

Lagerwege von Brücken

FA 15.537

Forschungsstellen: Maurer Engineering GmbH, München

Schimetta Consult Ziviltechnik GmbH,
Wien

Bearbeiter: Butz, C. / Mack, T. / Krawtschuk, A. /
Maladonado, E.

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt),
Bergisch Gladbach

Abschluss: Juni 2019

1 Einleitung

Der ständige Wechsel der klimatischen Einflüsse verursacht in Bauwerken instationäre, nichtlinear begrenzte Temperaturverteilungen. Durch diese Temperaturzustände entstehen thermische Dehnungen im Bauwerk, die in statisch bestimmt gelagerten Tragwerken Verformungen und bei statisch unbestimmter Lagerung zusätzliche Zwangsbeanspruchungen hervorrufen. Neben den klimatischen Temperaturänderungen zählen das Abfließen der Hydratationswärme bei Beton- und Verbundbauwerken sowie der Einbau des Fahrbahnbelags zu den durch Wärme verursachten Beanspruchungen. Temperaturbeanspruchungen sind veränderliche Einwirkungen.

Durch die Anwendung von Berechnungsmethoden und Eingangsparametern nach aktuellen Normen kann im Regelfall davon ausgegangen werden, dass die Lagerwege aus der Bemessung ausreichende Reserven aufweisen. Um diese Reserven zu quantifizieren, werden Messungen an verschiedenen Brücken mit unterschiedlichen Bauweisen durchgeführt.

2 Temperaturinduzierte Lagerwege nach DIN EN 1991-1-5

Bei Straßen-, Geh- und Radwegbrücken sowie bei Eisenbahnbrücken werden in der Regel nur der lineare und der konstante Temperaturanteil berücksichtigt. In Sonderfällen ist auch der nichtlineare Temperaturanteil zu betrachten. Entsprechend dem Eurocode-Konzept werden die charakteristischen Extremwerte der Außenlufttemperatur statistisch gesehen einmal in 50 Jahren erreicht. Die zur Berechnung der Einwirkung auf Tragwerke durch Temperatur relevanten Daten sind in der DIN EN 1991-1-5 sowie im nationalen Anhang DIN EN 1991-1-5/NA beschrieben. In Deutschland beträgt der konstante Temperaturanteil der minimalen Außenlufttemperatur $T_{\min} -24\text{ °C}$ und der der maximalen Außenlufttemperatur $T_{\max} +37\text{ °C}$. Es gelten deutschlandweit dieselben Außenlufttemperaturen. Für die Berechnung des konstanten Bauwerkstemperaturanteils ist aus der DIN EN 1991-1-5 ein Brückentyp zu wählen. Es werden drei Typen nach dem Konstruktionsmaterial unterschieden, das heißt Stahlbrücke, Verbundbrücke und Betonbrücke.

Für die Ermittlung von Lagerkräften und Verformungen werden in Deutschland die konstanten Temperaturanteile gemäß DIN EN 1990/NA/A1, NA.E.5.2.2 verwendet. Der minimale und maximale Temperaturanteil der Brücke kann aus der DIN EN 1991-1-5, Abschnitt 6.1.3.1, Bild 6.1 entnommen werden. Es werden die Korrelationen zwischen minimaler/maximaler Außenluft-

temperatur und minimalen und maximalen konstanten Temperaturanteilen für Brücken in Abhängigkeit des Brückentyps festgelegt.

Aufgrund der Unsicherheiten bei der Einlagerung des Tragwerks wird zusätzlich der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_F = 1,35$ sowie ein Brückentypabhängiger Sicherheitszuschlag berücksichtigt. Für die Bestimmung der Aufstelltemperatur T_0 sollte die Temperatur angenommen werden, bei der die Zwängung auftritt (Fertigstellung). Wenn dies nicht vorhersagbar ist, sollte die während der Tragwerkerrichtung vorherrschende Durchschnittstemperatur verwendet werden. Wenn keine Informationen verfügbar sind, kann T_0 mit 10 °C angenommen werden. Da die genaue Aufstelltemperatur in der Regel nicht bekannt ist und für die Voreinstellung der Lager ein Sicherheitszuschlag berücksichtigt wird, wird zusätzlich ein Temperaturzuschlag von $\pm 20\text{ K}$ angesetzt.

