

Untersuchung der Temperaturbeanspruchung einer integralen Gründungskonstruktion aus Stahlbeton

Manfred Keuser und Maximilian Fuchs



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser

Geboren 1952 in Mayen
1973-79 Studium Bauingenieurwesen, TH Darmstadt
1979-81 DYWIDAG Wiesbaden
1981-85 Wiss. Mitarbeiter, TH Darmstadt, Massivbau
1985 Promotion, TH Darmstadt
Seit 1985 BUNG – Beratende Ingenieure, Heidelberg
Seit 1999 Universitätsprofessor,
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau – Massivbau,
Universität der Bundeswehr München
Seit 2000 Prüfenieur für Baustatik, Massivbau und
EBA- Prüfer für Standsicherheit



Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Maximilian Fuchs

Geboren 1979 in München
1999-04 Studium Bauingenieurwesen, TU München
2004-06 Studium Managementorientierte Betriebswirtschaftslehre, TU München
Seit 2004 Wiss. Mitarbeiter,
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau – Massivbau,
Universität der Bundeswehr München

Im Rahmen der Erneuerung der Eisenbahnbrücke über die Enz in der Nähe von Besigheim wurde im anschließenden Dammbereich ein Gründungsbauwerk als integrale Stahlbetonkonstruktion erstellt. Die in der statischen Berechnung anzusetzenden Temperaturlastfälle wur-

den in Anlehnung an die ZTV-ING Teil 5 (Tunnel) in einem Gutachten definiert. Im Bescheid des Eisenbahn-Bundesamtes zu der hierbei erforderlichen Zustimmung im Einzelfall wurde eine Messung der tatsächlich auftretenden Temperaturen und der zugehörigen Verformung über einen längeren Zeitraum nach Fertigstellung des Bauwerks gefordert. Der vorliegende Beitrag behandelt die Messergebnisse, deren Interpretation sowie die durchgeführten rechnerischen Untersuchungen zur Temperaturbeanspruchung und deren Auswirkung auf das Verformungsverhalten der integralen Gründungskonstruktion aus Stahlbeton.

1. Einführung und Projektdarstellung

Die Eisenbahnstrecke Bietigheim-Bissingen-Osterburken in Baden-Württemberg überquert die Enz in der Nähe von Besigheim. Im Jahr 2003 wurde der Ersatz der nahezu 100 Jahre alten Stahlbrücke erforderlich, da die Restlebensdauer der alten Brücke auch mit reduzierter Geschwindigkeit nur noch eine kurze Nutzung erlaubte. Im Anschluss an die Enzbrücke verläuft die zweigleisige Eisenbahnstrecke auf einem Damm. Wegen der extrem schwierigen Baugrundverhältnisse – es handelt sich um ein Erdfallgebiet, in dem der Einsturz unterirdischer Hohlräume nicht ausgeschlossen werden konnte – wurde das als „Brücke im Damm“ bezeichnete Gründungsbauwerk erforderlich, das unter Aufrechterhaltung des Betriebes errichtet wurde, vgl. Abbildung 1.



Abb. 1: Enzbrücke Besigheim mit „Brücke im Damm“ - Gesamtansicht der Bauarbeiten (Foto: DB Projektbau GmbH)

Bei der „Brücke im Damm“ handelt es sich um eine Stahlbetonplatte mit einer Dicke von 1,0 bis 1,2 m, einer Breite von 9 m und einer Länge von ca. 130 m. Diese Stahlbetonplatte ist im Abstand von 10 m auf jeweils 2 Großbohrpfählen mit einem Durchmesser von 120 cm gegründet. Die Pfähle werden in Längsrichtung lotrecht und in Querrichtung mit einer Neigung von 1:10 jeweils zum Plattenlängsrand hin ausgeführt. Die Pfahl-länge beträgt ca. 35 m, die Pfähle sind biegesteif mit dem Überbau verbunden. Die Konstruktion weist keine Fugen auf und ist an ihrem westlichen Ende mit dem Widerlager der Brücke über die B 27 horizontal unverschieblich verbunden, es handelt sich also um eine integrale Stahlbetonkonstruktion. Die „Brücke im Damm“ wird wegen der unzureichenden Tragfähigkeit des Bahndammes und der oberen Schichten des Baugrundes erforderlich. Die Planung erfolgt auf der Grundlage der DIN 1045 (Ausgabe 1988) [1], der DS 804 [2] und der zugehörigen Regelwerke.

