterstellung nahezu abgeschlossen und die Feste Fahrbahn auf der gesamten Länge eingebaut. Die Baumaßnahme wurde dabei von der Max Bögl Bauunternehmung kontinuierlich überwacht und begleitet, dies betrifft insbesondere auch die geotechnische Beratung bezüglich der erforderlichen Gründungsmaßnahmen.

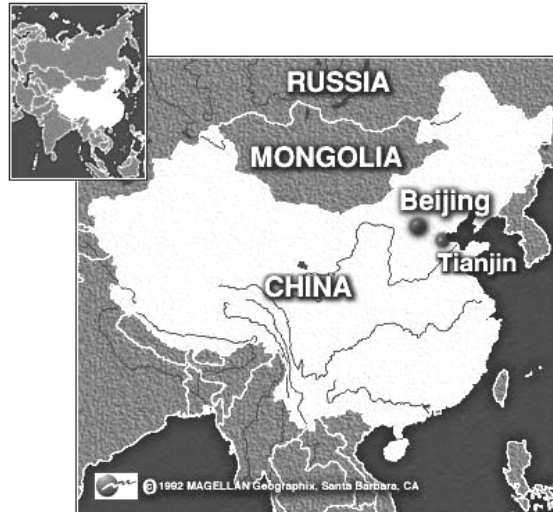


Bild 1 Lage der Strecke Beijing-Tianjin in der VR-China

2 Projektübersicht

Die Hochgeschwindigkeitsstrecke Beijing-Tianjin verläuft nahezu auf ihrer gesamten Länge auf Brückenbauwerken (max. Brückenlänge ca. 32 km), die in den Bahnhofsbereichen durch kurze Erdbauwerke mit einer maximalen Länge von ca. 3 km unterbrochen werden. Die Brücke besteht i.d.R. aus Fertigteil-Hohlkastenträgern mit Spannweiten von 24 und 32 Metern.

Die Herstellung dieser Brückenfertigteilträger erfolgt in Feldfabriken, die direkt neben der Strecke angeordnet sind. Die Brückenfertigteilträger werden mit Hebezeug auf die Brücke gehoben, über die bereits fertiggestellten Brückenabschnitte längs zu ihrem Bestimmungsort transportiert und dort mit einem Verlegegerät eingebaut (sog. FSPLM Full Span Precast Launching Method) (Bild 2).



Bild 2 Einbau der Fertigteil-Hohlkastenträger

Zwischen den Einfeldträgerabschnitten gibt es zur Überbrückung größerer Spannweiten drei Durchlaufträgerbrücken mit Spannweiten bis 120 m, die in Ortbetonbauweise erstellt werden (Bild 3).



Bild 3 Durchlaufträgerbrücken in Ortbetonbauweise, hier Freivorbau

Aufgrund der vorliegenden Untergrundverhältnisse und der bestehenden Setzungsanforderungen des Oberbaus werden alle Bauwerke auf Pfählen tiefgegründet. Die Pfeiler der Einfeldträgerbrücken werden dabei im Regelfall auf 8 bis 12 Großbohrpfählen mit einem Durchmesser von 1,0 bis 1,25 m (mittlere Länge ca. 45 m) und die Erdbauwerke auf Verdrängungs- und SOB-Pfählen tiefgegründet (Raithel et al. 2006).

3 Baugrundsichtung und Geologie

Die Nordchinesische Ebene ist geologisch ein Einbruchsfeld, das später von den Deltabildungen der nordchinesischen Ströme aufgefüllt wurde. Diese Auffüllung besteht aus Schwemmlöß und Sanden, die von den Flüssen aus den westlichen Gebirgsländern herangeführt worden sind. Das Gebiet ist starken tektonischen Spannungen ausgesetzt, die immer wieder zu Erdbeben führen. Im Vorfeld der Gründungsarbeiten wurden nahezu an jedem Brückenpfeiler Erkundungsbohrungen (mit SPT-Versuchen) bis in Tiefen von ca. 55 m (teilweise bis 85 m) unter GOK ausgeführt. Aus baupraktischer Sicht handelt es sich bei den anstehenden tertiären Böden überwiegend um Tone und Schluffe mit lokal geringen organischen Beimengungen. Diese bindigen Böden sind bis ca. 20 bis 25 m unter GOK von weicher bis steifer Konsistenz (sog. Bereich Q4), mit zunehmender Tiefe auch von steifer bis halbfester Konsistenz (sog. Bereich Q3). In unterschiedlichen Tiefen können Sandschichten eingelagert sein. Bei den Sanden handelt es sich um Feinsande mit wechselnden Schluffanteilen.