In weiterer Folge ist die Berücksichtigung der Belagsart und Belagsdicke für die Temperaturentwicklung in einer Brücke von Bedeutung. Durch die abschirmende Wirkung von Fahrbahnbelägen wird der vertikale Temperaturgradient im Brückenquerschnitt durch die Belagseinbaudicke beeinflusst. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass insbesondere bei Asphaltbelägen und starker Sonneneinstrahlung bei hohen Lufttemperaturen in der Vergangenheit auch im Einzelfall Bauwerkstemperaturen im Bereich der Bemessungswerte erfasst wurden. Diese Beeinflussungen müssen durch einen entsprechenden Dickenabhängigkeitsfaktor K_{Sur} berücksichtigt werden. Die genannten Temperaturanteile ergeben in Summe ein Temperaturfeld, welches auf das Brückenbauwerk einwirkt.

3 Monitoring

Es wurden insgesamt vier Brücken (siehe Tabelle 1) in Nordbayern an Standorten, wo hohe Temperaturunterschiede zwischen Sommer und Winter auftreten, untersucht.

Tabelle 1: Referenzbrücken

Nr.	Name	Material	Ort	Bauart	Länge
1	Hangbrücke Würgau	Stahlverbund	Würgau	Plattenbalken	425,4 m
2	Hangbrücke Würgau	Beton	Würgau	Plattenbalken	403,0 m
3	Trubbachbrücke	Beton	Forchheim	Plattenbalken	95,0 m
4	Paradiestalbrücke	Beton	Wölkendorf	Plattenbalken	27,1 m

Ziel ist es, Lagerverschiebungen und Bauwerkstemperaturen an Brücken mit unterschiedlichen Werkstoffen und Fahrbahnbelägen zu messen. Daher wurden die Referenzbrücken mit Monitoringsystemen ausgestattet, um Lagerverschiebungen und Bauwerkstemperaturen zu messen. Die Monitoringsysteme erfüllen folgende grundsätzliche Anforderungen:

- Direkte Messung der untersuchten Parameter,
- Flexible erweiterbare Systemarchitektur,
- Langzeitstabilität unter den realen Betriebs- und Witterungsbedingungen und

- Batteriebetrieben und damit unabhängig von Stromanschluss und Stromausfällen.

Angepasst an die Aufgabenstellung und die statischen Systeme der Brücken, der Zugangsmöglichkeiten sowie der Infrastruktur wurden folgende Monitoring-Komponenten pro Brücke ausgewählt:

- Schaltschrank/Basisstation,
- Datenlogger mit Batterien,
- Datenfernübertragung per Mobilfunk,
- Drei Wegaufnehmer und fünf Temperatursensoren und
- Verkabelung.

Das Messsystem ist wartungsarm. Es wurden die Lager mit maximalem Abstand zum Festlager instrumentiert. Die für Wartungszwecke zugängliche Basisstation befindet sich in der Nähe der instrumentierten Lager. Die Temperatursensoren im Beton

befinden sich ebenfalls in der Nähe der Lager, sodass die Länge der Kabel minimal ist.

Die Monitoringsysteme wurden am 01.06.2017 in Betrieb genommen. Die Messdaten wurden bis zum 27.01.2019 bezogen und ausgewertet.

4 Ergebnisse

4.1 Messwerte

Die gemessenen Bauwerkstemperaturen (siehe Bild 1) zeigen typische jahreszeitliche sowie tageszeitliche Veränderungen auf. Im Messzeitraum trat im Winter 2018 eine Kältewelle auf mit Höhepunkt Februar/März sowie eine überdurchschnittliche Hitzeperiode im Sommer 2018. In Tabelle 2 werden die gemessenen Extremwerte der Bauwerkstemperatur $T_{e,max,gem}$ und $T_{e,min,gem}$ die statistisch ausgewerteten Luftschattentemperaturen $T_{max,DWD}$ und $T_{min,DWD}$ die gemessenen Lagerwege ΔL_{gem} und die ermittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T,gem}$ dargestellt.

