

Lagerwege von Brücken

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 161

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving them a 3D appearance as if they are floating above a surface.

Lagerwege von Brücken

von

Christiane Butz

Maurer Engineering GmbH
München

Thomas Mack
Alexander Krawtschuk
Eduardo Maldonado

Schimetta Consult ZT GmbH
Wien

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 161

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Berichte der **Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0537
Lagerwege von Brücken

Fachbetreuung
Arnold Hemmert-Halswick

Referat
Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-553-8

Bergisch Gladbach, Februar 2021

Kurzfassung – Abstract

Lagerwege von Brücken

Der ständige Wechsel der klimatischen Einflüsse verursacht in Brücken instationäre Temperaturverteilungen. Dadurch entstehen Dehnungen im Bauwerk, die Verformungen und ggfs. Zwangsbeanspruchungen hervorrufen. Durch die Anwendung von Berechnungsmethoden und Eingangsparameter nach aktuellen Normen sollen die berechneten Lagerwege ausreichende Reserven gegenüber den tatsächlichen aufweisen. Um diese Reserven zu quantifizieren, werden Messungen an verschiedenen Brücken mit unterschiedlichen Bauweisen und Längen durchgeführt.

Die an vier Brücken über 19 Monate gemessenen Temperaturen und Lagerwege sind deutlich geringer als die Kapazität der Lager sowie der nach aktuellen Normen berechneten temperaturinduzierten Verschiebungen.

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

Die ermittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten weichen zwischen -6 % und +17 % von den normativen Werten ab.

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

Mithilfe der Lufttemperaturen naheliegender Wetterstationen des Deutschen Wetterdiensts wurden standortbezogene Bemessungswerte der Luftschattentemperatur ermittelt. Diese 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 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. Auch sollten die Wärmeausdehnungskoeffizienten von weiteren Brücken

anhand von Messdaten ermittelt werden, um die normativen Werte zu prüfen.

Thermal elongation of bridges

The permanent change of climatic influences causes transient temperature distributions in bridges. This causes strains in the structure, which cause deformations and, in some cases, constraining forces. By applying calculation methods and input parameters according to current standards, the calculated bridge elongation should have sufficient reserves compared to the actual ones. In order to quantify these reserves, measurements are made on different bridges of different designs and lengths.

The temperatures and bearing displacements measured on four bridges over 19 months are significantly lower than the displacement capacity of the bearings and the temperature-induced displacements calculated according to current standards.

Environmental and site influences, such as unilateral solar radiation or crossing waters below the structure, influence the temperature at the structure's surface and thus the bearing rotation, but have no measurable influence on the bearing displacement.

The determined coefficients of thermal expansion deviate between -6% and +17% from the normative values.

A calculation of the bridge elongation with the calculation model according to DIN EN 1991-1-5 and measured bridge temperatures confirms a good agreement.

Based on the shade air temperatures of nearby weather stations of the German Weather Service, site-specific characteristic values of the shade air temperature were determined. These maximum temperatures are higher by about 2 °C, while the minimum temperatures are lower by about -4.5 °C. A calculation according to DIN EN 1991-1-5 with these design temperatures leads to approx. 8% larger bridge elongations.

It is recommended to evaluate the design values of the shade air temperature for Germany on a smaller scale and with the climate data of the last three decades in order to identify deviations from the valid values. Also, the coefficients of thermal expansion of other bridges should be determined using measurement data to check the normative values.

Summary

Thermal elongation of bridges

1 Introduction

The permanent change of climatic influences causes transient, non-linearly limited temperature distributions in bridge superstructures. These temperature states generate thermal strains in the structure, which cause deformations in statically determined structures and additional constraining forces in statically indeterminate structures. In addition to the climatic temperature changes, the hydration heat in concrete and composite structures as well as the installation of the road surface causes thermal stresses. Temperature stresses belong to variable actions.

By applying engineering calculation methods and input parameters according to current standards, it can generally be assumed that the design bearing displacement capacities have sufficient reserves. In order to quantify these reserves, measurements are made on different bridges composed of different construction material and having different bridge length.

2 Temperature induced bearing displacements according to DIN EN 1991-1-5

For road, pedestrian and cycle bridges as well as railway bridges, only the linear and constant temperature components are usually taken into account in the bridge design. In special cases, the nonlinear temperature component should also be considered. According to the Eurocode concept, the characteristic extremes of outer shade air temperature statistically occur once every 50 years. The data relevant for the calculation of the temperature effects on structures are described in DIN EN 1991-1-5 as well as in the national annex DIN EN 1991-1-5/NA. In Germany, the constant temperature component of the minimum outer shade air temperature T_{\min} is -24 °C and that of the maximum outside air temperature T_{\max} $+37\text{ °C}$. The same outer shade air temperatures apply throughout

Germany. For the calculation of the constant temperature proportion, a bridge type shall be selected from DIN EN 1991-1-5. Three types are distinguished according to the construction material, i.e. steel bridge, composite bridge and concrete bridge.

For the determination of bearing forces and deformations resp. displacements, i.e. bridge elongation, the constant temperature parts according to DIN EN 1990/NA/A1, NA.E.5.2.2 are considered in Germany. The minimum and maximum temperature of the bridge can be found in DIN EN 1991-1-5, section 6.1.3.1, figure 6.1. The correlation between minimum/maximum outer shade air temperature and minimum and maximum constant bridge temperature in dependence of the bridge type is determined.

Due to the uncertainties in the procedure of installation of bridge bearings, the partial safety factor $\gamma_F = 1.35$ as well as a bridge type-dependent safety margin are also taken into account. To determine the installation temperature T_0 , the temperature at which the installation (completion) takes place should be assumed. If this is unpredictable, the average temperature prevailing during structural erection should be used. If no information is available, T_0 can be assumed to be 10 °C . Since the exact erection temperature is not known in most cases and for the presetting of the bearings, a safety margin is taken into account. Therefore an additional temperature of $\pm 20\text{ K}$ is added.

Subsequently, the consideration of the type of bridge surface and thickness for the temperature development in a bridge is of importance. Due to the shielding effect of road surfaces, the vertical temperature gradient in the bridge cross-section is influenced by the surface thickness. In this context, it should be noted that especially in the case of asphalt pavements and strong solar radiation at high air temperatures in the past, structural temperatures in the range of the design values were recorded in individual cases. These influences must be taken into account by a corresponding thickness dependence factor K_{Sur} . The above-mentioned temperature components result in a total of a temperature field which acts on the bridge structure.

No.	Name	Material	Location	Bridge Type	Length
1	Hangbrücke Würgau	Steel Composite	Würgau	combined truss and plate bridge	425,4 m
2	Hangbrücke Würgau	Concrete	Würgau	combined truss and plate bridge	403,0 m
3	Trubbachbrücke	Concrete	Forchheim	combined truss and plate bridge	95,0 m
4	Paradiestalbrücke	Concrete	Wölkendorf	combined truss and plate bridge	27,1 m

Tab. 1: Reference bridges

3 Monitoring

A total of four bridges (see table 1) were investigated in northern Bavaria at sites where high temperature differences between summer and winter occur.

The aim is to measure bearing displacements and bridge temperatures at bridges with different materials and road surfaces. Therefore, the reference bridges were equipped with monitoring systems to measure bearing displacements, i.e. bridge elongation, and bridge temperatures. The monitoring systems meet the following basic requirements:

- Direct measurement of the investigated parameters,
- flexible extensible system architecture,
- long-term stability under real operating and weather conditions,
- battery-driven and thus independent of connection for power supply and power failures.

Adapted to the task and the structural system of the bridges, the accessibility as well as the infrastructure, the following monitoring components were selected for each bridge:

- Control cabinet/base station,
- data logger with batteries,
- data transmission via mobile radio,
- 3 displacement transducers and 5 temperature sensors,
- cabling.

It is a low maintenance measuring system. The bearings were instrumented with maximum distance to the fixed bearing. The maintenance-accessible base station is located near the instrumented bearings. The temperature sensors in the concrete are also near the bearings, so that the length of the cables is minimal.

The monitoring systems were put into operation on 01.06.2017. The measurement data were obtained and evaluated until 27.01.2019.

4 Results

4.1 Measured data

The measured bridge temperatures (see figure 1) show typical seasonal as well as daytime changes. During the measuring period, a cold wave occurred in the winter of 2018, peaking in February/March and an above-average heat wave in the summer of 2018. Table 2 shows the measured extreme values of the bridge temperature $T_{e,max,meas}$ and $T_{e,min,meas}$, the statistically evaluated shade air temperatures $T_{max,DWD}$ and $T_{min,DWD}$, the measured bearing displacement ΔL_{meas} and the determined thermal expansion coefficients $\alpha_{T,meas}$.

No design bridge temperatures according to DIN EN 1991-1-5 were measured at any bridge. The statistically determined outer shade air temperatures at the sites are compared to the values according to DIN EN 1991-1-5, NDP to 6.1.3.2, i.e. $T_{min} = -24$ °C and $T_{max} = 37$ °C. They are more conservative. The coefficients of thermal expansion show deviations from -6% to + 17% from the values according to standard, i.e. $\alpha_{T,EC}$ is $1.2 \cdot 10^{-5}$ 1/K for steel composite bridges and $1.0 \cdot 10^{-5}$ 1/K for concrete bridges.

4.2 Comparison between measured and calculated bearing displacements

In order to validate the calculation approach for temperature-induced bridge elongation according to DIN EN 1991-1-5, the measured changes in the constant component of the bridge temperature $\Delta T_{N,con,Dil,meas}$ and $\Delta T_{N,exp,Dil,meas}$ are used together with normative or determined thermal expansion

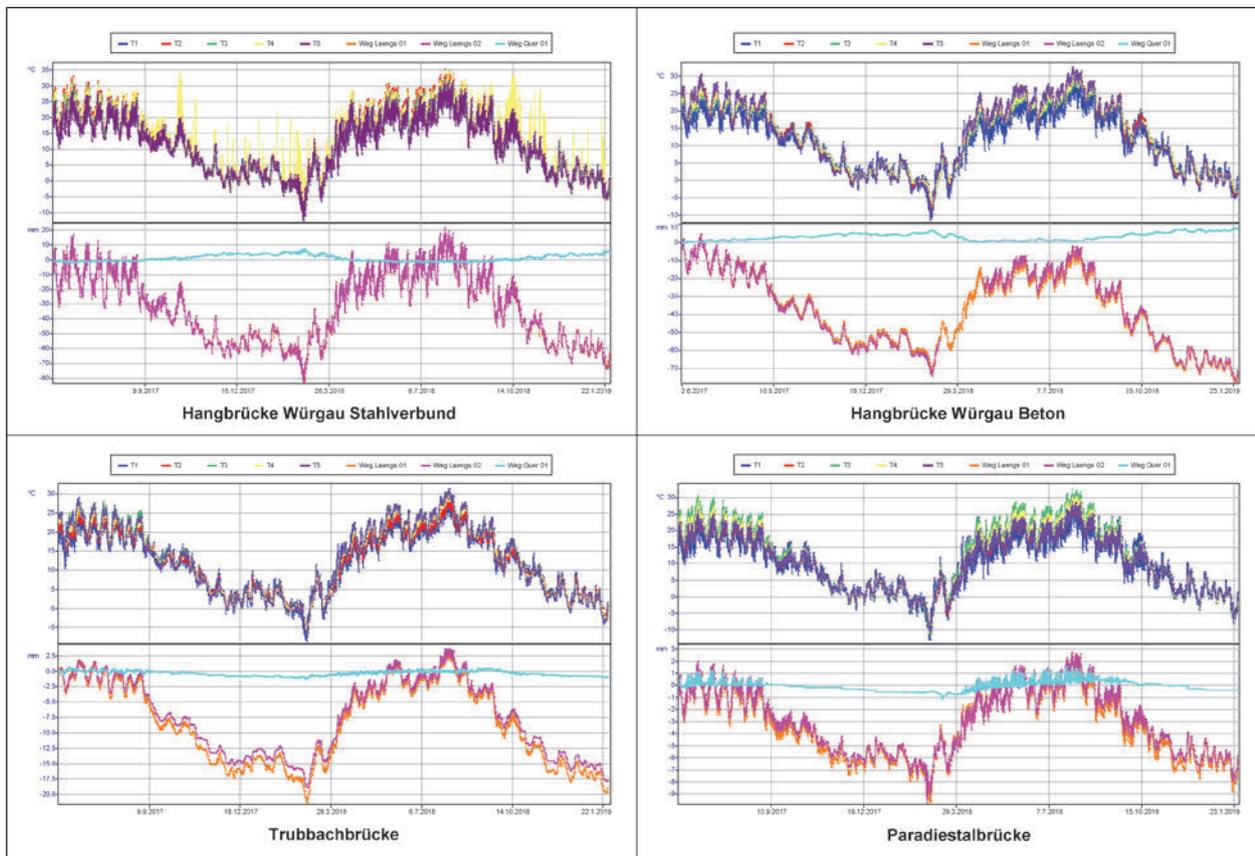


Fig. 1: Measured temperature gradients and bearing displacements at the reference bridges

Bridge	Temperature [°C]				ΔL_{meas} [mm]	$\alpha_{T,\text{meas}}$ [1/K]
	$T_{e,\text{max,meas}}$	$T_{e,\text{min,meas}}$	$T_{\text{max,DWD}}$	$T_{\text{min,DWD}}$		
Hangbrücke Würgau (Steel composite)	35,4	-12,4	38,9	-28,6	104	$1,24 \cdot 10^{-5}$
Hangbrücke Würgau (Concrete)	32,7	-9,7			81,8	$1,17 \cdot 10^{-5}$
Trubbachbrücke (Concrete)	31,5	-7,5	39,6	-27,2	23-25	$0,94 \cdot 10^{-5}$
Paradiestabücke (Concrete)	32,8	-11,4	38,9	-28,2	12,5	$1,05 \cdot 10^{-5}$

Tab. 2: Measured temperature, bearing displacements and coefficients of thermal expansion as well as statistically evaluated air shade temperatures

coefficients α_T to calculate bridge elongation difference ΔL_{total} . These values are compared with the measured bridge elongation (see table 3). It shows a good match. The difference between calculated bridge elongation differences based on measured coefficients of thermal expansion and the actual measured differences can be caused by the assumption that the maximum measured structural temperature corresponds to the constant part of the

structural temperature. The deviation between calculated elongation differences based on normative coefficients of thermal expansion and actual measured displacements is -7% to +6%, which is a very good match. Again, this deviation can be caused by the assumption of the measured bridge temperature being equivalent to the constant structural temperature component.

	Hangbrücke Würgau		Hangbrücke Würgau		Trubbachbrücke		Paradietalbrücke	
	Steel Composite		Concrete		Concrete		Concrete	
	Standard	Measured value	Standard	Measured value	Standard	Measured value	Standard	Measured value
$\alpha_T \times 10^5 [1/^\circ\text{K}]$	1,20	1,24	1,00	1,17	1,00	0,94	1,00	1,05
$\Delta T_{N,\text{con,Dil,meas}} [^\circ\text{C}]$	-12,4		-9,7		-7,5		-11,4	
$\Delta T_{N,\text{exp,Dil,meas}} [^\circ\text{C}]$	35,4		32,7		31,5		32,8	
$\Delta L_{\text{total,calc}} [\text{mm}]$	105,9	109,4	77,2	90,3	26,3	24,7	12,0	12,6
$\Delta L_{\text{total,meas}} [\text{mm}]$	104,4		82,4		24,8		12,5	
$L_{\text{total,calc}}/L_{\text{total,meas}}$	1,01	1,05	0,93	1,09	1,06	1,0	0,96	1,01

Tab. 3: Comparison between measured and calculated bearing displacements

	Würgau Steel Composite		Würgau Concrete		Trubbachbrücke		Paradietalbrücke	
	Standard	Location	Standard	Location	Standard	Location	Standard	Location
$\alpha_T \times 10^5 [1/^\circ\text{K}]$	1,20		1,00		1,00		1,00	
$T_{\text{min}} [^\circ\text{C}]$	-24	-28,6	-24	-28,6	-24	-27,2	-24	-28,5
$T_{\text{max}} [^\circ\text{C}]$	+37	+38,9	+37	+38,9	+37	39,6	+37	+38,9
$\Delta T_{N,\text{con,Dil}} [^\circ\text{C}]$	-50,5	-56,7	-45,1	-51,3	-45,1	-49,4	-45,1	-50,8
$\Delta T_{N,\text{exp,Dil}} [^\circ\text{C}]$	+51,9	+54,4	49,2	51,7	+49,2	+52,7	+49,2	+51,7
$\Delta L_{\text{total,d,EC}} [\text{mm}]$	227	246	172	188	64	69	26	28
$\Delta L_{\text{total,d,Statics}} [\text{mm}]$	231		208		64		27	
Location/Standard	1,08		1,09		1,08		1,08	

Tab. 4: Comparison of the calculated bearing displacement difference due to temperature according to DIN EN 1991-1-5 and DIN EN 1991-1-5/NA and location-specific values

4.3 Comparison of bearing displacement difference due to temperature

For the verification of normative values for the temperature as variable action effect on the basis of the according to DIN EN 1991-1-5 and DIN EN 1991-1-5/NA are compared with site specific characteristic values of the air shade temperature derived with the data of the German Weather Service (see table 4).