Vereinzelt liegen auch bis in ca. 35 m Tiefe Drucksondierungen vor. Hierbei finden sich in den bindigen Schichten Spitzendrücke von ca. $q_c = 0,2$ bis 1 MN/m^2 (z.T. bis 5 MN/m^2). Grundsätzlich ist dabei ein leichter Anstieg der Spitzendrücke mit der Tiefe festzustellen, wobei einheitlich höhere Spitzenwiderstände über ca. $q_c = 2 \text{ MN/m}^2$ aber erst ab ca. 30 m unter GOK gegeben sind.

4 Anforderungen an das Trag- und Verformungsverhalten

Die nach Fertigstellung der FF, d.h. im vorliegenden Fall nach Untergießen der Gleis-tragplatten System Bögl, eintretenden Gesamt-Restsetzungen s_R dürfen nicht zu Gleis-lageveränderungen 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 der Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn (AKFF 1995) vor, das maximale Höhenkorrekturmaß nach Einbau der FF (im Regelfall 20 mm) 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 (im Regelfall 15 mm). 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)

$$R_a \geq 0,4 \cdot v_e^2$$

mit:

R_a : Ausrundungsradius in m

v_e : Entwurfsgeschwindigkeit in km/h

ausgeglichen werden können. Die Setzungsmulde darf einer trassierten Mulde überlagert werden.

5. Ganzheitliche Betrachtungen zum Verhalten der Fahrwege unter HG-Verkehr (GBF)

Auf Grund der begrenzten Regulierungsmöglichkeiten der Gleislage nach Fertigstellung der Festen Fahrbahn ist das Verformungsverhalten des Unterbaus bei Erd- und Kunstbauwerken von ausschlaggebender Bedeutung, wobei insbesondere an den Übergängen besondere Anforderungen an die Begrenzung der Verformungsdifferenzen zu stellen sind.

Zur Gewährleistung der dauerhaften Funktionsfähigkeit während der Nutzungsdauer, der Sicherheit, des Komforts, der Wartungsarmut und der Verfügbarkeit der Strecke wird in Deutschland die sog. „Ganzheitliche Verformungsbetrachtung (GBF)“ zur Kontrolle sämtlicher Belange zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks erstellt.

Eine explizite Richtlinie zur Erstellung der "Ganzheitlichen Betrachtung des Fahrweges" existiert nicht, vielmehr sind die Anforderungen an Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn auszuwerten und die Einhaltung der darin enthaltenen Vorgaben für die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Bauwerks nachzuweisen.

In der ersten Stufe der GBF wurden für alle Bauwerke im Rahmen der Ausführungsplanung die zu erwartenden Setzungen bestimmt. Dabei wurden die Setzungen der tiefgegründeten Pfeilergründungen und des Erdbauwerkes rechnerisch unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der Pfähle einer Pfahlgruppe (Gruppenwirkung) abgeschätzt. Zur Überprüfung des tatsächlichen Baugrund- und Baustoffverhaltens der Bauwerke wurden in der zweiten Stufe der GBF an den entstehenden und fertigen Bauwerken Verformungsbeobachtungen durchgeführt. In der dritten Stufe der GBF wurden die durchgeführten Verformungsmessungen zusammenfassend dargestellt und im Hinblick auf die nach Einbau der FF zu erwartenden Gesamt-Restsetzungen ausgewertet und beurteilt.

5.1 Verformungsberechnungen

Da die Feste Fahrbahn bei den geplanten Fahrgeschwindigkeiten, wie oben dargestellt, nur sehr geringe Verformungstoleranzen aufweist, wurden zur Überprüfung der tatsächlichen Pfahltragfähigkeiten zunächst Probelastungen an Einzelpfählen durchgeführt. Die Probelastungen umfassten hierbei 4 Großbohrpfähle mit ca. 50 m bzw. 70 m Länge (Durchmesser 1,0 bzw. 1,5 m) sowie im Bereich der an die Brückenbauwerke angrenzenden Erdbauwerke jeweils mehrere Ramppfähle bzw. Schneckenortbeton-Pfähle (Bild 4).