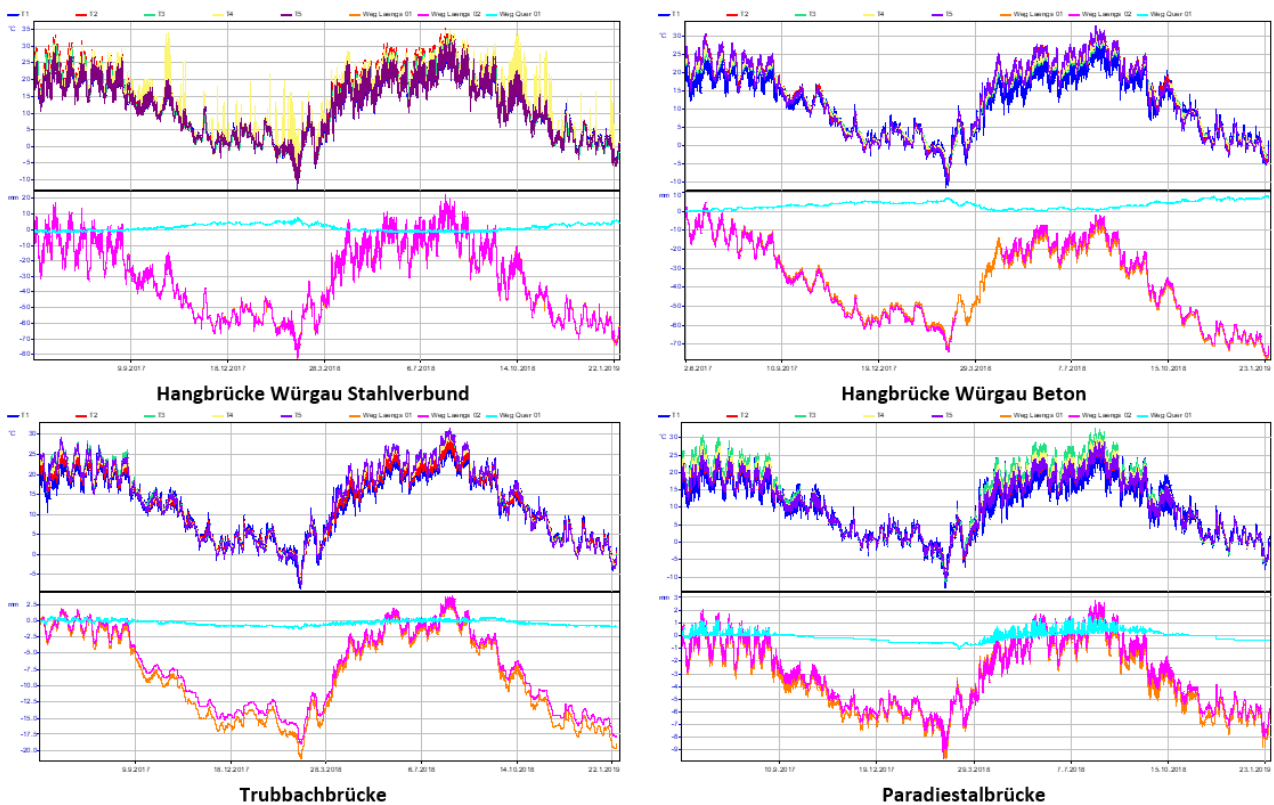


Bild 1: Gemessene Temperaturverläufe und Lagerverschiebungen an den Referenzbrücken

Tabelle 2: Messwerte der Temperatur, der Lagerwege und der Wärmeausdehnungskoeffizienten sowie statistisch ausgewertete Standorttemperaturen

Brücke	Temperatur [°C]				ΔL_{gem} [mm]	$\alpha_{T,gem}$ [1/K]
	$T_{e,max,gem}$	$T_{e,min,gem}$	$T_{max,DWD}$	$T_{min,DWD}$		
Hangbrücke Würgau (Stahlverbund)	35,4	-12,4	38,9	-28,6	104	$1,24 \cdot 10^{-5}$
Hangbrücke Würgau (Beton)	32,7	-9,7				
Trubbachbrücke (Beton)	31,5	-7,5	39,6	-27,2	23-25	$0,94 \cdot 10^{-5}$
Paradiestälbrücke (Beton)	32,8	-11,4	38,9	-28,2	12,5	$1,05 \cdot 10^{-5}$

Bei keiner Brücke wurden die Bemessungsbauwerkstemperaturen nach DIN EN 1991-1-5 erreicht. Die statistisch ermittelten Außenlufttemperaturen an den Standorten sind im Vergleich zu den Werten nach DIN EN 1991-1-5, NDP zu 6.1.3.2, das heißt $T_{\min} = -24\text{ °C}$ und $T_{\max} = 37\text{ °C}$, ungünstiger. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten zeigen Abweichungen von -6 bis +17 % von den Werten nach Norm ab, das heißt $\alpha_{T,EC}$ ist $1,2 \times 10^{-5}\text{ 1/K}$ für Stahlverbundbrücken und $1,0 \times 10^{-5}\text{ 1/K}$ für Betonbrücken.