It turns out that due to the more conservative site-specific characteristic temperatures, the bridge elongation increases by up to 9%. Based on the bridge elongation calculated on the basis of the static design calculations, they are 6.5% larger for the steel composite construction Hangbrücke Würgau and 7.8% larger for the Trubbach Bridge in concrete construction. The Hangbrücke Würgau in concrete construction and the Paradietalbrücke have sufficient bearing displacement capacity.

4.4 Correlation between outside air temperature and bridge temperature

Based on the measured temperature values of the bridge deck and at the base station as the reference value for the outside air temperature, the correlation between outside air temperature and building temperature for the reference bridges was determined and compared with the data according to DIN EN 1991-1-5. A correlation between measured structural temperature and air shade temperature is confirmed by showing that the measured structural temperatures follow the outside air temperatures with some delay due to the large mass. Peaks of the outside air are attenuated in the the structure temperatures. There are only slight deviations with increasing or decreasing temperature, averaging lines run for the most part parallel.

5 Summary and conclusion

The temperatures and bearing displacements measured on four bridges over 19 months provide valuable information on the temperature-induced elongation behavior of real bridges and the induced bearing displacements. The measured bearing displacements are significantly lower than the bearings' capacities and the temperature-induced elongation calculated according to current standards. Due to the short measurement period, no statistical evaluation of the measured values can be performed.

Environmental and site influences, such as one-sided solar radiation due to the structure or crossing waters below the structure, influence the surface temperature of the superstructure and causes a change in the bearing rotation, but have no measurably influence on the bearing displacement.

The coefficients of thermal expansion determined on the basis of the measured values deviate between -6% and +17% from the normative values. However, the number of examined objects is too small to determine general thermal expansion coefficients for concrete and steel composite bridges.

A calculation of the bearing displacements with the calculation model according to DIN EN 1991-1-5 and measured bridge temperatures confirms a good agreement.

By means of annual extreme values of the air shade temperatures of nearby weather stations of the German Weather Service, location-specific design values of the air shade temperature are determined with an occurrence probability of $p = 0.02$. The site-specific maximum temperatures are higher by approx. 2 °C, while the minimum temperatures are lower by approx. -4.5 °C. A calculation in accordance with DIN EN 1991-1-5 with these site-specific rated temperatures leads to approx. 8% larger bridge elongation.

It is recommended to evaluate the design values of the shade air temperature for Germany on a smaller scale and with the climate data of the last three decades in order to identify deviations from the actual design values. Based on this study, the need for action to update the temperature map for Germany in the National Annex to DIN EN 1991-1-5 can be determined. Also, it is recommended to

determine the coefficients of thermal expansion of other bridges using measurement data to check the normative values.

Inhalt

1	Projektbeschreibung	11	7	Parameterstudie	29
2	Aufgabenstellung	11	7.1	Vergleich gemessener vs. rechnerischer Lagerwege	29
3	Ausgewählte Messobjekte	12	7.1.1	Rechnerische Lagerwege gem. Eurocode	30
3.1	Hangbrücke Würgau Beton	13	7.1.2	Rechnerische Lagerwege in Bezug auf die Außenlufttemperatur	31
3.2	Hangbrücke Würgau Stahlverbund ...	13	7.1.3	Rechnerische Lagerwege gem. Bestandsstatik	35
3.3	Trubbachbrücke	13	7.1.4	Vergleich der Lagerwege	39
3.4	Paradietalbrücke	13	7.2	Vergleich der Längenänderung infolge Temperatur	40
4	Installiertes Monitoringsystem	14	7.3	Akkumulierter Gleitweg	43
4.1	Sensorpositionen	15	7.4	Korrelation Außenluft zu Bauwerks- temperatur	43
4.1.1	Hangbrücke Würgau Beton	15	7.5	Beurteilung Lage Tragwerk zur Sonneneinstrahlung	48
4.1.2	Hangbrücke Würgau Stahlverbund ...	16	7.6	Einfluss Fahrbahnbelag/Überbau- werkstoff auf Verschiebung	48
4.1.3	Trubbachbrücke	16	7.7	Einfluss querende Gewässer unterhalb der Brücke	49
4.1.4	Paradietalbrücke	17	8	Zusammenfassung/ Schlussfolgerung	50
4.2	Basisstation	17	Bilder	51	
4.3	Datenlogger	18	Tabellen	53	
4.4	Datenfernübertragung (DFÜ)	19	Anhang 1: Erläuterung Temperatursensor- anordnung		
4.5	Temperatursensor	19	Anhang 2: Wartungsprotokolle		
4.6	Wegaufnehmer	20	Anhang 3: Messdaten		
4.7	Software	21	Anhang 4: Temperaturdaten aus ausgewählten Wetterstationen in Bayern		
5	Wartung und Instandhaltung	21			
6	Ergebnisse	22			
6.1	Temperaturen	22			
6.1.1	Hangbrücke Würgau Beton	22			
6.1.2	Hangbrücke Würgau Stahlverbund ...	23			
6.1.3	Trubbachbrücke	24			
6.1.4	Paradietalbrücke	24			
6.2	Längenänderungen	26			
6.2.1	Hangbrücke Würgau Beton	26			
6.2.2	Hangbrücke Würgau Stahlverbund ...	27			
6.2.3	Trubbachbrücke	27			
6.2.4	Paradietalbrücke	29			
6.3	Abhängigkeiten Weg – Temperatur ...	29			

1 Projektbeschreibung

Der ständige Wechsel der klimatischen Einflüsse verursacht in Bauwerken instationäre, nichtlinear begrenzte Temperaturverteilungen. Ähnlich zu diesen Temperaturentwicklungen entstehen thermische Dehnungen, die in statisch bestimmt gelagerten Tragwerken Verformungen und bei statisch unbestimmter Lagerung zusätzliche Zwangsbeanspruchungen hervorrufen. Temperaturbeanspruchungen sind veränderliche Einwirkungen. Bei Verkehrsbrücken sind in der Regel nur der lineare und der konstante Temperaturanteil zu berücksichtigen. In Sonderfällen ist auch der nichtlineare Temperaturanteil darzustellen. Entsprechend den gültigen Regelungen ist der charakteristische Eingangswert so niedergeschrieben, dass er im Mittel alle 50 Jahre erreicht bzw. überschritten wird.

Die zur Berechnung der Einwirkung auf Tragwerke durch Temperatur relevanten Daten sind in der DIN EN 1991-1-5 sowie in den Fachberichten und nationalen Bestimmungen beschrieben. In Deutschland ergibt sich der konstante Temperaturanteil laut DIN EN 1991-1-5, 6.1.3.3 Anhang A für die minimale Außenlufttemperatur T_{\min} mit -24 °C und für die maximale Außenlufttemperatur mit T_{\max} $+37\text{ °C}$. In Österreich ergeben sich laut ÖNORM B 1991-1-5:2012 die minimale und die maximale Außenlufttemperatur in Abhängigkeit von standortrelevanten Angaben wie die Seehöhe, die Zone und einen Koeffizienten k . Für die Berechnung des konstanten Temperaturanteils ist weiter aus der DIN EN 1991-1-5 ein Brückentyp zu wählen. Zur Auswahl stehen folgende Arten:

- Typ 1 Stahlkonstruktion,
- Typ 2 Verbundkonstruktion,
- Typ 3 Betonkonstruktion.

Für die Ermittlung von Lagerkräften und Verformungen gelten in Deutschland die konstanten Temperaturanteile gemäß DIN EN 1990/NA/A1, NA.E.5.2.2. Aufgrund der Unsicherheiten bei der Lagerung des Tragwerkes wird hierbei zusätzlich der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_F = 1,35$ sowie ein konstruktionsabhängiger Sicherheitszuschlag (Typ 1, Typ 2, Typ 3) berücksichtigt. Für die Ermittlung der Verschiebewege der Lager und Fahrbahnübergänge wird ein Temperaturzuschlag vom $\pm 20\text{ K}$ angesetzt. Der minimale und maximale Temperaturanteil der Brücke kann aus der ÖNORM EN 1991-1-5, 6.1.3.1 Bild 6.1 Korrelation zwischen minimaler/maximaler

Außenlufttemperatur und minimalen und maximalen konstanten Temperaturanteil für Brücken abgelesen werden. Für die Bestimmung der Aufstelltemperatur T_0 sollte die Temperatur angenommen werden, bei der Zwängung auftritt (Fertigstellung). Wenn dies nicht vorhersagbar ist, sollte die während der Tragwerkserrichtung vorherrschende Durchschnittstemperatur verwendet werden. Wenn keine Informationen verfügbar sind, kann T_0 mit 10 °C angenommen werden.

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 Temperaturunterschied 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.

Durch die Verwendung der normativen Werte kann im Regelfall davon ausgegangen werden, dass die Lagerwege aus der Bemessung ausreichende Reserven aufweisen. Um diese Reserven entsprechend zu eruieren, werden Messungen an verschiedenen Brückenobjekten mit unterschiedlichen Bauweisen durchgeführt. Die Aufzeichnung der Verkehrsfrequenzen auf den Brücken stand nicht im Fokus dieses Projektes und konnten auch aufgrund der gewählten Abstraten des Monitoringsystems nicht erfasst werden.

2 Aufgabenstellung

Ziel ist es, Lagerverschiebungen an Brückenstrukturen mit unterschiedlichen Werkstoffen und Fahrbahnbelägen messtechnisch mithilfe eines Monitoringsystems zu erfassen und für die statische Bemessung entsprechende Rückschlüsse für Temperaturansätze abzuleiten. Ein weiteres Ziel ist, es die entsprechenden Referenzobjekte zu untersuchen und auszuwerten und auch noch weitere gemessene Brücken aus dem Datenbestand der Firma Schimetta Consult ZT GmbH in die Datenbasis mitein-

zubeziehen. Mithilfe dieser Datenbasis soll es möglich sein, die maßgebenden Temperaturunterschiede für repräsentative Brücken anzugeben. Im Detail können folgende Ziele für das Projekt formuliert werden:

- Messung und Untersuchung von Neubaustrukturen zum Einfluss von Temperatur und Kriechen/Schwinden,
- Messung und Untersuchung von Bestands- und Instandsetzungsobjekten zum Einfluss der Temperatur,
- Untersuchung des Einflusses des Überbaustoffes Stahl oder Beton auf das Temperaturverhalten,
- Beurteilung der Lage des Tragwerkes zur Sonneneinstrahlung,
- Unterscheidung Asphaltdecke auf die Bauwerkstemperatur,
- Untersuchung des Einflusses von querenden Gewässern unterhalb der Brücke durch Abkühlung der Brückenunterseite,
- Untersuchung der Korrelation zwischen Lufttemperatur und Bauwerkstemperatur,

- Datenbestand von metrologischen Messungen untersuchen, um zu eruieren, ob Extremwerte in den letzten 20 Jahren größer geworden sind,
- Ableitung von Bemessungsansätzen bzw. Empfehlungen auf Grundlage der Messungen und Auswertungen.

3 Ausgewählte Messobjekte

Im weiteren Verlauf des Berichts wurde für die gemessenen Brückentragwerke die Nummerierung aus Tabelle 1 ausgewählt.

Für die Durchführung der Messungen konnten vier Objekte in Nordbayern ausgewählt werden, die die genannten Vorgaben erfüllen, deren Lage in Bild 1 dargestellt ist.

Nr.	Name	Ort	Gesamtlänge
1	Hangbrücke Würgau/Beton	Würgau/Scheßlitz	403 m
2	Hangbrücke Würgau/Stahlverbund	Würgau/Scheßlitz	425,37 m
3	Trubbachbrücke	Forchheim	95 m
4	Paradiestalbrücke	Wölkendorf	27,06 m

Tab. 1: Gemessene Brücken

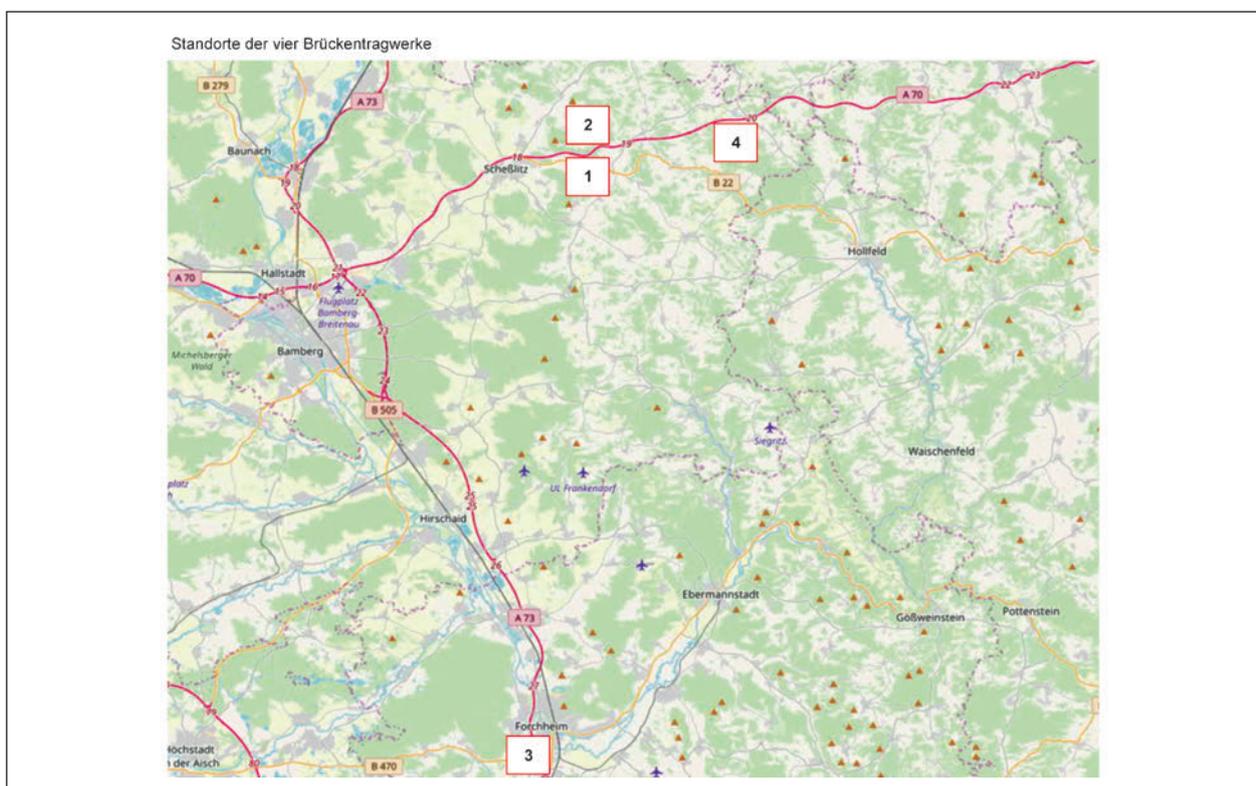


Bild 1: Lage der Brücken (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

3.1 Hangbrücke Würgau Beton

Bezeichnung	Brücke A70 über FW und Gelände, BW 80a Hangbrücke Würgau, FR Bayreuth
Standort	Schesslitz/Würgau
Baujahr	2016
Gesamtlänge	403,0 m
Breite	16,85 m
Bauart	Plattenbalkenbrücke, Trägerrostbrücke
Fahrbahnbelag	Deckschicht Splittmastixasphalt