Bild 4 Pfahlprobelastung an Großbohrpfählen und Ramm- bzw. Schneckenortbeton-Pfählen

Die Ergebnisse dieser Pfahlprobelastungen sind in der Literatur (Raithel et al. 2006) ausführlich dargestellt.

Zur Übertragung der Probelastungsergebnisse in Bezug auf das Ganzheitliche Verformungsverhalten der Strecke unter Hochgeschwindigkeitsverkehr (GBF) wurden die Setzungen der tiefgegründeten Pfeilergründungen und des Erdbauwerkes rechnerisch unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der Pfähle einer Pfahlgruppe (Gruppenwirkung) abgeschätzt. Für die Beschreibung des Last-Setzungsverhaltens von Pfahlgruppen existieren eine Vielzahl von Berechnungsmethoden (analytisch, nume-

risch, empirisch, usw.), die sich hinsichtlich der Berechnungsmethode, den erforderlichen Eingangsparametern, der Genauigkeit und dem Berechnungsaufwand unterscheiden. In jüngster Zeit wurden zwei praxisnahe Berechnungsverfahren vorgestellt (Rudolf 2005 und Lutz et al. 2006), die es dem Anwender ermöglichen, u.a. das Verformungsverhalten von Druckpfahlgruppen relativ einfach abzuschätzen.

Im vorliegenden Fall wurde das Verformungsverhalten der Pfahlgruppen, unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Pfahlprobelastungen, zunächst auf Grundlage des Nomogrammverfahrens nach (Rudolf 2005) ermittelt, da dadurch die erforderliche Anzahl an Eingangsparametern deutlich reduziert wird. Aufgrund der hohen Setzungsanforderungen wurden des Weiteren, zur Validierung dieser Abschätzungen, ergänzende numerische dreidimensionale Finite-Elemente-Berechnungen mit dem FE-Programm PLAXIS 3D-Tunnel 1.2 durchgeführt, vgl. (Raithel et al. 2006).

Die beiden Berechnungsverfahren (Nomogrammverfahren, 3D-FEM) zeigen dabei bei Betrachtung des Einzelpfeilers eine gute Übereinstimmung, wodurch die Anwendbarkeit des Nomogrammverfahrens bei den vorliegenden Randbedingungen zunächst bestätigt werden konnte (vgl. Tab.1). Die berechneten Gruppenfaktoren $G_S = s_G/s_E$ (Verhältnis der Setzungen der Pfahlgruppe s_G zu den Setzungen des Einzelpfahles s_E) betragen dabei zwischen $G_S = 4$ (Brücke) bis $G_S = 14$ (Bereich des Erdbauwerks).

Tabelle 1: Gegenüberstellung der numerisch und analytisch berechneten Setzungen und Gruppenfaktoren unter Gebrauchslasten (inkl. Verkehrsbelastung).

	Rechnerische Gesamtsetzung [mm]/ Gruppenfaktor G_S [-]	
	Nomogrammverfahren nach Rudolf	FEM Plaxis 3D
Pfeiler	$s = 15$	$s = 20$
Einfeldträger	$G_S = 4,0$	$G_S = 5,0^{2)}$
Mittelpfeiler	$s = 20$	$s = 25$
Dreifeldbrücke	$G_S = 4,5$	$G_S = 5,5^{2)}$
Erdbauwerk	$s = 20$ $G_S = 14^{1)}$	-

¹⁾ aufgrund der geometrischen Randbedingungen (Linienbauwerk) werden etwas günstigere Verhältnisse erwartet;

²⁾ inkl. Überlagerung der Setzungsmulden

Die FE-Berechnungen zeigten aber auch, dass sich die Setzungsmulden einzelner Pfeilergründungen aufgrund der großen Pfahllängen überlagern können, was zunächst zu einer Vergrößerung der rechnerisch zu erwartenden Gesamtsetzungen der einzelnen Pfeilergründungen führt (Raithel et al. 2006).

Zur Absicherung der Setzungsberechnungen wurden bereits zu Beginn der Bauarbeiten Setzungsmessungen an Pfahlgruppen innerhalb einer Feldfabrik durchgeführt.

Nach der Entnahme aus der Schalung werden die Hohlkastenbrückenträger innerhalb der Fertigteilwerke zunächst auf jeweils zwei Fundamenten gelagert, die wiederum auf 14 Ortbetonverdrängungspfählen (Durchmesser 0,4 m) mit Längen von ca. 15,6 m tiefgegründet sind (Bild 5).