4.2 Vergleich von gemessenen mit berechneten Lagerwegen

Um den Berechnungsansatz für temperaturinduzierte Brückenlängenänderungen nach DIN EN 1991-1-5 zu prüfen, werden anhand der gemessenen Änderungen des konstanten Anteils der

Bauwerkstemperatur $\Delta T_{N,con,Dil}$ und $\Delta T_{N,exp,Dil}$ und normativen sowie ermittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T die Lagerwegdifferenz ΔL_{ges} berechnet und den gemessenen gegenübergestellt (siehe Tabelle 3). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Die Abweichung zwischen mit ermittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten berechneten und den tatsächlichen Lagerwegdifferenzen lässt sich erklären mit der getroffenen Annahme, dass die maximal gemessene Bauwerkstemperatur dem konstanten Anteil der Bauwerkstemperatur entspricht. Die Abweichung zwischen mit normativen Wärmeausdehnungskoeffizienten berechneten und tatsächlichen Lagerwegdifferenzen beträgt -7 bis +6 %, was eine sehr gute Übereinstimmung ist. Auch hier kann zu dieser Abweichung die Annahme der Bauwerkstemperatur als konstanter Temperaturanteil führen.

Tabelle 3: Vergleich von gemessenen mit berechneten Lagerwegen

	Hangbrücke Würgau		Hangbrücke Würgau		Trubbachbrücke		Paradiestabbrücke	
	Stahlverbund		Beton		Beton		Beton	
	Norm	Messwert	Norm	Messwert	Norm	Messwert	Norm	Messwert
$\alpha_T \times 10^5\text{ [1/°K]}$	1,20	1,24	1,00	1,17	1,00	0,94	1,00	1,05
$\Delta T_{N,con,Dil,gem}\text{ [°C]}$	-12,4		-9,7		-7,5		-11,4	
$\Delta T_{N,exp,Dil,gem}\text{ [°C]}$	35,4		32,7		31,5		32,8	
$\Delta L_{ges,ber}\text{ [mm]}$	105,9	109,4	77,2	90,3	26,3	24,7	12,0	12,6
$\Delta L_{ges,gem}\text{ [mm]}$	104,4		82,4		24,8		12,5	
$L_{ges,ber}/L_{ges,gem}$	1,01	1,05	0,93	1,09	1,06	1,0	0,96	1,01

4.3 Vergleich Längenänderung infolge Temperatur

Zur Überprüfung der normativen Werte für die Temperatur als Einwirkung werden anhand der nach DIN EN 1991-1-5 und DIN EN 1991-1-5/NA vorgegebenen Bemessungswerte der Luftschattentemperatur und den mit den Daten des Deutschen Wetterdiensts statistisch ermittelten Bemessungswerte der Luftschattentemperatur am Standort die Lagerwegdifferenz nach der Berechnungsmethode nach DIN EN 1991-1-5 durchgeführt (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Vergleich der berechneten Lagerwegdifferenz infolge Temperatur nach DIN EN 1991-1-5 und DIN EN 1991-1-5/NA und standortbezogenen Werten

	Würgau Stahlverbund		Würgau Beton		Trubbachbrücke		Paradiestabbrücke	
	Norm	Standort	Norm	Standort	Norm	Standort	Norm	Messung
$\alpha_T \times 10^5\text{ [1/°K]}$	1,20		1,00		1,00		1,00	
$T_{\min}\text{ [°C]}$	-24	-28,6	-24	-28,6	-24	-27,2	-24	-28,5
$T_{\max}\text{ [°C]}$	+37	+38,9	+37	+38,9	+37	39,6	+37	+38,9
$\Delta T_{N,con,Dil}\text{ [°C]}$	-50,5	-56,7	-45,1	-51,3	-45,1	-49,4	-45,1	-50,8
$\Delta T_{N,exp,Dil}\text{ [°C]}$	+51,9	+54,4	49,2	51,7	+49,2	+52,7	+49,2	+51,7
$\Delta L_{ges,d,EC}\text{ [mm]}$	227	246	172	188	64	69	26	28
$\Delta L_{ges,d,Statik}\text{ [mm]}$	231		208		64		27	
Standort/Norm	1,08		1,09		1,08		1,08	