Tab. 2: Beschreibung Hangbrücke Würgau Beton



Bild 2: Hangbrücke Würgau Beton

3.3 Trubbachbrücke

Bezeichnung	Brücke A73 über die Trubbach, Trubbachbrücke, FR Nürnberg
Standort	Forchheim
Baujahr	2015
Gesamtlänge	95,0 m
Breite	18,47 m
Bauart	Plattenbalkenbrücke, Trägerrostbrücke
Fahrbahnbelag	Deckschicht Splittmastixasphalt

Tab. 4: Beschreibung Trubbachbrücke



Bild 4: Trubbachbrücke

3.2 Hangbrücke Würgau Stahlverbund

Bezeichnung	Brücke A70 über FW und Gelände, BW 80a Hangbrücke Würgau, FR Bamberg
Standort	Schesslitz/Würgau
Baujahr	1994
Gesamtlänge	425,37 m
Breite	15,0 m
Bauart	Plattenbalkenbrücke, Trägerrostbrücke
Fahrbahnbelag	Deckschicht aus Asphalt

Tab. 3: Beschreibung Hangbrücke Würgau Stahlverbund

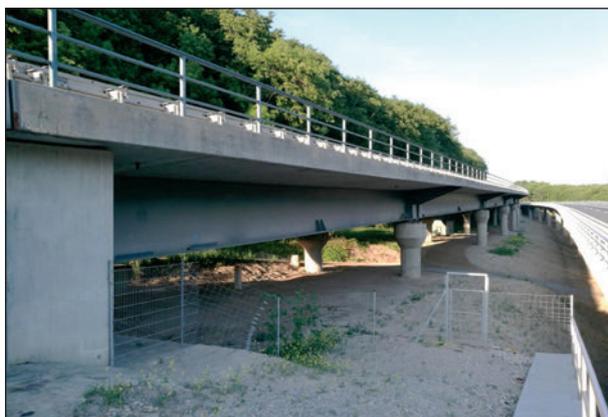


Bild 3: Hangbrücke Würgau Stahlverbund

3.4 Paradiestalbrücke

Bezeichnung	Brücke A70 über Feldweg, FR Bamberg
Standort	Wölkendorf
Baujahr	1992
Gesamtlänge	27,06 m
Breite	13,35 m
Bauart	Plattenbalkenbrücke, Trägerrostbrücke
Fahrbahnbelag	Deckschicht Gussasphalt

Tab. 5: Beschreibung Paradiestalbrücke



Bild 5: Paradiestalbrücke

4 Installiertes Monitoringsystem

Auf Basis langjähriger Erfahrungen mit Monitoringsystemen wurde ein System (DDMS – Distributed Digital Monitoring System) konzipiert, das grundsätzlich folgende Anforderungen erfüllt:

- Möglichst direkte Messung der gesuchten Parameter,
- flexible Systemarchitektur, um Erweiterungen zuzulassen,
- Langzeitstabilität unter den realen Betriebs- und Witterungsbedingungen bei einer Bauwerksüberwachung,
- unabhängig von Stromanschluss und Stromausfällen – batteriebetrieben.

Angepasst an die Aufgabenstellung und das statische System der Brückenobjekte, die Zugangsmöglichkeiten sowie die Infrastruktur wie fehlender Stromanschluss und Internetanbindung wurden folgende Festlegungen für das Überwachungssystem getroffen, wobei das System grundsätzlich aus folgenden Hauptkomponenten besteht:

- Schaltschrank/Basisstation
In dem an der jeweiligen Widerlagerwand befestigten Schaltschrank werden alle Sensorkabel zusammengeführt. Darin befinden sich die den unterschiedlichen Sensoren zugehörigen Datenlogger, die Datenfernübertragung, die Verkabelung und die Stromversorgung durch die Batterien. Der Schaltschrank ist witterungsbeständig und verschlossen und konnte an drei der Tragwerke auch im vor Vandalismus geschützten, versperrten Widerlagerbereich angebracht werden.
- Datenlogger
Jedem Sensor ist ein eigener kleiner Datenlogger zugehörig, welcher die Messwerte digital abspeichert und den dazugehörigen Wegaufnehmer mit Strom versorgt. Die Temperatursensoren werden auf einem Datenlogger zusammengefasst. Jeder Datenlogger hat einen festen Speicher. An einem der Datenlogger wird auch noch die Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Schaltschrank gemessen, um eventuell drohende Ausfälle durch Feuchtigkeit vermeiden zu können.
- Datenfernübertragung
Zur Datenübertragung und Sicherung sind die verwendeten Datenlogger mit einem Datenfern-

übertragungsmodul gekoppelt. In diesem befindet sich eine SIM-Karte, welche über das Mobilfunknetz die aktuellen Messdaten per E-Mail versendet. Da die Datenübertragung die stromintensivste Aufgabe des Systems ist, wird dieses über ein großes Batteriepaket versorgt, welches etwa 100 Übertragungen schafft, ehe die Stromquelle erschöpft ist. Dieser Teil des Systems ist grundsätzlich ausgeschaltet und wird nur in einem vordefinierten Intervall „aufgeweckt“. Daher ist das stromintensive Aufrechterhalten der Mobilfunkverbindung überflüssig.

- Sensoren und Ziel der Messung
Durchführung von statischen Messungen für die Überwachung der maßgebenden Parameter. Folgende Messwertaufnehmer wurden für die Aufgabe ausgewählt:
 - Wegaufnehmer
Eine direkte Möglichkeit zur Bestimmung von absoluten Längenänderungen oder Verschiebungen. Es wurden potenziometrische Wegaufnehmer verwendet. Die Wegaufnehmer messen die Verformungen der Tragwerke in Längs- und Querrichtung über den jahreszeitlichen Verlauf.
 - Temperaturlaufnehmer
Der jahreszeitliche Verlauf der Temperatur für die Tragwerke wird an unterschiedlichen Stellen durch Temperaturlaufnehmer erfasst. Dabei wurden Sensoren für Kerntemperatur (Beton) und Oberflächentemperatur (Stahl) verwendet. Dazu wurden jeweils Aufnehmer an die sonnenzugewandte Seite und an sonnenabgewandte Stellen montiert. Zusätzlich wurden die Lufttemperatur am Widerlager sowie die Luftfeuchtigkeit und Temperatur im Schaltschrank gemessen.
- Verkabelung
Einen wesentlichen Gesichtspunkt für den dauerhaften und störungsfreien Betrieb des Messsystems stellt eine fachgerechte Verkabelung des gesamten Systems dar. Alle Kabel wurden in Kunststoffrohren/-schläuchen geführt. Diese Hüllrohre stellen einen mechanischen Schutz der empfindlichen Datenkabel dar. Alle Verrohrungen wurden am Objekt durch Rohrschellen befestigt.

4.1 Sensorpositionen

Der grundsätzliche Aufbau der 4 unabhängigen Monitoringsysteme ist bis auf die Kabellängen und Längen der Wegaufnehmer nahezu identisch (siehe Tabelle 6).

In den Planausschnitten (Kapitel 4.1.1 bis 4.1.4) werden die einzelnen Sensorpositionen dargestellt.

Messparameter	Sensorwahl	Anzahl
Längenänderung längs	Wegaufnehmer (W)	2
Längenänderung quer	Wegaufnehmer (W)	1
Bauwerkstemperatur	Temperatursensoren (T)	4
Lufttemperatur am Widerlager	Temperatursensoren (T)	1
Überwachung Basisstation/Schaltschrank	Temp. und Luftfeuchtigkeit (X)	2
Gesamtanzahl an Sensoren je Brücke		8

Tab. 6: Beschreibung Messparameter, Sensoren und Anzahl

4.1.1 Hangbrücke Würgau

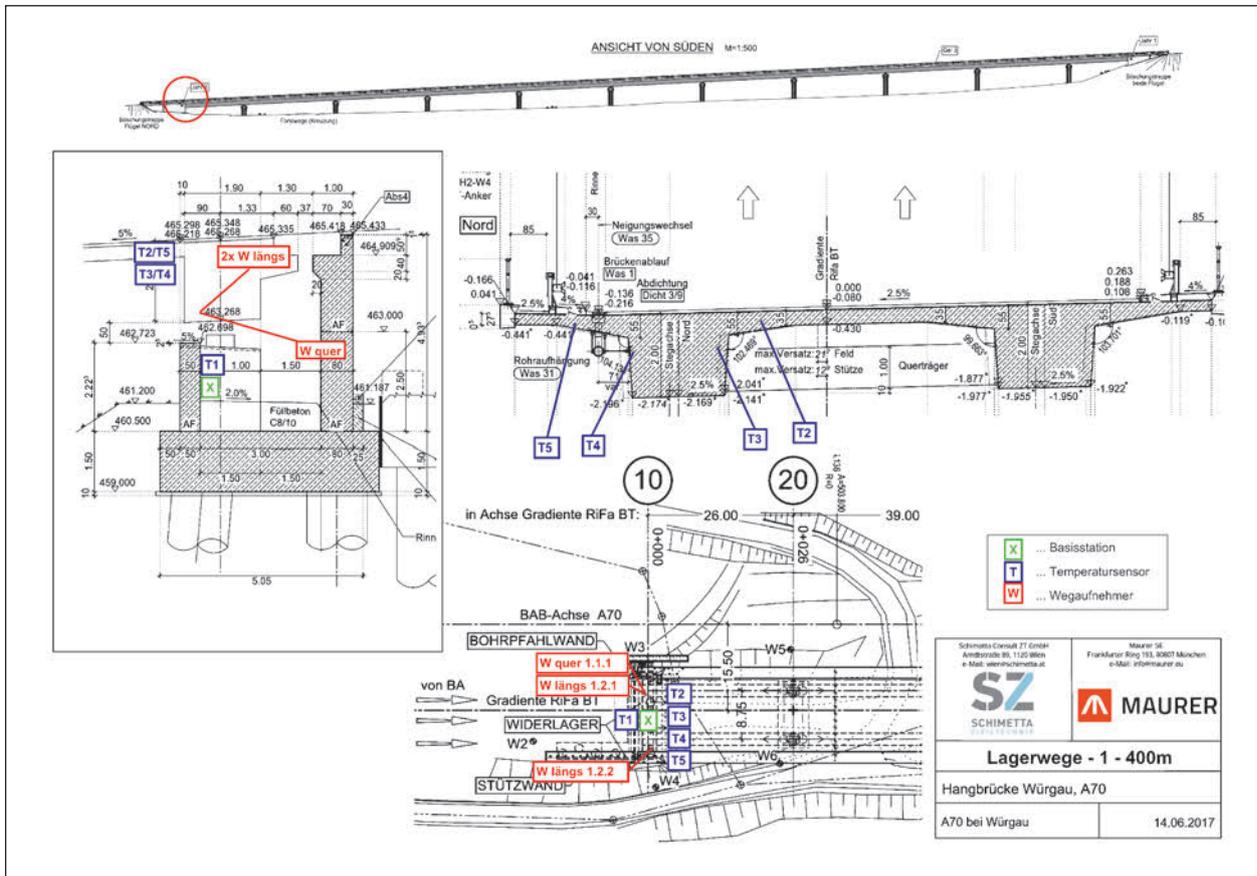


Bild 6: Sensorpositionen (1 – Hangbrücke Würgau)

4.1.2 Hangbrücke Würgau Stahlverbund

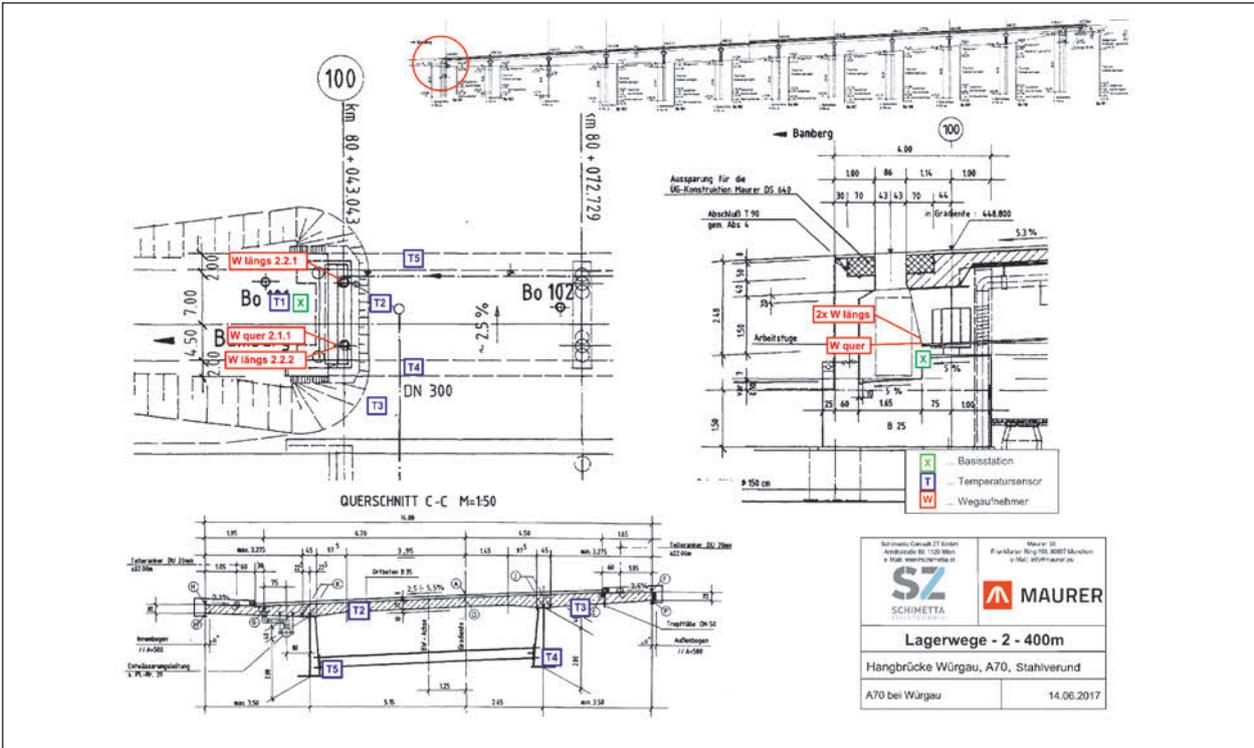


Bild 7: Sensorpositionen (2 – Hangbrücke Würgau)