Für die „Brücke im Damm“ wurde eine unternehmensinterne Genehmigung von der DB Netz - Zentrale - NST sowie eine Zustimmung im Einzelfall vom Eisenbahn-Bundesamt erteilt, da einige wesentliche Merkmale der Konstruktion im Regelwerk nicht erfasst werden. Dies betrifft hinsichtlich der Bemessung der Konstruktion insbesondere die Berücksichtigung der Temperatureinflüsse. Auf diese Thematik wird nachfolgend eingegangen.

Bei der geplanten Konstruktion handelt es sich um ein Gründungselement, so dass die Bezeichnung Brücke nur sehr bedingt zutrifft. Da die Konstruktion vollständig im Boden bzw. unterhalb des Schotterbettes liegt, können insbesondere die Temperaturansätze, die in der DS 804 [2] und in der DIN 1072 [3] für Brücken aus Stahlbeton vorgesehen sind, nicht unmittelbar für die vorgesehene Konstruktion der „Brücke im Damm“ angesetzt werden. Durch den umgebenden Boden und das Schotterbett liegen deutlich günstigere Verhältnisse vor als bei einer von Luft umgebenen und direkt der Sonneneinstrahlung ausgesetzten Brücke.

Für die hier vorliegende Konstruktion wurden die Temperaturansätze der ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 2 [4] für Trogbauwerke als Grundlage für die Festlegung geeigneter Temperaturansätze herangezogen. Eine Anpassung dieser Temperaturansätze wurde vorgenommen, um die Besonderheiten der vorliegenden Konstruktion zu berücksichtigen. Die günstige Wirkung des Schotterbettes wurde bei der Änderung der Schwerpunkttemperatur ΔT_N mit einer Reduzierung der Werte der ZTV-ING um 5 K berücksichtigt. Damit ergaben sich folgende Werte für die Temperaturschwankung:

$$\Delta T_{N,\text{pos}} = +7,5 \text{ K} \quad \text{und} \quad \Delta T_{N,\text{neg}} = -10,0 \text{ K}$$

Für die lineare Temperaturdifferenz über den Querschnitt ΔT_M wurden folgende Werte angesetzt:

$$\Delta T_{M, \text{pos}} = +10,0 \text{ K} \quad \text{und} \quad \Delta T_{M, \text{neg}} = -12,5 \text{ K}$$

Mit diesen Temperaturansätzen wurden die Schnittgrößen für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ermittelt. In der statischen Berechnung wurden Grenzwertbetrachtungen für die horizontale Bettung der Bohrpfähle angestellt. Durch die monolithische Verbindung der „Brücke im Damm“ mit dem Widerlager der Enzbrücke konnte auf einen Schienenauszug verzichtet werden.

Die Enzbrücke und die sich anschließende "Brücke im Damm" wurden auf der im Auftrag des Bauherrn erstellten Ausführungsplanung in den Jahren 2004 bis 2006 erstellt. Mit der Fertigstellung begann die kontinuierliche Erfassung der Temperaturdaten und die Messung der Bauwerksverformungen zu ausgewählten Zeitpunkten.