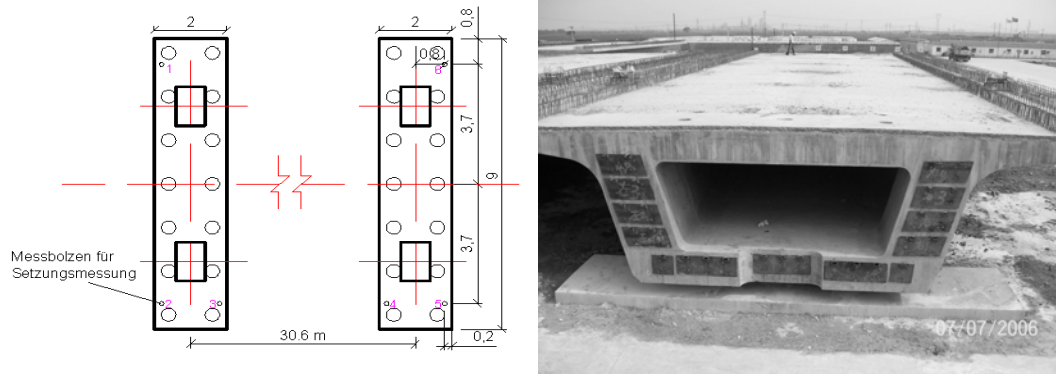


Bild 5 Geometrische Abmessungen der Lagerplatzfundamente

Das Gewicht eines Hohlkastenträgers (Länge ca. 32 m) beträgt 860 t. Um den Einfluss von Mitnahmesetzungen zu verhindern wurden die Nachbarlagerplätze zunächst nicht belastet. Bei den Pfählen handelt es sich um Ortbetonverdrängungspfähle mit verlorener Spitze, im Rahmen der Qualitätssicherung wurden an 12 dieser Pfähle kraftgesteuerte Pfahlprobebelastungen durchgeführt (Bild 6).

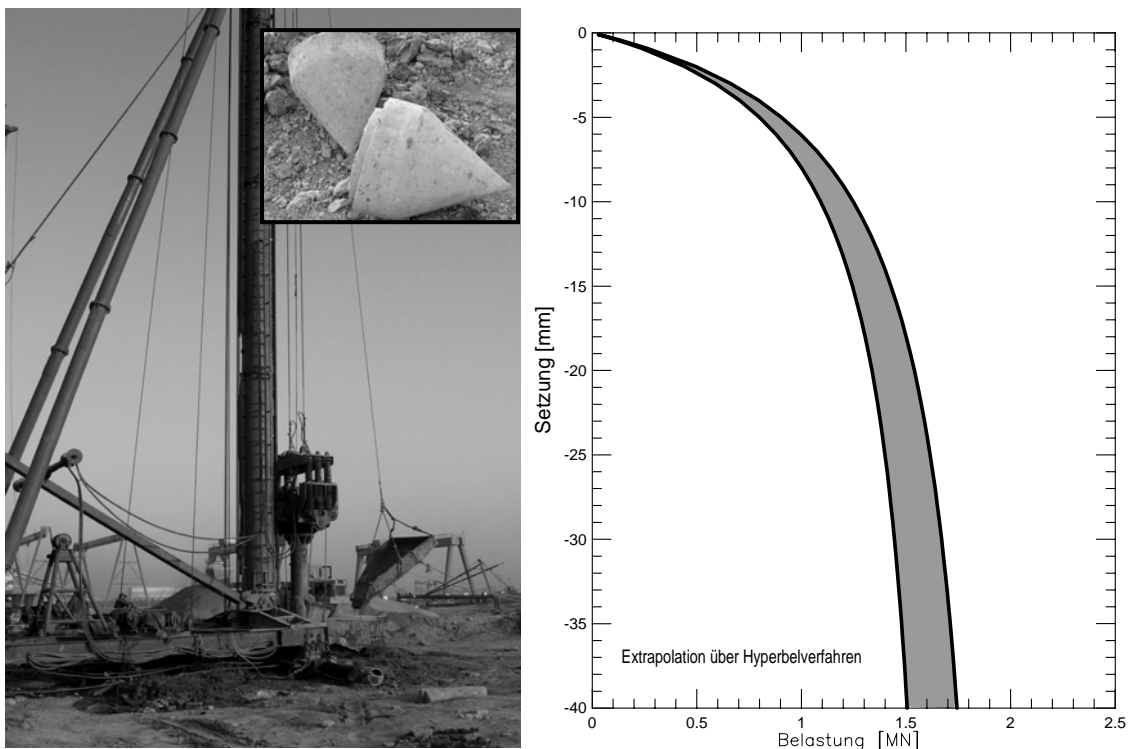


Bild 6 Ortbetonverdrängungspfähle - Herstellung mit verlorener Spitze und extrapolierte Widerstands-Setzungslinien