4.1.3 Trubbachbrücke

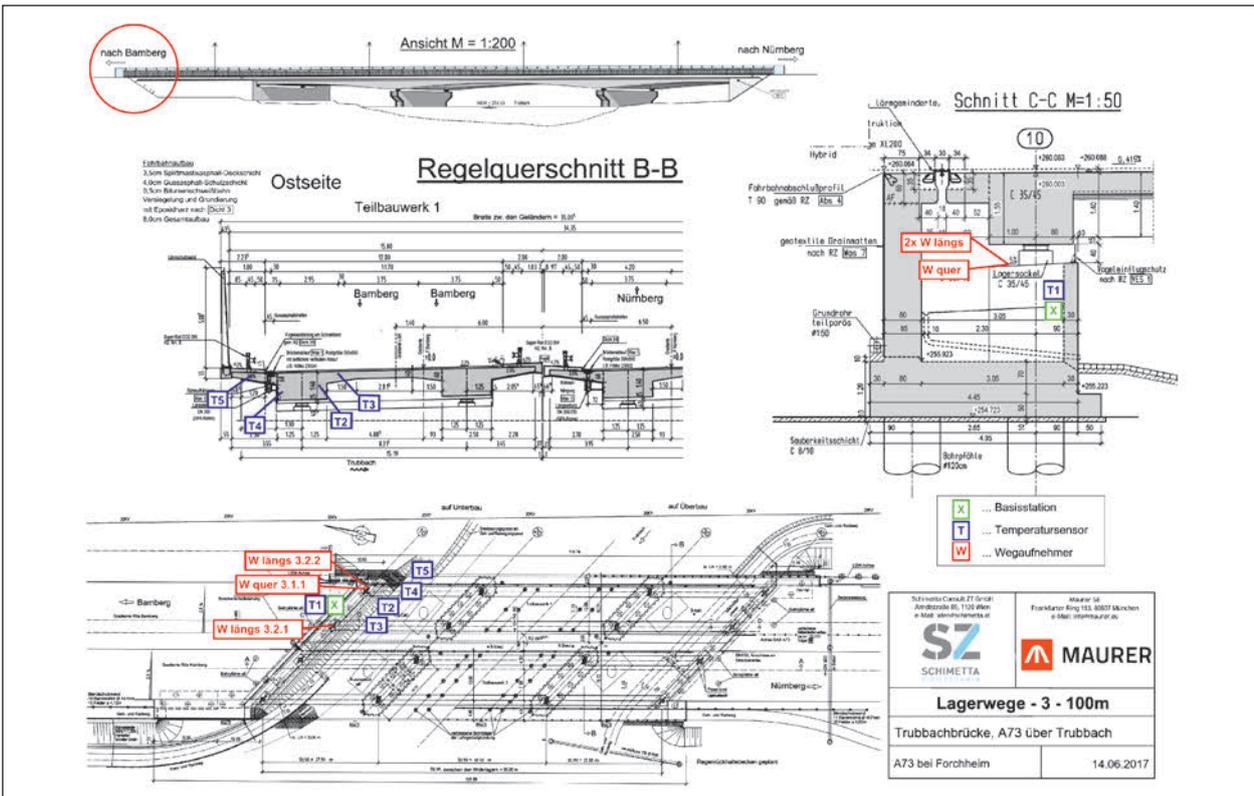


Bild 8: Sensorpositionen (3 – Trubbachbrücke)

4.1.4 Paradiestalbrücke

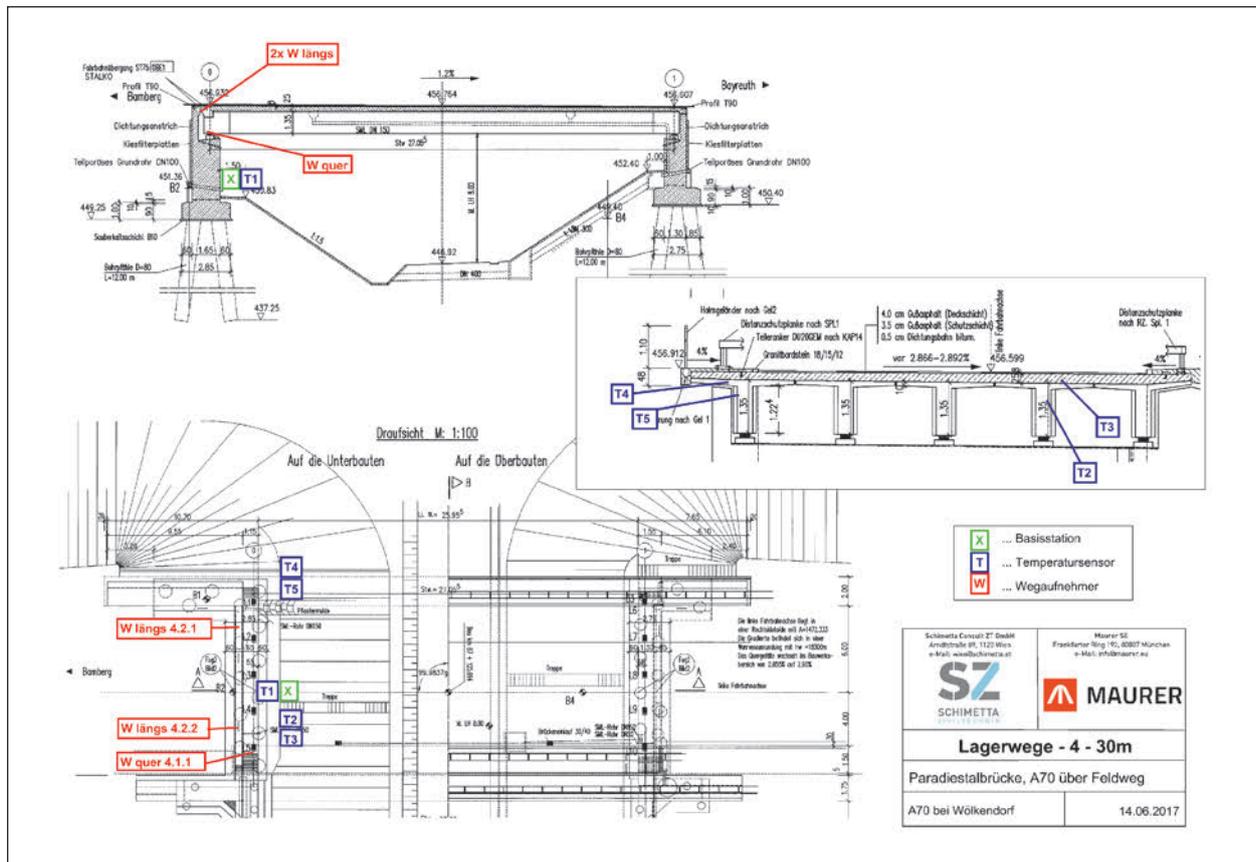


Bild 9: Sensorpositionen (4 – Paradiestalbrücke)

4.2 Basisstation

Die Basisstation (Bild 10) besteht aus einem robusten Schaltschrank, welcher abgesehen von den Sensoren die komplette Messtechnik enthält und diese vor Umwelt- und Witterungseinflüssen schützt. Die Stromversorgung, die Datenübertragungsmodule, die Datenlogger und die Kabelverbindungen sind in dieser Box verbaut, nur die jeweiligen Sensorkabel werden durch eine hochwertige Kabeldurchführung der Schutzklasse IP 68 nach außen geführt. Somit ist diese Komponente gegen Eindringen von Feuchtigkeit bestens geschützt. Die Tür des Schaltschranks ist mit einer Gummidichtung abgedichtet und wird mit einem mitgelieferten Schlüssel zweifach versperrt. Die Basisstation selbst ist an einer geeigneten Stelle an einer Wand verschraubt.

Die komplette Verkabelung der Datenleitungen, Stromversorgungskabel, sowie Sensorkabel wurde vorab durchgeführt. Ein ausgiebiger Testlauf mit allen Sensoren über einige Wochen wurde erfolgreich und ohne Zwischenfälle absolviert.



Bild 10: Foto Basisstation

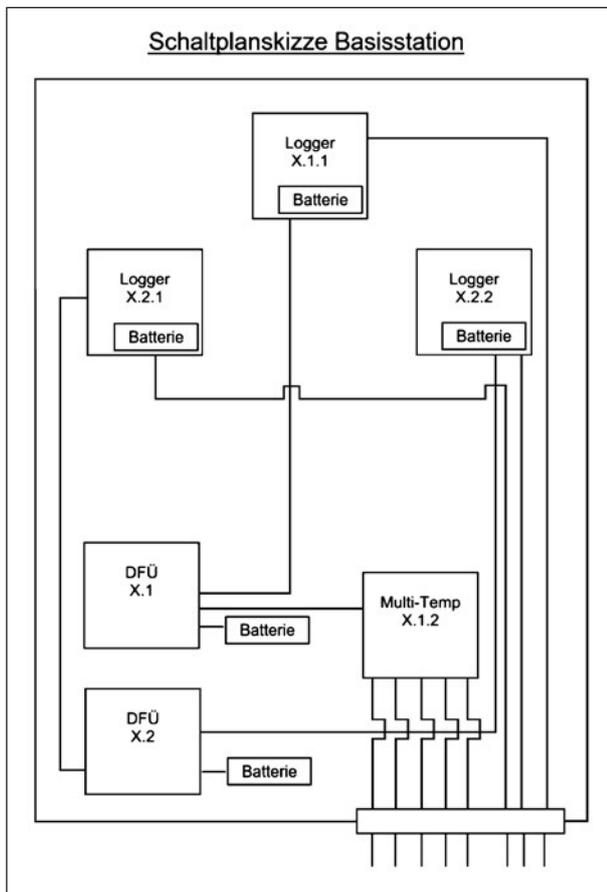


Bild 11: Anordnung der Komponenten in einer Basisstation

Bei der Inbetriebnahme des Monitoringsystems konnte mithilfe eines Notebooks und der geeigneten Software in der Basisstation die notwendige Konfiguration durchgeführt werden. Während des Betriebs ist außer für den Batteriewechsel (Intervalle im Kapitel der jeweiligen Module) oder bei Bedarf für die manuelle Datensicherung kein Zugang zu dieser Box notwendig.

4.3 Datenlogger

Der Datenlogger besteht aus mehreren individuell konfigurierbaren Komponenten, die im Vorhinein festgelegt werden müssen.

Darin enthalten sind:

- Stromversorgung (Batterien) für Sensor und Datenlogger,
- Speicher,
- Temperatursensor,
- Luftfeuchtigkeitssensor,



Bild 12: Datenlogger

- Anschlüsse:
 - Ausgang: Datenfernübertragungsmodul,
 - Ein-/Ausgang: Sensor,
 - Ein-/Ausgang: Anschluss PC zur Konfiguration.

Die Stromversorgung wird über 2 AA-Batterien aufrechterhalten. Das System ist sehr sparsam, da es nur nach vorgegebenem Messintervall aktiv wird, einen Wert aufnimmt und sich sofort wieder fast zur Gänze abschaltet. Somit kann jeder Datenlogger und die dazugehörige Sensorik in etwa 9 Monate zuverlässig mit Strom versorgt werden. Durch den Batteriebetrieb ist das komplette System zugleich unabhängig von möglichen Stromausfällen.

Die Speichergröße ist wählbar und liegt in der Größenordnung für 16.000 – 64.000 speicherbare Messwerte. Zur Messwertaufnahme wurde ein 10-Minuten-Intervall ausgewählt. Das heißt, dass alle Datenlogger zeitgleich aktiv werden, je einen bzw. bei der Temperaturmessung mehrere Messwerte in den Speicher schreiben und sich dann wieder in den Standby-Modus zurückbegeben.

Die Speichergrößen wurden so gewählt, dass zumindest 40 Tage alle Sensoren auf jedem Datenlogger gespeichert werden können. Somit ist eine gute Redundanz durch mehrfache Datenübertragung gegeben (siehe Kapitel Datenfernübertragung). Wenn der Speicher voll ist, werden die ältesten Daten wieder überschrieben.



Bild 13: Datenfernübertragungsmodul

4.4 Datenfernübertragung (DFÜ)

Das Datenfernübertragungsmodul besteht aus 3 Teilen:

- Modul mit Anschlüssen für mehrere Datenlogger (Bild 13 – unterer Teil),
- Übertragungseinheit mit Antenne und SIM-Karte (Bild 13 – oberer Teil),
- Stromversorgung (Bild 14).

Das Modul hat die Aufgabe, die Messdaten aus den jeweilig angeschlossenen Datenloggern zu sammeln und zusammenzufassen. Im nächsten Schritt wird über voreingestellte Zugangsdaten eine Verbindung zum Mobilfunknetz aufgebaut und die gebündelten Messdaten an ausgewählte Empfänger per E-Mail versendet.

Wie schon bei den Datenloggern beschrieben ist das Messintervall aller Sensoren auf 10 Minuten eingestellt. Somit füllt sich der Speicher der Datenlogger kontinuierlich. Das Datenfernübertragungsmodul erwacht alle 5 Tage um 04:00 Uhr morgens und übermittelt den kompletten Datenspeicher der jeweilig angehängten Datenlogger. Das heißt in der Praxis, dass bei dem gewählten Messintervall und der daraus resultierenden Gesamtspeicherdauer



Bild 14: Stromversorgung DFÜ

von mindestens 40 Tagen die Daten auch zumindest 8 Mal übertragen werden. Sollten also Empfangsprobleme entstehen, sind die Daten dann einfach auch bei den nächsten 7 Übertragungen enthalten.

Um den gelegentlich möglichen Empfangsproblemen beim Verbindungsaufbau unter den Brücken entgegenzuwirken, wurden an den DFÜ-Modulen noch zusätzliche Antennen montiert.

4.5 Temperatursensor

Es wurden in Summe folgende Komponenten installiert:

- 18 x Temperaturfühler normal (für Kern- und Lufttemperatur am Widerlager),
- 2 x Oberflächentemperatursensoren.

Bei den Sensoren handelt es sich um NTC-Temperatursensoren (Bild 15). Diese sind Halbleiter, also temperaturabhängige Widerstände. Sie stammen aus der Kategorie der Thermistoren. Diese haben im Gegensatz zu den Kaltleitern einen negativen Temperaturkoeffizienten und leiten bei höheren Temperaturen den Strom besser als bei niedrigeren Temperaturen.

Die Sensoren wurden mit unterschiedlichen Kabel­längen versehen und in Kombination mit dem dazu­gehörigen Datenlogger kalibriert.

Für die Messung der Betonkerntemperatur wurden zuerst etwa 20 – 25 cm tiefe Löcher an den ausge­wählten Positionen gebohrt. Im Anschluss wurde die messende Sensorspitze komplett in das Bohr­loch eingeführt und in dieser Position von außer­halb erstmal mit einem Klebeband fixiert. Danach wurden alle Bohrlöcher mit einem speziellen 2-kom-

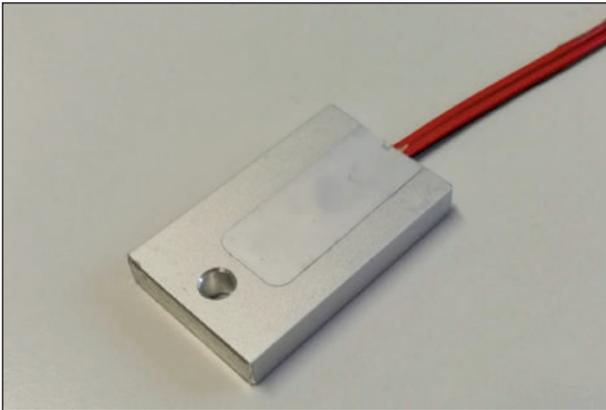


Bild 15: NTC-Temperatursensor

ponentigen Mörtelverbund eingeklebt. Die Kabel­verbindung zur Basisstation wurde je nach Möglich­keit mit Klebeband, Kabelbinder bzw. vorrangig in Elektroschläuchen verlegt, damit eine gute Absi­cherung gegenüber Tierbiss oder starken Witte­rungseinflüssen gegeben ist.

4.6 Wegaufnehmer

In Summe wurden folgende Wegaufnehmer instal­liert:

- 3 x Wegaufnehmer Novotechnik IP 68 75mm Weg: 3 kOhm,
- 3 x Wegaufnehmer Novotechnik IP 68 100mm Weg: 4 kOhm,
- 3 x Wegaufnehmer Novotechnik IP 68 200mm Weg: 8 kOhm.

Das Messprinzip der Wegaufnehmer beruht ähn­lich dem der Temperatursensoren auf Widerstands­änderungen nach Art eines Potenziometers. Im Zu­ sammenhang von einem beweglichen Schleifer und



Bild 16: Wegaufnehmer 200 mm Novotechnik



Bild 17: Wegaufnehmer montiert (Paradiestabücke)

der daraus resultierenden Widerstandsänderung kann auf den Weg geschlossen werden.

Die Wegaufnehmer dienen der Aufzeichnung der Längs- und Querbewegung der Brücke. Jeder Wegaufnehmer hat 2 Befestigungspunkte, die mit kugelenkigen Befestigungspunkten ausgestattet wurden.