2. Messkonzept und Messergebnisse

2.1 Entwickeltes Messkonzept

Zur Verifikation der in der gutachterlichen Stellungnahme vorgeschlagenen Werte für die Temperatureinwirkungen für die „Brücke im Damm“ wurde ein Messkonzept zur Durchführung von Langzeitmessungen erarbeitet. Dieses umfasst sowohl kontinuierliche Temperaturmessungen als auch punktuelle Verformungsmessungen. Mit der Erfassung der Temperatur und der Erfassung der auftretenden Verformungen des Bauwerks können zum einen die vorgeschlagenen Temperatureinwirkungen verifiziert werden, zum anderen aber auch der Zusammenhang zwischen Temperatur und Verformung nachvollzogen werden.

Zur Erfassung und Auswertung der Temperaturverteilung über den Plattenquerschnitt wurden drei Messfühler über die Plattenhöhe (als Messgruppe bezeichnet, siehe Abbildung 2) an je drei Stellen in Bauwerkslängsrichtung eingebaut (siehe Abbildung 3).

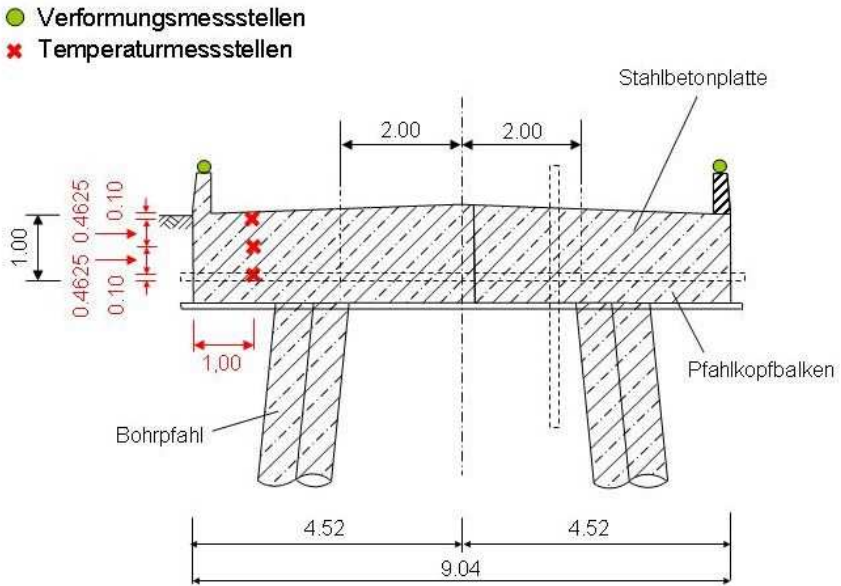


Abb. 2: Messsensoren im Querschnitt (Messgruppe)

Von primärer Bedeutung für die Beanspruchung der Konstruktion ist die Temperatureinwirkung. Damit verformt sich die Konstruktion infolge Temperatureinwirkung nicht nur in Längsrichtung sondern auch senkrecht zur Plattenmittelebene. Die hieraus resultierenden Biegeverformungen der Durchlaufplatte sind infolge der großen Plattendicke jedoch klein und können vernachlässigt werden.

Die Bestimmung der Verformung in Längsrichtung erfolgt durch die Messung der Änderung der horizontalen Lage von Messpunkten (in Plattenmittelebene), die auf der Aufkantung der Stahlbetonplatte befestigt werden. Die mit dem Messkonzept erfassten Vertikalverformungen resultieren primär aus den Setzungen der Pfahlgründung. Diese Verformungen senkrecht zur Plattenebene liegen im Bereich weniger Millimeter und sind damit vernachlässigbar klein.

Die Messung bzw. Vermessung der Messpunkte wurde mit einem Theodoliten durchgeführt. Die Messung erfolgte nicht kontinuierlich und musste auf bestimmte Tage und Tageszeiten festgelegt werden, um den Verformungszustand des Bauwerks als Ganzes zu einem bestimmten Zeitpunkt bestimmen zu können und auch um die Verformungsmessungen mit den Tempera-

turmessungen zu einem bestimmten Zeitpunkt korrelieren zu können. Aus dieser Forderung ergibt sich eine maximale Anzahl von Messpunkten, die innerhalb eines tolerierbaren Zeitfensters gemessen werden können.