Die mittlere Grenzlast beträgt dabei ca. 1,15 MN, die mittlere Setzung s eines Einzelfahls bei einer bezogenen Gebrauchlast von ca. 0,31 MN ($8,6 \text{ MN} / 2 \cdot 14 = 0,31 \text{ MN}$) ca. $s = 3,1 \text{ mm}$. Demnach ergeben sich unter Berücksichtigung der vorliegenden geometrischen Randbedingungen (Bild 6), der vorliegenden Pfahlprobelastungen und der Pfahlart (Vollverdrängungspfahlgruppe) rechnerische End- bzw. Absolutsetzungen der Pfahlgruppe in einer Größenordnung von 10 bis 11 mm ($G_s = s_G/s_E = 3,4$).

Die Setzungen der Fundamente wurden in einem Zeitraum von 28 Tagen gemessen. Um eine Aussage zu den Endsetzungen bzw. zum zeitlichen Verlauf der Setzungen machen zu können, wurden die zu erwartenden Setzungen mit Zuhilfenahme einer Hyperbelfunktion nach (Sherif 1973) ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass nach 28 Tagen die zu erwartenden Endsetzungen von im Mittel 9,3 mm nahezu erreicht waren. Somit konnte ein tatsächlich vorliegender Gruppenfaktor von $G_s = 9,3 \text{ mm} / 3,1 \text{ mm} = 3,1$ abgeschätzt werden. Die Setzungsmessungen im Fertigteilwerk zeigten somit bereits vor der Bauausführung, dass die gegenseitige Beeinflussung der Pfähle (Pfahlgruppenwirkung) nicht vernachlässigt werden darf. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass bei den vorliegenden Randbedingungen mit dem Nomogrammverfahren von Rudolf (2006) die zu erwartenden Setzungen der Pfahlgruppen (unter Zugrundelegung von Pfahlprobelastungen) mit ausreichender Genauigkeit prognostiziert werden konnten.

5.2 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. Hierzu wurde bereits vor der Bauausführung ein umfangreiches Messprogramm festgelegt.

Im Bereich von Dammbauwerken wurden die Messquerschnitte so ausgebildet, dass zum Einen das tatsächliche Setzungsverhalten des Untergrundes, zum Anderen die Dammeigensetzungen erfasst werden konnten. Generell wurde in den Dammbereichen ein mittlerer Abstand der Messquerschnitte von 50 m vorgesehen. Im Bereich von Übergängen zu Kunstbauwerken, Durchlässen, etc. wurden zusätzliche Messquerschnitte eingerichtet.

Bei den Brückenbauwerken wurden in großen Teilen bereits vor Betonage der Stützen bzw. Widerlagerwände die ersten Setzungsmessungen durchgeführt. Dazu wurden zwei Höhenbolzen in den Ecken der Pfahlkopfplatte angebracht und einnivelliert. Da diese Punkte durch die Überschüttung später unzugänglich wurden, wurden sie durch Höhenbolzen in den Pfeilerstützen bzw. Widerlagerwänden ersetzt. Grundsätzlich wurden an jeder Pfeilerstütze Setzungsmessungen durchgeführt.

5.3 Vergleich zwischen Berechnung und Beobachtung

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

In der Regel wurde hierbei zunächst eine formalisierte Prognose auf mathematischer Grundlage mit dem Hyperbelverfahren nach (Sherif 1973) durchgeführt. Wie in der Literatur (Kempfert et al. 2002) bereits dargestellt, zeigte sich jedoch frühzeitig, dass die Anwendung von formal mathematischen Verfahren zur Restsetzungsprognose nur bedingt zielführend ist, sondern vielmehr eine ingenieurmäßige Bewertung des weiteren Setzungsverlaufes notwendig ist.