An ausgewählten Positionen wurden Edelstahl-Gewindestangen mit einem dafür geeigneten 2-Komponenten-Klebstoff in Bohrlöchern verklebt und darauf nach kurzer Trocknungszeit die Wegaufnehmer direkt befestigt. Gelegentlich wurden auch Verlängerungen oder Winkel am Beton verschraubt, um eine saubere Messung zu gewährleisten.

Die Verkabelung ist geschirmt und für den Außeneinsatz robust ausgeführt. Die Wegaufnehmer und deren Verkabelung bis in die Basisstation entsprechen der Schutzklasse IP 68.

4.7 Software

Für das gesamte Messsystem ist ein Software-Paket mitgeliefert worden, welches zur Auswertung und Konfiguration des Systems verwendet wird. Einstellungen wie Messintervall, Informationen für die Internetverbindung oder die Uhrzeit-Synchronisierung können hier eingesehen und verändert werden. Ebenso wie das Öffnen, Sichten und Exportieren der Messdaten ist dies im ersten Schritt nur über die für diese Hardware entwickelte Software möglich. Mit einer Kabelverbindung zu einem Notebook können alle Einstellungen vorgenommen werden, die Daten manuell gesichtet und gespeichert sowie empfangene Messdaten geöffnet und exportiert werden.

Im zweiten Schritt bzw. nach der ersten Konfiguration ist diese Software nur mehr zum Exportieren der Messdaten zuständig. Die Messdaten werden in folgenden Datenformaten gespeichert, um alle Auswertungen durchführen zu können:

- *.csv Einfach zu Exportieren und zu öffnen,
- *.ged GreenEye – einfache Visualisierungssoftware zum Darstellen und Messen,
- *.dat Famos DAT, für die Auswertung und spezielle Berechnungen.

Die Auswertung der Messdaten wird in imc-FAMOS durchgeführt. Dabei können einfache Min/Max-Aus-

wertungen sowie auch komplexere Berechnungen gut durchgeführt und auch dargestellt werden.

5 Wartung und Instandhaltung

Die Auslegung des Messsystems erfolgte in einer solchen Weise, dass der Wartungsaufwand möglichst minimiert wird. Alle Sensoren wurden möglichst in der Nähe der Basisstation montiert, um lange Verkabelungen zu vermeiden. Für Wartungszwecke ist einerseits die Basisstation zugänglich als auch andererseits die Sensoren allenfalls unter Einsatz eines BIG. In regelmäßigen Intervallen (halbjährlich) erfolgt die Vorlage eines Zwischenberichtes beim Auftraggeber, in dem die erzielten Messergebnisse laufend zusammengefasst werden.

Im Zuge des aktuellen Auftrages wird neben der terminlich vorgegebenen Berichtslegung über die gemessenen Tragwerksverhältnisse auch eine jährliche Wartung durchgeführt. In den zugehörigen Berichten werden die zugehörigen Wartungsarbeiten des Systems dokumentiert. Diese haben im Beobachtungszeitraum folgende Punkte umfasst:

- Tausch aller eingesetzten Batterien der Messsysteme April 2018,
- Kontrolle der Hardware und Anschlusskabel April 2018,
- Austausch defekter Wegaufnehmer Hangbrücke Würgau (Betonbrücke) April 2018,
- Reinigung und Pflege der Wegaufnehmer April 2018,
- Neustart aller Systeme und anschließender Testlauf April 2018.

Der Ausfall bzw. die fehlerhafte Aufzeichnung des Wegaufnehmers bei der Hangbrücke Würgau (laut Plan „W längs 1.2.2“) wurde Mitte März 2018 sofort durch die ständigen visuellen Kontrollen der Messdaten erkannt. Die entsprechenden Maßnahmen wurden sofort eingeleitet (erste visuelle Begutachtung, Bestellen neuer Wegaufnehmer etc.), und Ende April 2018 wurde der defekte Wegaufnehmer ausgetauscht. Für diesen Zeitraum liegen daher keine Messdaten zum Wegaufnehmer „W längs 1.2.2“ Hangbrücke Würgau vor.

6 Ergebnisse

6.1 Temperaturen

Durch die Monitoringsysteme an den Referenzobjekten werden ab Inbetriebnahme der Monitoringsysteme (ab 01.06.2017) die Jahreszyklen des Temperaturganges aufgezeichnet. Die gemessenen Tragwerkstemperaturen zeigen in diesem Beobachtungszeitraum (01.06.2017 bis 27.01.2019) den zu erwartenden Verlauf.

6.1.1 Hangbrücke Würgau Beton

In Bild 18 ist der Temperaturverlauf über den Messzeitraum und in Tabelle 7 die Messwerte je Sensor dargestellt.

- Die Lufttemperatur am Widerlager (T1) lag in diesem Zeitraum zwischen -11,4 °C und 29,4 °C.
- Die dabei höchste gemessene Betontemperatur war mit 32,7 °C auf Sensor T5.
- Die niedrigste gemessene Betontemperatur lag bei -9,7 °C ebenfalls auf Sensor T5.

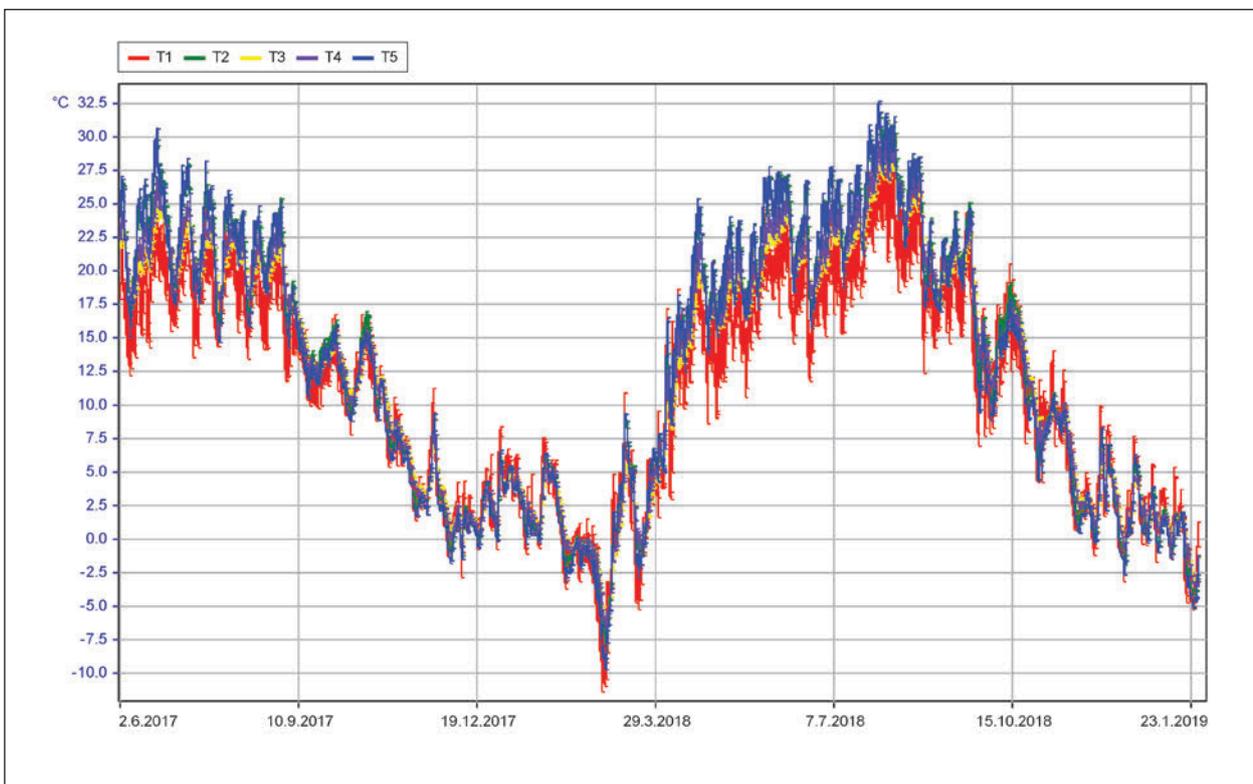


Bild 18: Temperaturverlauf – Hangbrücke Würgau Beton – 02.06.2017-27.01.2019

Sensor	Min [°C]	Max [°C]	Position	fiktive Mitteltemperatur [°C]	Temperaturgradienten [°C]
T1	-11,4	29,4	bei Basisstation	9,0	±20,4
T2	-8,2	31,8	Platte innen	11,8	±20,0
T3	-6,8	28,4	Balken innen	10,8	±17,6
T4	-7,3	30,0	Balken außen	11,3	±18,6
T5	-9,7	32,7	Platte außen	11,5	±21,2

Tab. 7: Darstellung Temperaturdaten

6.1.2 Hangbrücke Würgau Stahlverbund

In Bild 19 ist der Temperaturverlauf über den Messzeitraum und in Tabelle 8 die Messwerte je Sensor dargestellt.

- Die Lufttemperatur am Widerlager (T1) lag in diesem Zeitraum zwischen -12,6 °C und 30,7 °C.
- Die dabei höchste gemessene Betontemperatur erreichte mit 35,4 °C Sensor T2.
- Die niedrigste gemessene Betontemperatur lag mit -10,6 °C auf Sensor T3.
- Die dabei höchste gemessene Stahltemperatur war mit +34,9 °C auf Sensor T4.

- Die niedrigste gemessene Stahltemperatur lag bei -12,4 °C ebenfalls auf Sensor T4.

In den gemessenen Temperaturen der Stahlverbund-Brücke in Würgau ist zu erkennen, dass in den Herbst- und Wintermonaten aufgrund der geografischen Lage und Ausrichtung an sonnenreichen Tagen die Temperaturspitzen an der Stahloberfläche der sonnenzugewandten Seite in den Nachmittagsstunden größer sind, sich aber daraus nur ein geringfügiger Einfluss auf den Tagesgang des Lagerweges ergibt.

In Bild 20 ist deutlich erkennbar, dass bei direkter Sonneneinstrahlung die Bauwerkstemperatur steigt und somit sich auch die Lagerverschiebungen größer ausbilden als an schattigen Tagen.

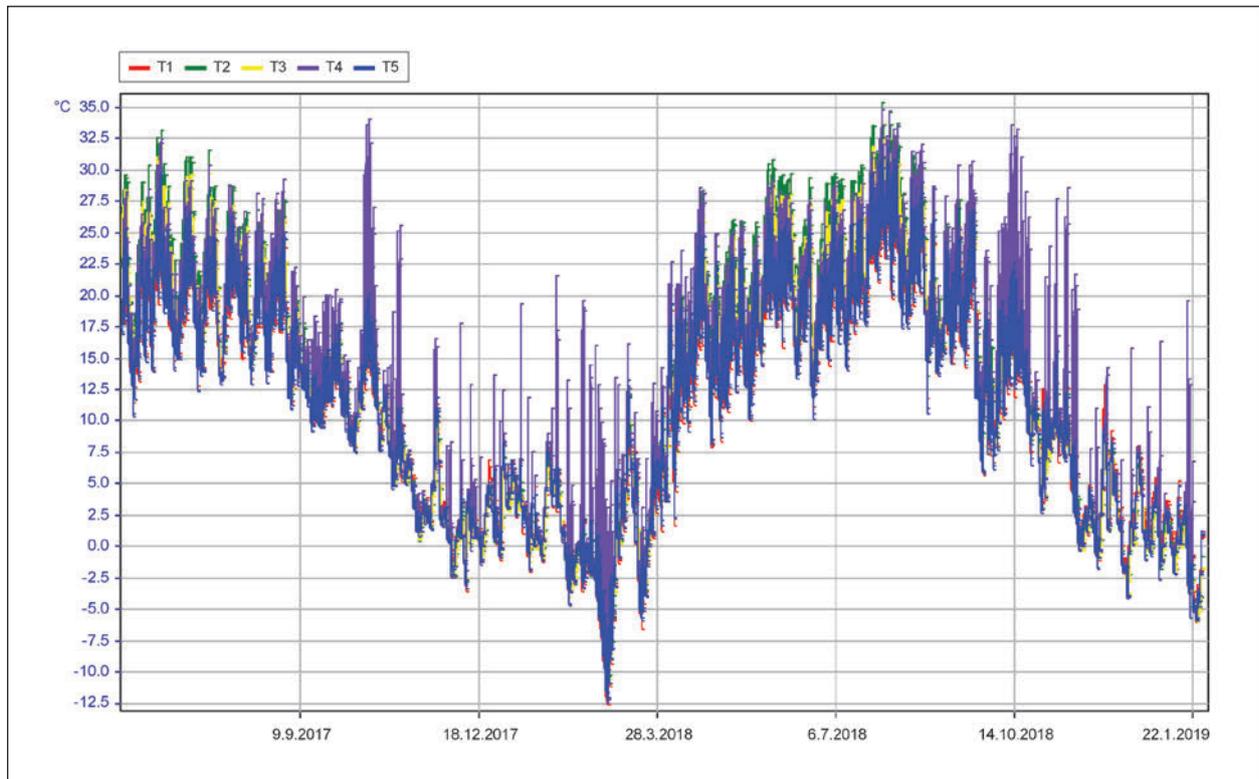


Bild 19: Temperaturverlauf – Hangbrücke Würgau Stahlverbund – 01.06.2017-27.01.2019

Sensor	Min [°C]	Max [°C]	Position	fiktive Mitteltemperatur [°C]	Temperaturgradienten [°C]
T1	-12,6	30,7	bei Basisstation	9,1	±21,7
T2	-10,3	35,4	Platte innen	12,6	±22,9
T3	-10,6	33,8	Platte außen	11,6	±22,2
T4	-12,4	34,9	Träger außen	11,3	±23,7
T5	-12,2	32,7	Träger innen	10,3	±22,5

Tab. 8: Darstellung Temperaturdaten

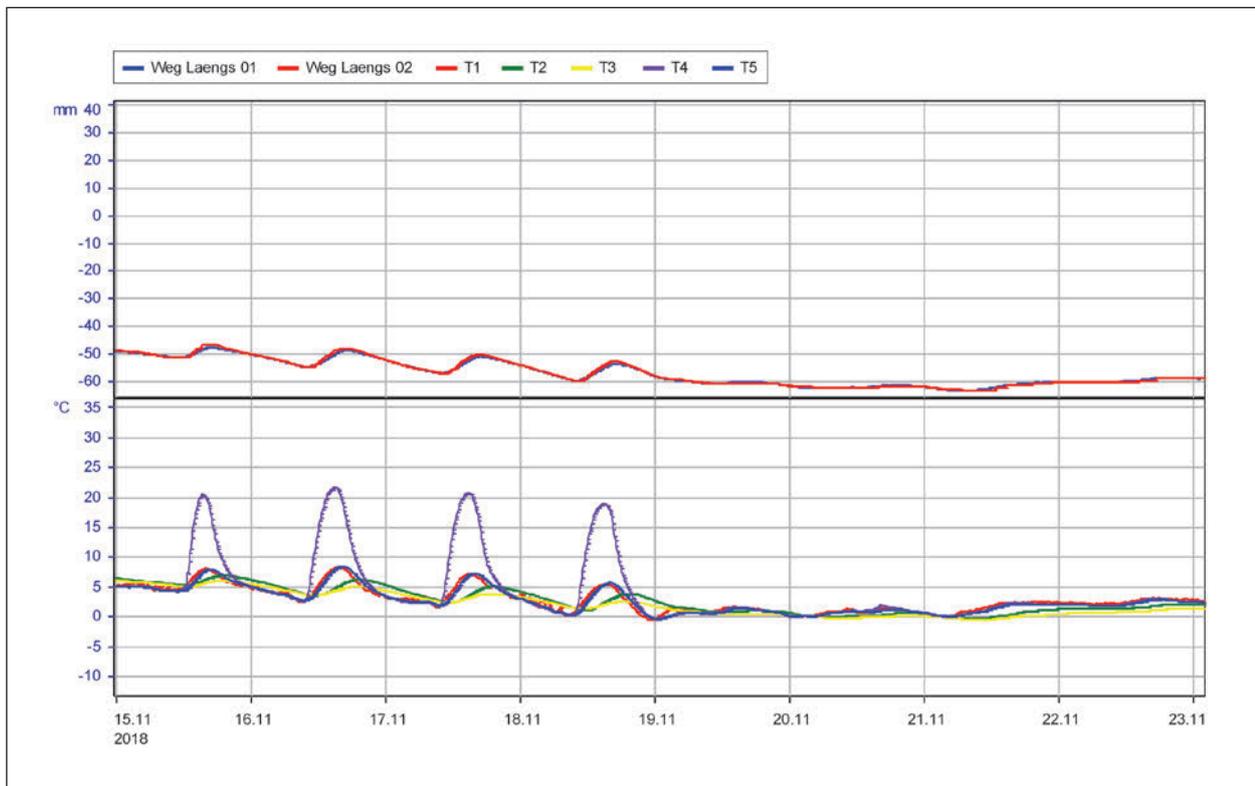


Bild 20: Temperaturverlauf Herbstwoche – Hangbrücke Würgau Stahlverbund – 15.11.2018-22.11.2018

6.1.3 Trubbachbrücke

In Bild 21 ist der Temperaturverlauf über den Messzeitraum und in Tabelle 9 die Messwerte je Sensor dargestellt.