Auf den seitlichen Aufkantungungen der Platte wurden Messpunkte paarweise gegenüberliegend entlang der Pfahlkopfbalkenachse angeordnet. Ergänzend wurden einzelne Messpunkte unmittelbar im Bereich der Temperaturfühler an einer Aufkantung der Felder 2, 7 und 12 in Feldmitte befestigt (siehe Abbildung 3).

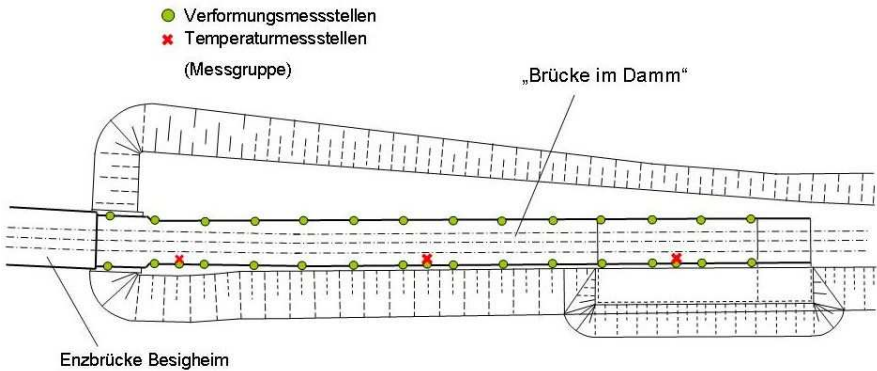


Abb. 3: Lage mit Messsensoren in Bauwerkslängsrichtung

2.2 Messergebnisse

Die Temperaturmessungen erfolgten jeweils in 3 Messgruppen zu je drei Messfühlern (Thermoelemente NiCr-Ni, Typ K). Die Thermoelemente wurden bei der Fertigung der Stahlbetonplatte einbetoniert. Eine sichere Lage der Messstellen während und nach dem Betonieren wurde durch die Fixierung der Thermoelemente am Bewehrungskorb der Platte gewährleistet. Ein direkter Kontakt zwischen Bewehrungsseisen und Thermoelementen wurde durch Hüllröhrchen, in denen die Thermodrähte aus der Platte geführt wurden, verhindert. Mit einem Datenlogger wurden sämtliche Temperaturdaten der 3 Messgruppen gespeichert. Die Messdaten konnten nach Bedarf aus dem Datenlogger über ein GSM Modem abgefragt werden. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Temperaturmessungen über einen Zeitraum von 1,5 Jahren dargestellt. Die Temperaturen der drei Messgruppen an der Plattenober- und -unterseite sowie in deren Mitte wurden zur besseren Übersichtlichkeit zu Mittelwerten zusammengefasst.

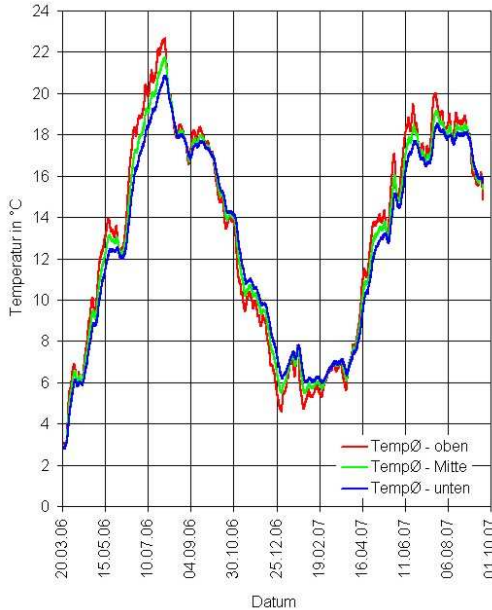


Abb. 4: Mittelwerte der Temperatur aus 3 Messgruppen

Bei Auswertung der Messdaten wurden für die konstante Temperaturänderung im Schwerpunkt der Stahlbetonplatte folgende Werte festgestellt (Mittelwerte aus drei Messgruppen):

$$T_{N,\max} = +21,8 \text{ K und } T_{N,\min} = +2,8 \text{ K} \\ \Rightarrow \Delta T_N = +19,0 \text{ K}$$