Es zeigt sich, dass aufgrund der konservativeren standortbezogenen Bemessungstemperaturen die Lagerwegdifferenz um bis zu 9 % zunimmt. Bezogen auf den nach damaligen statischen Berechnungen ermittelten Lagerwegdifferenzen sind diese für die Hangbrücke Würgau in Stahlverbundbauweise um 6,5 % größer und für die Trubbachbrücke in Betonbauweise um 7,8 % größer. Die Hangbrücke Würgau in Betonbauweise und die Paradiestabbrücke weisen ausreichend Lagerwegkapazität aus.

4.4 Korrelation der Außenluft zur Bauwerkstemperatur

Anhand der Messwerte im Brückendeck und an der Basisstation als Referenzwert für die Außenlufttemperatur wurde die Korrelation zwischen Außenluft- zu Bauwerkstemperatur für die Referenzbrücken ermittelt und mit den Angaben nach DIN EN 1991-1-5 verglichen. Eine Korrelation zwischen gemessener Bauwerkstemperatur und Luftschattentemperatur konnte bestätigt werden, indem gezeigt wurde, dass die gemessenen Tragwerkstemperaturen den Außenlufttemperaturen mit einer gewissen Verzögerung aufgrund der großen Masse folgen und sich Spitzen in der Außenluft bei den Bauwerkstemperaturen eher abgerundet darstellen. Es zeigen sich nur geringe Abweichungen bei zunehmender oder abnehmender Temperatur; Mittelwertlinien verlaufen größtenteils parallel.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die an vier Brücken über 19 Monate gemessenen Temperaturen und Lagerwege liefern wertvolle Informationen zum temperaturinduzierten Verformungsverhalten realer Brücken und den hervorgerufenen Lagerverschiebungen. Die gemessenen Lagerwege sind deutlich geringer als die Kapazität der Lager sowie der nach aktuellen Normen berechneten temperaturinduzierten Verschiebungen. Aufgrund des kurzen Messzeitraums kann keine statistische Auswertung der Messwerte durchgeführt werden.

Umwelt- und Standorteinflüsse, wie einseitige Sonneneinstrahlung aufgrund der Bauwerkslage oder querende Gewässer unterhalb des Bauwerks, beeinflussen die oberflächliche Bauwerkstemperatur und somit die Lagerverdrehung, haben jedoch keinen nennenswerten Einfluss auf die Lagerverschiebung.

Die anhand der Messwerte ermittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten weichen zwischen -6 und +17 % von den normativen Werten ab. Allerdings ist die Anzahl der untersuchten Objekte zu gering, um allgemeingültige Wärmeausdehnungskoeffizienten für Beton- und Stahlverbundbrücken zu ermitteln.

Eine Berechnung der Lagerwege mit dem Berechnungsmodell nach DIN EN 1991-1-5 und gemessenen Bauwerkstemperaturen bestätigt eine gute Übereinstimmung.

Mithilfe jährlicher Extremwerte der Lufttemperaturen naheliegender Wetterstationen des Deutschen Wetterdiensts wurden standortbezogene Bemessungswerte der Luftschattentemperatur mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von $p = 0,02$ ermittelt. Die standortbezogenen Maximaltemperaturen sind um ca. 2 °C größer, während die Minimaltemperaturen um ca. -4,5 °C kleiner sind. Eine Berechnung nach DIN EN 1991-1-5 mit diesen standortbezogenen Bemessungstemperaturen führt zu ca. 8 % größeren Lagerwegen.

Es wird empfohlen, die Bemessungswerte der Außenlufttemperatur für Deutschland kleinskaliger und mit den Klimadaten der letzten drei Jahrzehnte auszuwerten, um Abweichungen zu den gültigen Werten zu identifizieren. Basierend auf dieser Untersuchung kann der Handlungsbedarf einer Aktualisierung der Temperaturkarte für Deutschland im Nationalen Anhang zu DIN EN 1991-1-5 ermittelt werden. Auch sollten die Wärmeausdehnungskoeffizienten von weiteren Brücken anhand von Messdaten ermittelt werden, um die normativen Werte zu prüfen.