- Die Lufttemperatur am Widerlager (T1) lag in diesem Zeitraum zwischen -8,5 °C und 29,7 °C.
- Die dabei höchste gemessene Betontemperatur war mit +31,5 °C auf Sensor T5.
- Die niedrigste gemessene Betontemperatur lag bei -7,5 °C ebenfalls auf Sensor T5.

6.1.4 Paradiestalbrücke

In Bild 22 ist der Temperaturverlauf über den Messzeitraum und in Tabelle 10 die Messwerte je Sensor dargestellt.

- Die Lufttemperatur am Widerlager (T1) lag in diesem Zeitraum zwischen -13,1 °C und 30,9 °C.
- Die dabei höchste gemessene Betontemperatur war mit +32,8 °C auf Sensor T3.
- Die niedrigste gemessene Betontemperatur lag bei -11,4 °C ebenfalls auf Sensor T3.

Sensor	Min [°C]	Max [°C]	Position	fiktive Mitteltemperatur [°C]	Temperaturgradienten [°C]
T1	-8,5	29,7	bei Basisstation	10,6	±19,1
T2	-6,5	29,1	Balken Schattenseite	11,3	±17,8
T3	-6,8	31,2	Platte Schattenseite	12,2	±19,0
T4	-6,5	30,2	Balken Sonnenseite	11,9	±18,4
T5	-7,5	31,5	Platte Sonnenseite	12,0	±19,5

Tab. 9: Darstellung Temperaturdaten

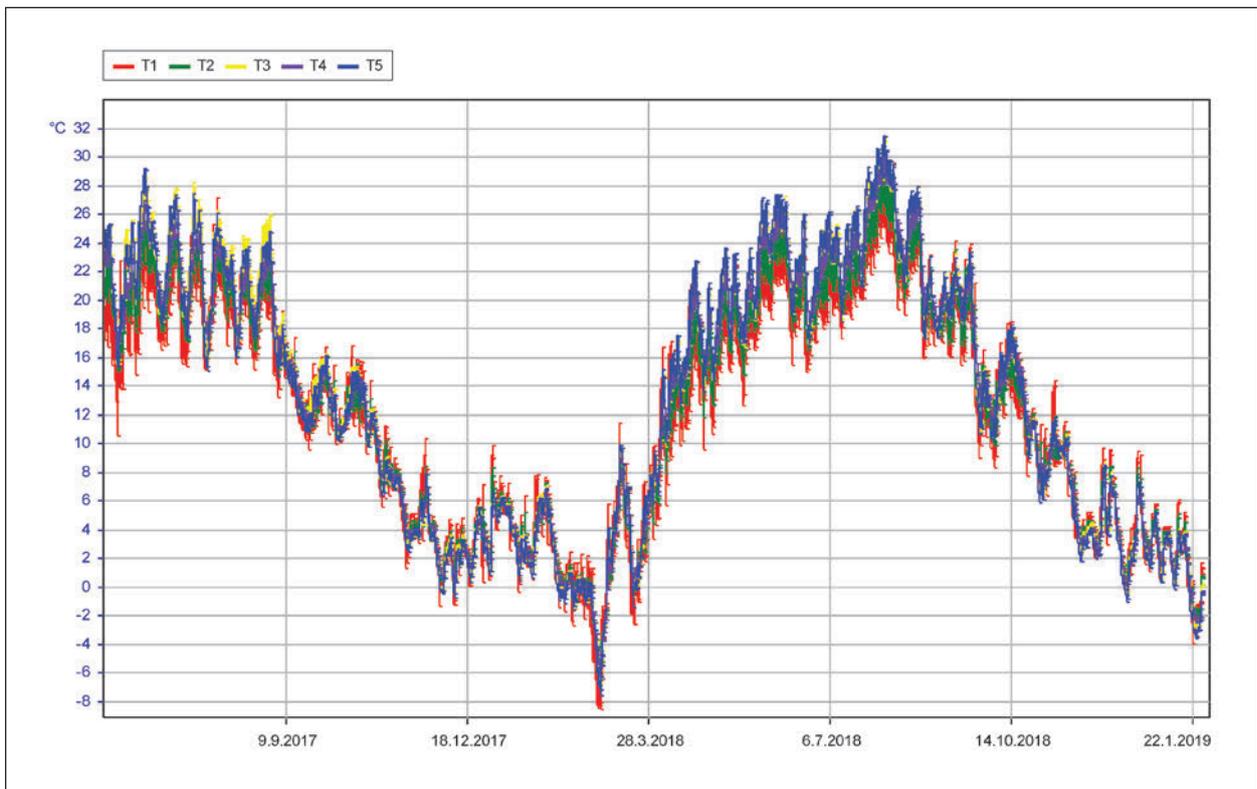


Bild 21: Temperaturverlauf – Trubbachbrücke – 01.06.2017-27.01.2019

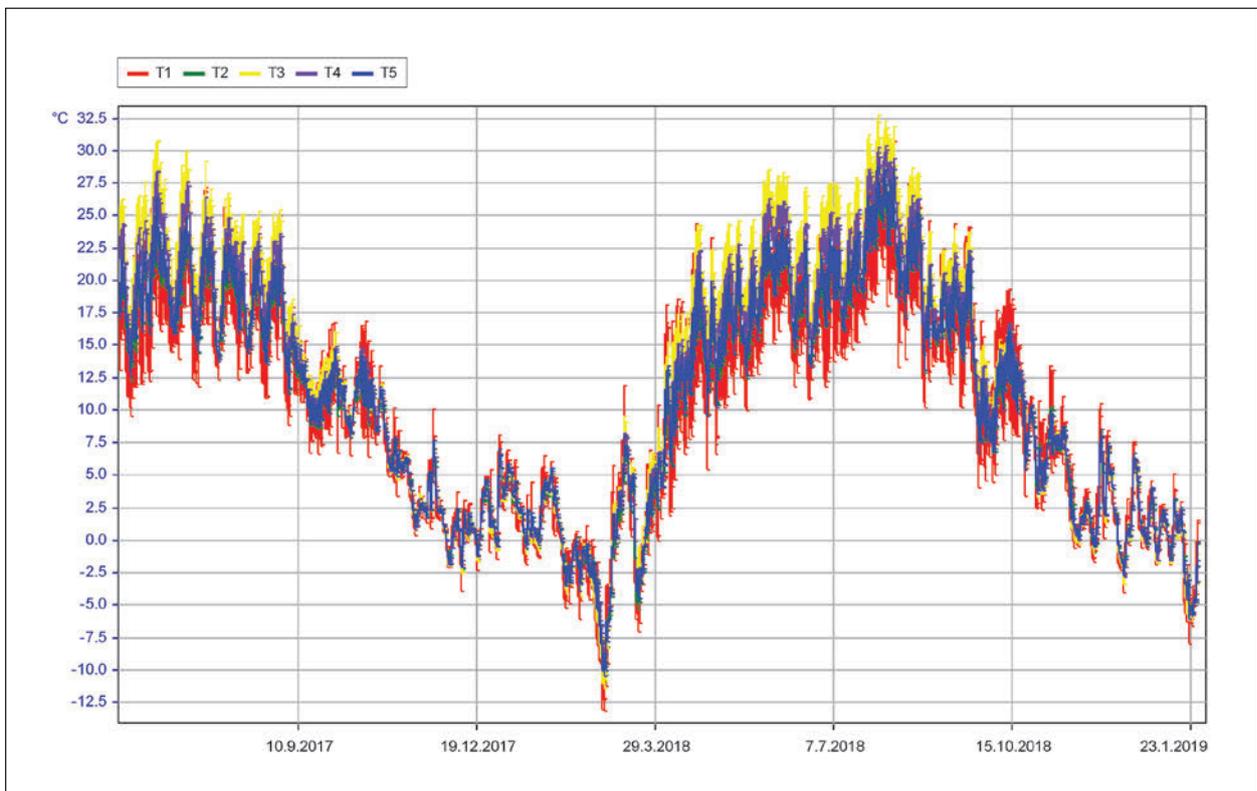


Bild 22: Temperaturverlauf – Paradiestalbrücke – 02.06.2017-20.08.2018

Sensor	Min [°C]	Max [°C]	Position	fiktive Mitteltemperatur [°C]	Temperaturgradienten [°C]
T1	-13,1	30,9	bei Basisstation	8,9	±22,0
T2	-11,0	28,0	Balken innen	8,5	±19,5
T3	-11,4	32,8	Platte innen	10,7	±22,1
T4	-9,6	30,4	Platte außen	10,4	±20,0
T5	-10,4	28,8	Balken außen	9,2	±19,6

Tab. 10: Darstellung Temperaturdaten

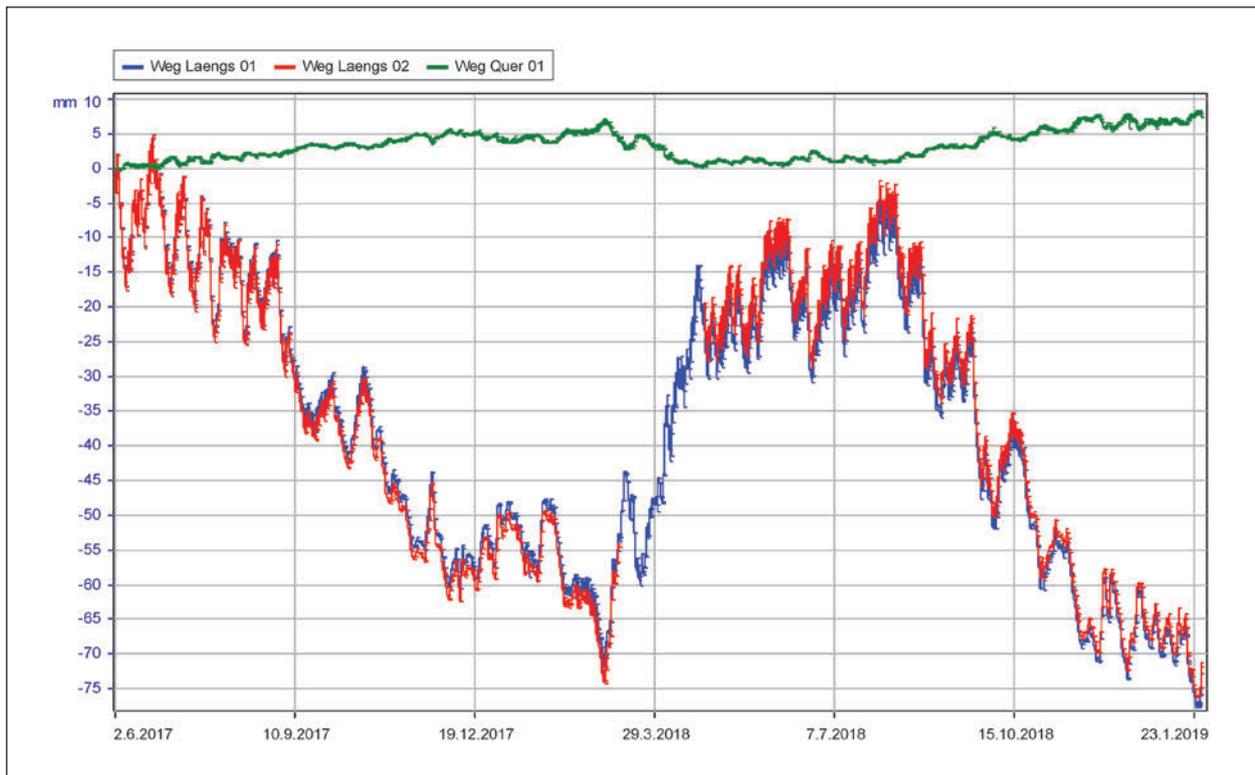


Bild 23: Längenänderung – Hangbrücke Würgau Beton- 02.06.2017-27.01.2019

6.2 Längenänderung

Die Längsbewegungen infolge Temperaturschwankungen werden durch die Wegaufnehmer wie in Kapitel 4 beschrieben (Position, Bauart) gemessen. Die Messungen der Verschiebungen zeigen im Beobachtungszeitraum vom 01.06.2017 bis 27.01.2019 den zu erwarteten Verlauf.

6.2.1 Hangbrücke Würgau Beton

In Bild 23 ist die Längenänderung in einem Diagramm dargestellt und in Tabelle 11 die dazugehörigen maximalen und minimalen Auslenkungen aufgelistet.

Sensor	Weg Min/Max	Gemessener Weg
Weg Längs 01	-77,58 mm	82,42 mm
	4,84 mm	
Weg Längs 02	-76,20 mm	81,14 mm
	4,94 mm	
Weg Quer 01	-0,30 mm	8,65 mm
	8,35 mm	

Tab. 11: Darstellung Auslenkungen der Wegaufnehmer

Bei der Hangbrücke Würgau Beton ist anzumerken, dass ein abnehmender Trend in den gemessenen Wegen stattgefunden hat. Dieses Verhalten ist möglicherweise auf eine noch nicht abgeschlossene

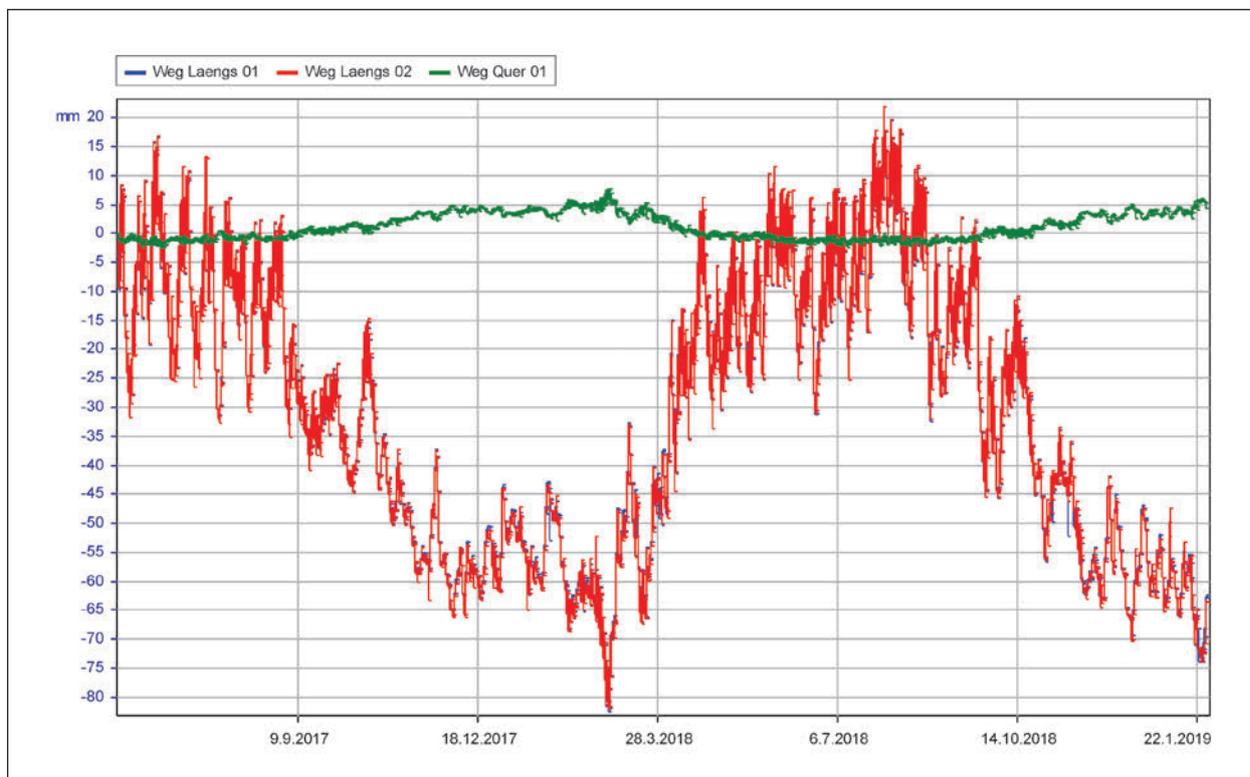


Bild 24: Längenänderung – Hangbrücke Würgau Stahlverbund – 01.06.2017-27.01.2019

ne Tragwerksverformung zufolge Kriechen und Schwinden des jungen Bauwerks zurückzuführen, welche erfahrungsgemäß innerhalb der ersten drei Jahren nach Errichtung noch nicht abgeklungen sind. Im kurzen Messzeitraum ist diese Vermutung jedoch nicht eindeutig verifizierbar, sodass ein Sensordrift nicht ausgeschlossen werden kann. Dies kann zukünftig anhand der Lagerstellung weiter beobachtet werden.