Damit ergeben sich folgende Temperaturschwankungen gegenüber einer Aufstelltemperatur von 15°C :

$$T_{N,\text{pos}} = +21,8 \text{ K} - 15 = +6,8 \text{ K} < +7,5 \text{ K} \\ T_{N,\text{neg}} = +2,8 \text{ K} - 15 = -12,2 \text{ K} < -10,0 \text{ K}$$

Die gemessenen Temperaturwerte entsprechen somit in etwa den in der statischen Berechnung angesetzten Werten (vgl. Abschnitt 1).

Für die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite der Stahlbetonplatte ergaben sich folgende Werte:

$$T_{M,\max} = +2,7 \text{ K} \ll +10 \text{ K} \\ T_{M,\min} = -1,9 \text{ K} \gg -12,5 \text{ K}$$

Diese Werte liegen deutlich unter den für die Nachweise im Rahmen der statischen Berechnung empfohlenen und angesetzten Werte für die Einwirkungen aus Temperatur (vgl. Abschnitt 1).

Die Ergebnisse der Verformungsmessungen zeigten, dass sich weder innerhalb eines Tages, noch im Wechsel der Jahreszeiten vertikale Verformungen der Messpunkte ergeben, die von praktischer Relevanz wären. Aus den Verformungsmessungen in Plattenebene, d. h. aus der horizontalen Lage der Messpunkte lässt sich hingegen ein Trend ablesen, der sowohl tageszeitliche als auch jahreszeitliche temperaturbedingte Formänderungen bestätigt. Die maximale jahreszeitliche Längenänderung in Brückenlängsrichtung beträgt $\Delta l_{\text{mess}} = 17 \text{ mm}$.

3. Rechnerische Untersuchungen

3.1 Temperaturverlauf über den Querschnitt

Zur Verifizierung der gemessenen Temperaturverläufe über die Dicke der Stahlbetonplatte wurden numerische Berechnungen mit Hilfe des Finite-Element-Programmsystems ADINA-T durchgeführt. In dem verwendeten zweidimensionalen Modellquerschnitt wurde der Schichtenaufbau des Systems, bestehend aus Oberbauschotter, Betonquerschnitt und den anstehenden Bodenschichten bis in eine Tiefe von 10 m modelliert. Die maßgeblichen Materialkennwerte Wärmekapazität c_p sowie Wärmeleitfähigkeit λ wurden der Literatur [5] entnommen.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch eine sommerliche Temperaturverteilung im Betonquerschnitt. Die berechneten Werte liegen in der Größenordnung der gemessenen Temperaturen, d.h. es ergeben sich deutlich geringere Werte als die in den statischen Nachweisen angesetzten linearen Temperaturdifferenzen. Allerdings weisen sie Abweichungen von bis zu ca. 18 % zu den gemessenen Werten auf. Die Differenzen resultieren aus der Problematik eines realistischen Ansatzes für die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des haufwerksporigen Schotterbettes sowie Modellunsicherheiten bezüglich des rechnerischen Ansatzes der klimatischen Komponenten Strahlung und Konvektion. Für die Beurteilung der gemessenen Werte im Vergleich zu den in der statischen Berechnung angesetzten Werten ist dies jedoch unerheblich.