Bild 7 zeigt zwei typische Last-Setzungskurven der Pfeiler (Einfeldträger) aus dem Bereich der Pfahlprobebelastungen. Die bisher gemessenen Setzungen der Pfeiler betragen dort 7 bis 13 mm, die auf Grundlage der Setzungsmessungen prognostizierten Gesamtsetzungen (inkl. Verkehrslast) betragen 14 bis 23 mm und zeigen damit eine gute Übereinstimmung zu den rechnerisch prognostizierten Setzungen (vgl. Tabelle 1). Anhand der vorliegenden Messwerte kann damit die gewählte Vorgehensweise bestätigt werden.

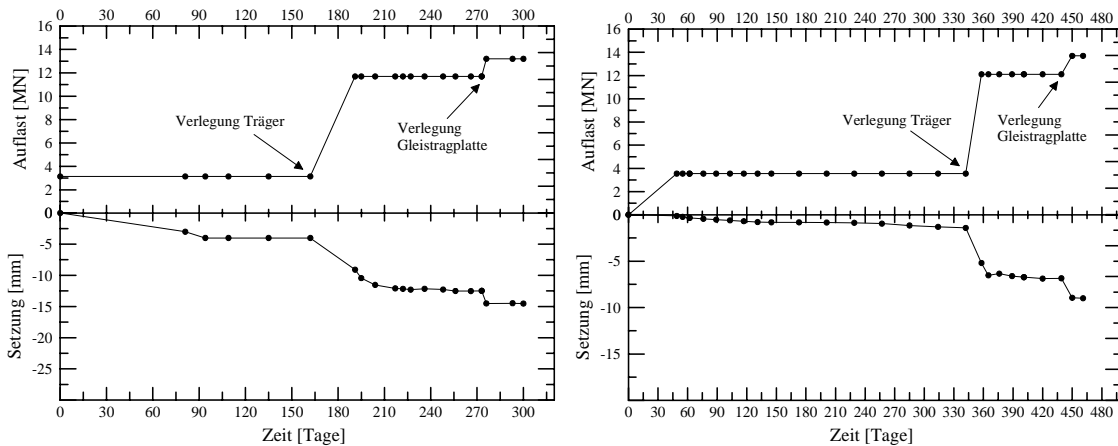


Bild 7 Typische Last-Setzungskurven der Pfeiler (Einfeldträger) im Bereich der Pfahlprobebelastungen

Unter Zugrundelegung der vorliegenden Setzungsmessungen erfolgte die Freigabe zum Einbau der FF, wenn Gesamt - Restsetzungen nach Einbau der FF kleiner 15 mm prognostiziert werden konnten. Sofern diese für die FF zulässigen Verformungen nicht eingehalten werden konnten wurden bautechnische und/oder bautechnologische Gegenmaßnahmen erforderlich.

Literatur

Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn AKFF (1995)

Deutsche Bahn AG, 3. überarbeitete Auflage 1995.

Kempfert, H.-G., Stadel, M., Raithel, M. (2002)

Erfahrungen über die ganzheitliche Betrachtung zum Fahrwegverhalten unter Hochgeschwindigkeitsverkehr beim Bau von Neubaustrecken der DB AG. Proc. 12th Donau-Europäische Konferenz Geotechnisches Ingenieurwesen, Passau, VGE Glückauf Verlag, S. 399–402.

Lutz, B., El-Mossallamy, Y., Richter, Th. (2006)

Ein einfaches, für die Handrechnung geeignetes Berechnungsverfahren zur Abschätzung des globalen Last-Setzungsverhaltens von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen. Bauingenieur 2, S. 61-66.

Raithel, M., Kirchner, A., Kneißl, A. (2006)

Gründung der Hochgeschwindigkeits-Teststrecke Beijing-Tianjin auf Grundlage von vergleichenden Probelastungen an Großbohrpfählen, Rammpfählen und SOB-Pfählen. Vorträge Baugrundtagung 2006.

Richtlinie 836 (Ril 836) (1999)

Erdbauwerke planen, bauen und instand halten, Fassung vom 20.12.1999, DB Netz AG.

Rudolf, M. (2005)

Beanspruchung und Verformung von Gründungskonstruktionen auf Pfahlrosten und Pfahlgruppen unter Berücksichtigung des Teilsicherheitskonzepts. Schriftenreihe Geotechnik, Heft 17, Universität Kassel.

Sherif, G. (1973)

Setzungsmessungen an Industrie- und Hochbauten und ihre Auswertung. Mitt. VGB Aachen 47.