Sensor	Weg Min/Max	Gemessener Weg
Weg Längs 01	-82,42 mm 21,95 mm	104,37 mm
Weg Längs 02	-81,98 mm 22,12 mm	104,10 mm
Weg Quer 01	-2,35 mm 7,79 mm	10,14 mm

Tab. 12: Darstellung Auslenkungen der Wegaufnehmer

6.2.2 Hangbrücke Würgau Stahlverbund

In Bild 24 ist die Längenänderung in einem Diagramm dargestellt und in Tabelle 12 die dazugehörigen maximalen und minimalen Auslenkungen aufgelistet.

6.2.3 Trubbachbrücke

In Bild 25 ist die Längenänderung in einem Diagramm dargestellt und in Tabelle 13 die dazugehörigen maximalen und minimalen Auslenkungen aufgelistet.

Sensor	Weg Min/Max	Gemessener Weg
Weg Längs 01	-21,25 mm 3,51 mm	24,76 mm
Weg Längs 02	-18,93 mm 3,78 mm	22,71 mm
Weg Quer 01	-1,25 mm 0,77 mm	2,02 mm

Tab. 13: Darstellung Auslenkungen der Wegaufnehmer

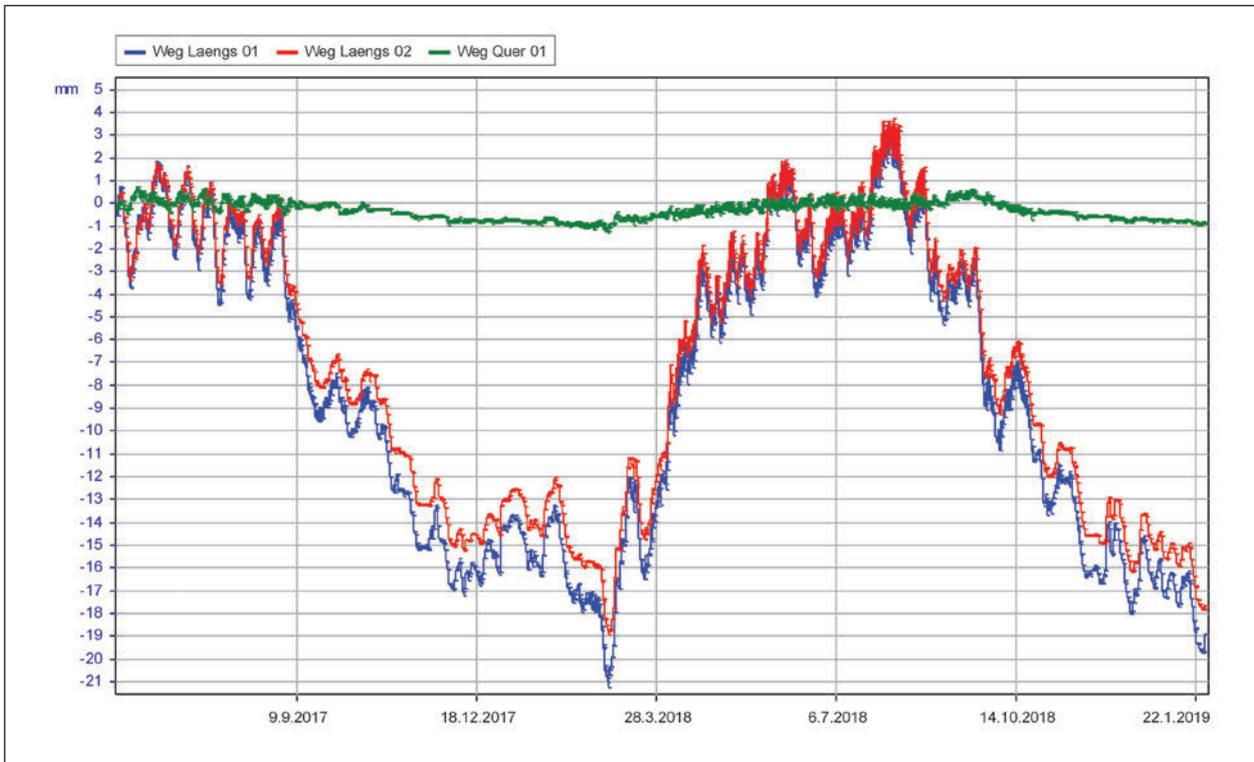


Bild 25: Längenänderung – Trubbachbrücke – 01.06.2017 – 27.01.2019

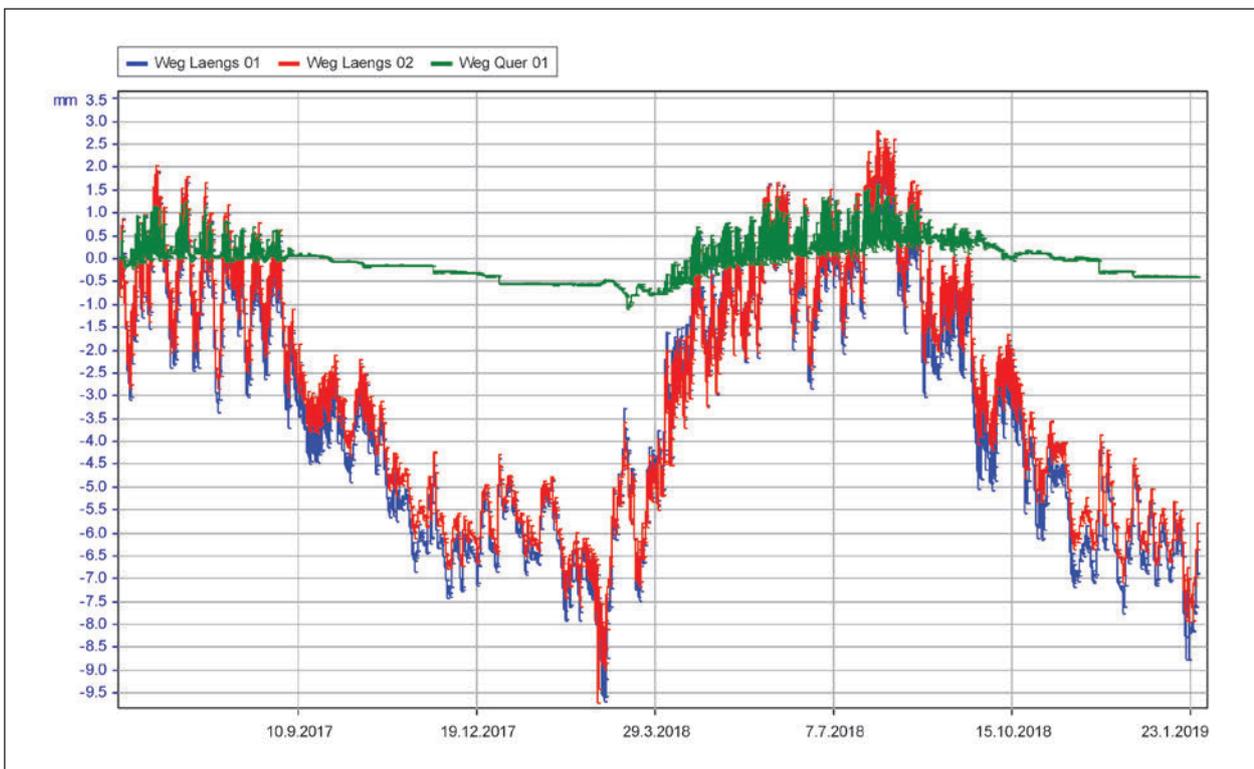


Bild 26: Längenänderung – Paradiestabücke – 02.06.2017 – 27.01.2019

6.2.4 Paradiestabücke

In Bild 26 ist die Längenänderung in einem Diagramm dargestellt und in Tabelle 14 die dazugehörigen maximalen und minimalen Auslenkungen aufgelistet.

Gemäß Wartungsprotokoll 2017 sollte die Sensorhalterung für den Sensor Weg Quer 01 repariert werden. Aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit (Steiger erforderlich, stark eingeschränkte Platzverhältnisse) und der untergeordneten Bedeutung der Ergebnisse dieses Sensors wurde auf eine Reparatur verzichtet. Die auffälligen Sprünge im Messverlauf des Sensors Weg Quer 01 sind auf diesen konstruktionsbedingten Umstand zurückzuführen, was jedoch keinen Einfluss auf die restlichen Sensoren und auf die Forschungsergebnisse darstellt.

6.3 Abhängigkeiten Weg – Temperatur

Um die Abhängigkeit der gemessenen Wege zur gemessenen Temperatur besser darstellen zu können, wurden die Wege der einzelnen Messobjekte auf einen Temperaturunterschied von 1 °C auf die Verschiebelänge der jeweiligen Brücke umgerechnet und in Bild 27 dargestellt. Die Längenänderung des horizontalen Weges in Abhängigkeit von der Temperatur zur Brückenlänge ist nichtlinear. Diese Nichtlinearität kann Bild 27 entnommen werden.

7 Parameterstudie

7.1 Vergleich gemessener vs. rechnerischer Lagerwege

Für den Vergleich werden zunächst die rechnerischen Lagerwege gemäß aktuell gültiger Norm (Ausgabe 2012) ermittelt. Ausgangspunkt für die Berechnung sind die normativen Außenlufttemperaturen von $T_{\min} = -24 \text{ °C}$ und $T_{\max} = 37 \text{ °C}$ nach DIN EN 1991-1-5, NDP zu 6.1.3.2. Anschließend wird dieselbe Berechnung durchgeführt, doch anstelle der normativen Außenlufttemperaturen werden die Wetterdaten aus naheliegenden Wetterstationen herangezogen, welche aus den Messdaten des Deutschen Wetterdienstes stammen (siehe Anhang 4). Diese Werte werden sowohl miteinander als auch mit den gemessenen Werten gegenübergestellt, um daraus Schlüsse hinsichtlich Reserven ziehen zu können. Die Rechenergebnisse sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 festgehalten.

Sensor	Weg Min/Max	Gemessener Weg
Weg Längs 01	-9,68 mm	12,30 mm
	2,62 mm	
Weg Längs 02	-9,71 mm	12,52 mm
	2,81 mm	
Weg Quer 01	-1,09 mm	2,72 mm
	1,63 mm	

Tab. 14: Darstellung Auslenkungen der Wegaufnehmer

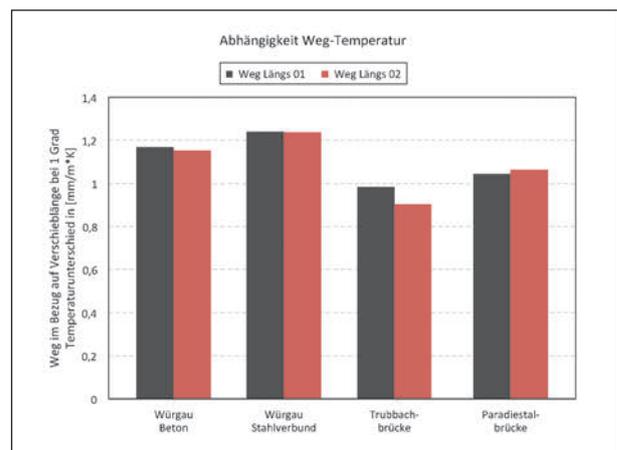


Bild 27: Längenänderung je Brücke bei 1 °C Temperaturunterschied in Bezug auf die Verschiebelänge

In den folgenden Kapiteln wird folgende Nomenklatur (entnommen aus DIN EN 1990/NA/A1 und DIN EN 1991-1-5) verwendet:

T_{\min}	minimale Außenlufttemperatur mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,02
T_{\max}	maximale Außenlufttemperatur mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,02
$T_{e,\min}$	minimaler konstanter Temperaturanteil für Brücken
$T_{e,\max}$	maximaler konstanter Temperaturanteil für Brücken
$\Delta T_{N,\text{con}}$	maximale negative Änderung des konstanten Temperaturanteils für Brücken
$\Delta T_{N,\text{exp}}$	maximale positive Änderung des konstanten Temperaturanteils für Brücken
$T_{ed,\min}$	Bemessungswert des minimalen konstanten Temperaturanteils
$T_{ed,\max}$	Bemessungswert des maximalen konstanten Temperaturanteils
T_0	Aufstelltemperatur des Bauteils zur Bestimmung seiner Zwängung

ΔT_0	zusätzliches Sicherheitselement zur Erfassung der Unsicherheit der Lagerposition bei der Aufstelltemperatur T_0	= (-)45,1 °C bzw. (-)36 °C (ohne γ_F)
$\Delta T_{N,con,Dil}$	Bemessungswert der maximalen negativen Änderung	$\Delta T_{N,exp,Dil} = T_{ed,max} - T_0$ = (+)49,2 °C bzw. (+)39 °C (ohne γ_F)
$\Delta T_{N,exp,Dil}$	Bemessungswert der maximalen positiven Änderung	Verkürzung $\varepsilon_{T-,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,con,Dil}$ Ausdehnung $\varepsilon_{T+,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,exp,Dil}$ Mit: $\alpha_T = 10^{-5}$ 1/K für Beton

7.1.1 Rechnerische Lagerwege gem. Eurocode

Der konstante Temperaturanteil berechnet sich nach DIN EN 1991-1-5, Absatz 6.1.3.3 mit der Aufstelltemperatur $T_0 = 10$ °C nach DIN EN 1991-1-5, Anhang A1(3) sowie der extremalen Außenlufttemperatur $T_{min} = -24$ °C und $T_{max} = 37$ °C nach DIN EN 1991-1-5, NDP zu 6.1.3.2.