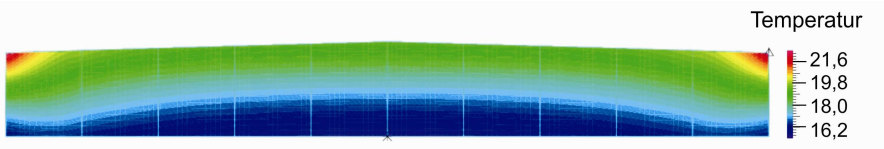


Abb. 5: Beispielhafte sommerliche Temperaturverteilung in der Stahlbetonplatte

Durch FE-Berechnungen mit geeigneter Elementierung des Betonquerschnittes, die mithilfe von Parameterstudien gefunden wurde, kann gezeigt werden, dass der Temperaturverlauf über den Querschnitt nichtlinear verläuft (siehe Abb. 6). Dies gilt insbesondere im Winter für den Fall „unten wärmer als oben“ ($\Delta T_{M,neg}$). Die Ursache hierfür liegt in dem großen Wärmespeichervermögen des direkt anstehenden Bodens und der daraus resultierenden Trägheit des Gesamtsystems. In baupraktischer Hinsicht erscheint jedoch die näherungsweise lineare Betrachtung beider Verläufe (Sommer und Winter) als gerechtfertigt.

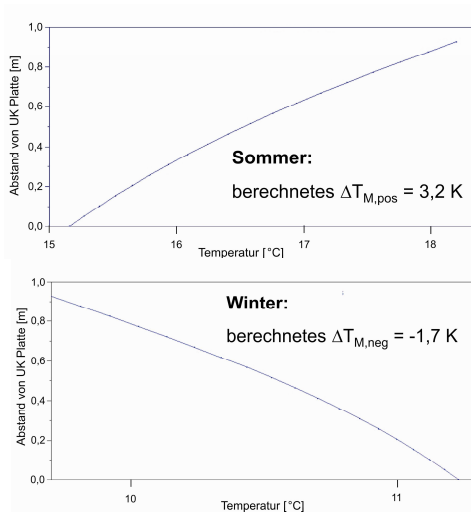


Abb. 6: Temperaturverlauf über den Querschnitt im Sommer (oben) und Winter (unten)

3.2 Verformung in Brückenlängsrichtung

Neben der numerischen Betrachtung der Temperaturverteilung über die Querschnittshöhe wurden auch rechnerische Untersuchungen zur Verifikation der Verformungsmessungen durchgeführt. Dabei wurde lediglich auf

die horizontale Verformung in Längsrichtung abgestellt. Die Auswirkungen der Änderung der Schwerpunktstemperatur wurden an einem ebenen Stabwerk (Rahmen) mit linear-elastischer Schnittgrößenermittlung untersucht. Für alle Rahmenbauteile wurden die Steifigkeiten im Zustand I angesetzt. Die Rahmenstiele erhielten die Steifigkeiten von zwei in einer Auflagerachse liegenden Großbohrpfähle, den Rahmenriegeln liegen die Steifigkeiten des Überbauquerschnitts zu Grunde.

Bei der „Brücke im Damm“ handelt es sich um eine integrale Konstruktion, die statisch als Rahmensystem mit horizontal gebetteten Stielen wirkt und die Besonderheit aufweist, dass diese vollständig hinterfüllt sind; d.h. es existiert kein Lichtraum zwischen den einzelnen Stützungen (Pfahlachsen). Dies wirkt sich auf den Verlauf der horizontalen Pfahlbettung vor allem im Pfahlkopfbereich aus, in dem die Bettung nicht - wie üblicherweise angenommen - linear verläuft, sondern näherungsweise als konstant betrachtet werden kann. Im Rahmen der Berechnung der horizontalen Gesamtverformung wurde eine Parameterstudie mit verschiedenen Bettungsansätzen durchgeführt (siehe Abbildung 7).

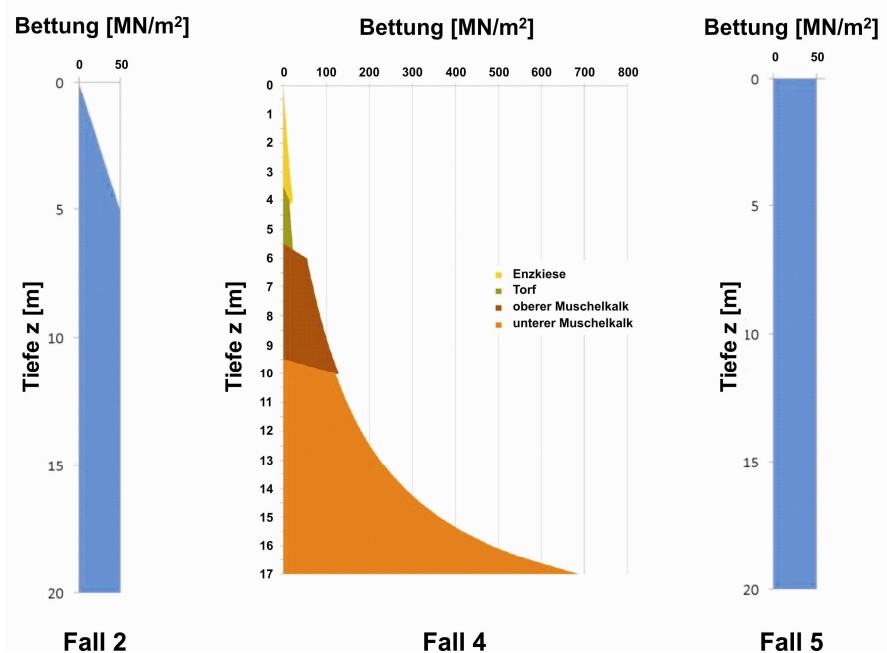


Abb. 7: Verwendete Ansätze für die horizontale Pfahlbettung (Darstellung Fälle 2, 4 und 5)

Um die gemessenen und berechneten horizontalen Verformungen miteinander vergleichen zu können, wurde als Einwirkung die Temperaturschwankung ΔT_N zwischen den beiden Messzeitpunkten (25.7.06 und 09.03.07) gewählt. Diese beträgt im Mittel über die drei Temperaturmessquerschnitte $\Delta T_{N,real} = 14$ K. Die zugehörig gemessene Verformung in Brückenlängsrichtung zwischen den beiden Messpunkten (Abstand 131 m) beträgt $\Delta l_{mess} = 17$ mm.

Der gemessenen Verformung wurde die errechnete Verformung gegenübergestellt. Hinsichtlich der Variation der horizontalen Bettung können als Grenzfälle die beiden Fälle „ohne horizontale Pfahlbettung“ und „Pfahlbettung über gesamte Pfahlänge konstant“ angesehen werden. Die Ergebnisse der berechneten horizontalen Verformung für fünf verschiedene Bettungsansätze sind in Tabelle 1 dargestellt und der gemessenen Verformung gegenübergestellt.

Tabelle 1. Ergebnisse der Verformungsberechnungen für verschiedene Ansätze der horizontalen Pfahlbettung (vgl. auch Abbildung 7)

Fall	Bettungsansatz	Δl_{calc} [mm]	Abweichung zu gemessenem Wert $\Delta l_{mess} = 17$ mm
1	Pfähle ohne horizontale Bettung	18,20	1,2 mm \triangleq 7,1%
2	Pfahlbettung oben auf 5 m linear unten konstant 50 MN/m ²	17,65	3,8%
3	Pfahlbettung oben auf 5 m linear unten konstant 100 MN/m ²	17,30	1,8%
4	Pfahlbettung abschnittsweise in Abhängigkeit des Erdwiderstandes	17,96	5,6%
5	Pfahlbettung über gesamte Länge konstant 50 MN/m ²	17,28	1,6%

4. Beurteilung und Zusammenfassung

Die „Brücke im Damm“ ist inzwischen seit fast zwei Jahren in Betrieb. Während dieser Zeit wurden kontinuierlich Temperaturmessungen und zu ausgewählten Zeitpunkten Verformungsmessungen durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten haben gezeigt, dass die in der statischen Berechnung angesetzten Temperatureinwirkungen wie auch die vom Baugrundgutachter angegebenen Bodenkennwerte gut mit den gemessenen Werten überein-

stimmen. Darüber hinaus wurde für die Planung vergleichbarer Bauwerke eine belastbare Datenbasis geschaffen.

Die im Rahmen der Berechnungen angesetzten ungerissenen Steifigkeiten der Stahlbetonkonstruktion in Verbindung mit der gewählten horizontalen Bettung der Bohrpfähle können als vertretbar betrachtet werden. Aufgrund der vollständig vorhandenen Hinterfüllung zwischen den Auflagerachsen bis zur Unterkante des Überbauquerschnittes erscheint die Annahme einer konstanten Bettung über die gesamte Pfahlänge plausibel. Die gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Verformungswerte für diesen Bettungsansatz zeigt dies deutlich, wobei die Bettung in Anbetracht der geringen Steifigkeit des anstehenden Baugrundes und der Pfahlgründungen nur einen geringen Einfluss auf die Horizontalverformungen in Bauwerkslängsrichtung hat, vgl. Tabelle 1. Im Gegensatz hierzu hat der Temperaturgradient ΔT_M erheblichen Einfluss auf die Bemessungsschnittgrößen. Hier haben die Messungen und die numerischen Berechnungen gezeigt, dass die gewählten Ansätze zu einer sicheren Bemessung führen.

Die gewählten und vorgeschlagenen Ansätze für die Temperatureinwirkungen in Anlehnung an die ZTV-ING stellen unter Berücksichtigung der Messdaten geeignete Temperaturansätze dar und führen zu einer technisch und wirtschaftlich sinnvollen Konstruktion. Für Projekte mit vergleichbaren Gründungs- und Lagerungsbedingungen können die vorgeschlagenen Temperatur- und Bettungsansätze nach einer projektbezogenen Anpassung grundsätzlich übernommen werden. Dabei ist jedoch, wie bei der Berechnung aller integralen Konstruktionen aus Stahlbeton, auf eine wirklichkeitsnahe Abbildung der jeweils vorliegenden Randbedingungen im Rechenmodell zu achten.

Projektbeteiligte

Bauherr:	DB Projektbau GmbH im Auftrag der Deutschen Bahn AG
Planung:	Krebs & Kiefer Beratende Ingenieure für das Bauwesen, Karlsruhe
Baustatische Prüfung:	Prof. Dipl.-Ing. Frank-Ulrich Drexler, Stuttgart
Ausführung:	ARGE Bahnbrücke Besigheim: Karl Köhler GmbH / Harsch Bau GmbH & Co. KG / Frenzel-Bau GmbH

Baugrundgutachter:	Smolczyk & Partner GmbH, Stuttgart Dipl.-Ing. Keutner, Ing.-Büro für Geotechnik, Stuttgart
Projektsteuerung:	BUNG Ingenieure AG, Stuttgart
Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg

Literatur

- [1] DIN 1045: 1988-07. Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1988
- [2] DS 804: Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke (VEI), Deutsche Bahn, gültig ab 01.01.1983
- [3] DIN 1072: 1985-12. Straßen- und Wegbrücken – Lastannahmen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1985.
- [4] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5: Tunnelbau, Abschnitt 2: Offene Bauweise. Verkehrsblatt Verlag, Dortmund, 2006
- [5] Landolt, H. und Börnstein, R.: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. IV. Band: Technik, 4. Teil: Wärmetechnik, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1967