Die Hangbrücke Würzgau aus Beton, die Paradiestalbrücke und die Brücke über den Trubbach gehören als Betonbrücken zum Brückentyp 3. Die maßgebenden Temperaturen sind:

$$T_{e,max} = T_{max} + 2 \text{ °C} = 39 \text{ °C}$$

$$T_{e,min} = T_{min} + 8 \text{ °C} = -16 \text{ °C}$$

Daraus folgt:

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = (-)26 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = (+)29 \text{ °C}$$

Nach DIN EN 1990/NA/A1, NA.E.5.2.2 ergeben sich die Bemessungswerte der extremalen Temperaturanteile:

$$\begin{aligned} T_{ed,min} &= T_0 - \gamma_F \times \Delta T_{N,con} - \Delta T_0 \\ &= 10 - 1,35 \times 26 \text{ °C} - 10 \\ &= (-)35,1 \text{ °C bzw. (-)26 °C (ohne } \gamma_F) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{ed,max} &= T_0 + \gamma_F \times \Delta T_{N,exp} + \Delta T_0 \\ &= 10 + 1,35 \times 29 \text{ °C} + 10 \\ &= (+)59,2 \text{ °C bzw. (+)49 °C (ohne } \gamma_F) \end{aligned}$$

Mit $\Delta T_0 = 10$ °C nach Tabelle NA.E.5, Fall 2

$T_0, \Delta T_{N,con}, \Delta T_{N,exp}$ nach DIN EN 1991-1-5

$\gamma_F = 1,35$ nach NA.E.5.2.2(2)

Daraus folgt für die konstanten Temperaturanteile:

$$\Delta T_{N,con,Dil} = T_0 - T_{ed,min}$$

Die Hangbrücke Würzgau aus Stahlverbund gehört zu Brückentyp 2. Es gilt hier:

$$T_{e,max} = T_{max} + 4 \text{ °C} = 41 \text{ °C}$$

$$T_{e,min} = T_{min} + 4 \text{ °C} = -20 \text{ °C}$$

Daraus folgt:

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = (-)30 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{ed,max} - T_0 = (+)31 \text{ °C}$$

Nach DIN EN 1990/NA/A1, NA.E.5.2.2 ergeben sich die Bemessungswerte der extremalen Temperaturanteile:

$$\begin{aligned} T_{ed,min} &= T_0 - \gamma_F \times \Delta T_{N,con} - \Delta T_0 \\ &= 10 - 1,35 \times 30 \text{ °C} - 10 \\ &= (-)40,5 \text{ °C bzw. (-)30 °C (ohne } \gamma_F) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{ed,max} &= T_0 + \gamma_F \times \Delta T_{N,exp} + \Delta T_0 \\ &= 10 + 1,35 \times 31 \text{ °C} + 10 \\ &= (+)61,85 \text{ °C bzw. (-)51 °C (ohne } \gamma_F) \end{aligned}$$

Mit $\Delta T_0 = 10$ °C nach Tabelle NA.E.5, Fall 2

$T_0, \Delta T_{N,con}, \Delta T_{N,exp}$ nach DIN EN 1991-1-5

$\gamma_F = 1,35$ nach NA.E.5.2.2(2)

Daraus folgt für die konstanten Temperaturanteile:

$$\begin{aligned} \Delta T_{N,con,Dil} &= T_0 - T_{ed,min} \\ &= (-)50,5 \text{ °C bzw. (-)40 °C (ohne } \gamma_F) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{N,exp,Dil} &= T_{ed,max} - T_0 \\ &= (+)51,85 \text{ °C bzw. (+)41 °C (ohne } \gamma_F) \end{aligned}$$

Verkürzung $\varepsilon_{T-,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,con,Dil}$

Ausdehnung $\varepsilon_{T+,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,exp,Dil}$

Mit: $\alpha_T = 1,2 \times 10^{-5}$ 1/K für Stahlverbund

7.1.2 Rechnerische Lagerwege in Bezug auf die Außenlufttemperatur

Anhand von gemessenen jährlichen Extremwerten der Temperatur, entnommen aus Daten des Deutschen Wetterdiensts, werden die Quantilwerte mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit p von 2 % bzw. Unterschreitenswahrscheinlichkeit $1-p$ von 98 % ermittelt. In Tabelle 30 im Anhang sind die Wetterstationen, deren Lage sowie der Zeitraum und die Anzahl der jährlichen Extremwertpaare (Maxima und Minima) aufgelistet.

Tabelle 15 listet die Quantilwerte der Jahresmaxima und -minima für die betrachteten Wetterstationen auf. Diese Werte entsprechen den Bemessungswerten nach DIN EN 1991-1-5. Dabei wird die Annahme einer Gumbel-Verteilung gewählt und diese mithilfe von Wahrscheinlichkeitspapieren (siehe Bild 28 und Anhang 4) überprüft.

Wie im vorigen Kapitel werden die konstanten Temperaturanteile in Anlehnung an die DIN EN 1991-1-5 ermittelt. Es werden jedoch anstelle der gemäß DIN EN 1991-1-5, NDP zu 6.1.3.2 angeführten Werte für die minimalen und maximalen Außenlufttemperaturen die Extremwerte aus nahegelegenen Wetterstationen herangezogen, um einen direkten Vergleich mit den gemessenen Lagerwegen zu er-

Station	Ort	$T_{\max,98\%}$	$T_{\min,98\%}$
282	Bamberg	39,0	-30,4
320	Heinersreuth-Vollhof	39,0	-30,5
867	Lautertal-Oberlauter	38,6	-26,7
1107	Ebrach	38,0	-28,1
1279	Möhrendorf-Kleinseebach	40,1	-28,5
1721	Gräfenberg-Kasberg	38,3	-21,4
2600	Kitzingen	46,2	-26,0
2680	Königshofen, Bad	38,7	-32,1
2750	Kronach	39,0	-26,8
3667	Nürnberg-Netzstahl	41,0	-26,9
3668	Nürnberg	39,4	-28,9

Tab. 15: Bemessungswerte der Lufttemperatur für die Wetterstationen

möglichen. Diese Temperaturen sind in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich. Die Aufstelltemperatur $T_0 = 10 \text{ °C}$ wird nach DIN EN 1991-1-5, Anhang A1(3) übernommen.

Um Bemessungswerte für die Brückenstandorte zu ermitteln, werden anhand der Wetterstationsdaten und deren Lage auf die Werte an den Brückenstandorten interpoliert (siehe Bild 29 und Bild 30). Tabelle 16 listet die Bemessungswerte der Außenlufttemperatur für die Brückenstandorte.

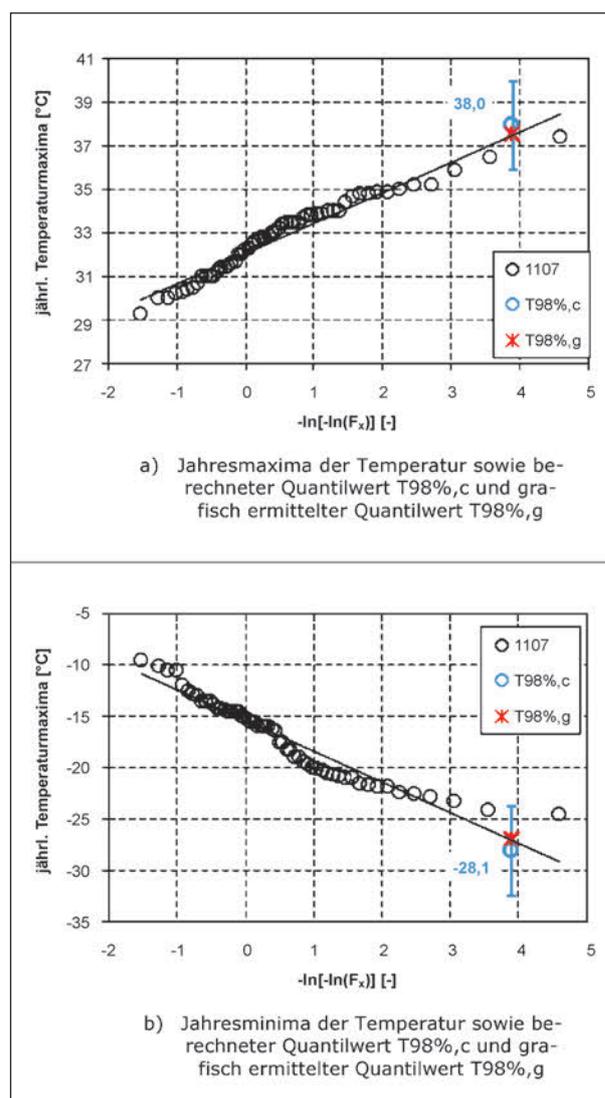


Bild 28: Statistische Verteilung der Jahresextrema auf Gumbelpapier für die Wetterstation Nr. 1107 in Ebrach

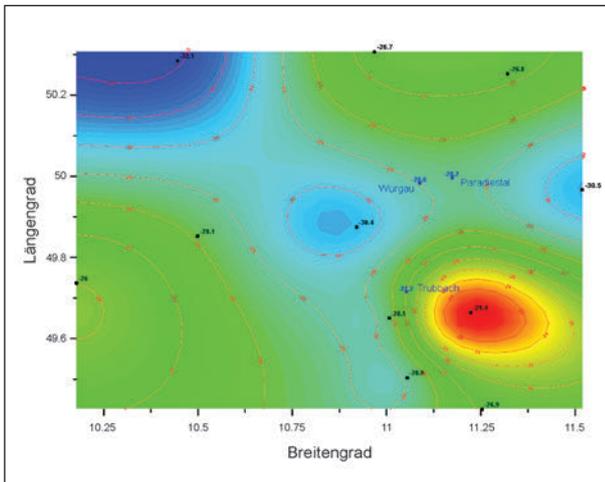


Bild 29: Interpolation der Bemessungstemperaturen $T_{\min,98\%}$ für die Brückenstandorte

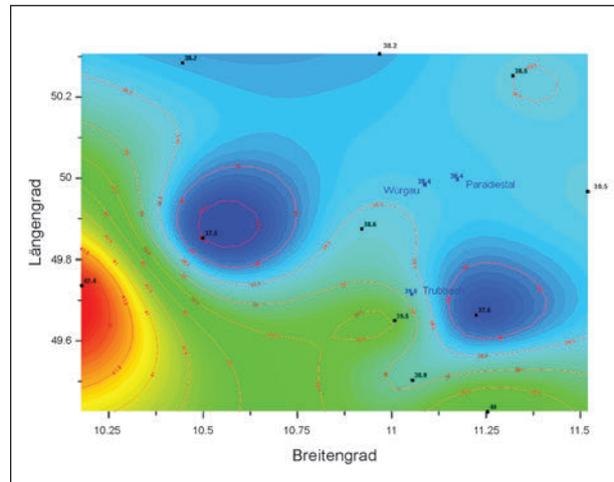


Bild 30: Interpolation der Bemessungstemperaturen $T_{\max,98\%}$ für die Brückenstandorte

Ort	Breitengrad	Längengrad	$T_{W,\max,98\%,c}$ [°C]	$T_{W,\min,98\%,c}$ [°C]
Würgau	11,087593	49,983136	38,9	-28,6
Trubbach	11,052781	49,714536	39,6	-27,2
Paradiestal	11,174292	49,996341	38,9	-28,2

Tab. 16: Extremwerte aus Wetterstationen in der Umgebung

Hangbrücke Würgau Beton

$$T_{e,\max} = T_{\max} + 2 \text{ °C} = 40,9 \text{ °C}$$

$$T_{e,\min} = T_{\min} + 8 \text{ °C} = -20,6 \text{ °C}$$

Daraus folgt:

$$\Delta T_{N,\text{con}} = T_0 - T_{e,\min} = (-)30,6 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{N,\text{exp}} = T_{e,\max} - T_0 = (+)30,9 \text{ °C}$$

Nach DIN EN 1990/NA/A1, NA.E.5.2.2 ergeben sich die Bemessungswerte der extremalen Temperaturanteile:

$$T_{ed,\min} = T_0 - \gamma_F \times \Delta T_{N,\text{con}} - \Delta T_0 = 10 - 1,35 \times 30,6 \text{ °C} - 10 = (-)41,3 \text{ °C} \text{ bzw. } (-)30,6 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$T_{ed,\max} = T_0 + \gamma_F \times \Delta T_{N,\text{exp}} + \Delta T_0 = 10 + 1,35 \times 30,9 \text{ °C} + 10 = (+)61,7 \text{ °C} \text{ bzw. } (+)50,9 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

Mit $\Delta T_0 = 10 \text{ °C}$ nach Tabelle NA.E.5, Fall 2

T_0 , $\Delta T_{N,\text{con}}$, $\Delta T_{N,\text{exp}}$ nach DIN EN 1991-1-5

$$\gamma_F = 1,35 \text{ nach NA.E.5.2.2(2)}$$

Daraus folgt für die konstanten Temperaturanteile:

$$\Delta T_{N,\text{con,Dil}} = T_0 - T_{ed,\min} = (-)51,3 \text{ °C} \text{ bzw. } (-)40,6 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$\Delta T_{N,\text{exp,Dil}} = T_{ed,\max} - T_0 = (+)51,7 \text{ °C} \text{ bzw. } (+)40,9 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$\text{Verkürzung } \varepsilon_{T-,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,\text{con,Dil}}$$

$$\text{Ausdehnung } \varepsilon_{T+,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,\text{exp,Dil}}$$

$$\text{Mit: } \alpha_T = 10^{-5} \text{ 1/K für Beton}$$

Hangbrücke Würgau Stahlverbund

$$T_{e,max} = T_{max} + 4 \text{ °C} = 42,9 \text{ °C}$$

$$T_{e,min} = T_{min} + 4 \text{ °C} = -24,6 \text{ °C}$$

Daraus folgt:

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = (-)34,6 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{ed,max} - T_0 = (+)32,9 \text{ °C}$$

Nach DIN EN 1990/NA/A1, NA.E.5.2.2 ergeben sich die Bemessungswerte der extremalen Temperaturanteile:

$$T_{ed,min} = T_0 - \gamma_F \times \Delta T_{N,con} - \Delta T_0 = 10 - 1,35 \times 34,6 \text{ °C} - 10 = (-)46,7 \text{ °C bzw. } (-)34,6 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$T_{ed,max} = T_0 + \gamma_F \times \Delta T_{N,exp} + \Delta T_0 = 10 + 1,35 \times 32,9 \text{ °C} + 10 = (+)64,4 \text{ °C bzw. } (-)52,9 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

Mit $\Delta T_0 = 10 \text{ °C}$ nach Tabelle NA.E.5, Fall 2

$T_0, \Delta T_{N,con}, \Delta T_{N,exp}$ nach DIN EN 1991-1-5

$$\gamma_F = 1,35 \text{ nach NA.E.5.2.2(2)}$$

Daraus folgt für die konstanten Temperaturanteile:

$$\Delta T_{N,con,Dil} = T_0 - T_{ed,min} = (-)56,7 \text{ °C bzw. } (-)44,6 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$\Delta T_{N,exp,Dil} = T_{ed,max} - T_0 = (+)54,4 \text{ °C bzw. } (+)42,9 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$\text{Verkürzung } \varepsilon_{T-,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,con,Dil}$$

$$\text{Ausdehnung } \varepsilon_{T+,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,exp,Dil}$$

Mit: $\alpha_T = 1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$ für Stahlverbund

Trubbachbrücke

$$T_{e,max} = T_{max} + 2 \text{ °C} = 41,6 \text{ °C}$$

$$T_{e,min} = T_{min} + 8 \text{ °C} = -19,2 \text{ °C}$$

Daraus folgt:

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = (-)29,2 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = (+)31,6 \text{ °C}$$

Nach NA.E.5.2.2 ergeben sich die Bemessungswerte der extremalen Temperaturanteile:

$$T_{ed,min} = T_0 - \gamma_F \times \Delta T_{N,con} - \Delta T_0 = 10 - 1,35 \times 29,2 \text{ °C} - 10 = (-)39,4 \text{ °C bzw. } (-)29,2 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$T_{ed,max} = T_0 + \gamma_F \times \Delta T_{N,exp} + \Delta T_0 = 10 + 1,35 \times 31,6 \text{ °C} + 10 = (+)62,7 \text{ °C bzw. } (+)51,6 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

Mit $\Delta T_0 = 10 \text{ °C}$ nach Tabelle NA.E.5, Fall 2

$T_0, \Delta T_{N,con}, \Delta T_{N,exp}$ nach DIN EN 1991-1-5

$$\gamma_F = 1,35 \text{ nach NA.E.5.2.2(2)}$$

Daraus folgt für die konstanten Temperaturanteile:

$$\Delta T_{N,con,Dil} = T_0 - T_{ed,min} = (-)49,4 \text{ °C bzw. } (-)39,2 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$\Delta T_{N,exp,Dil} = T_{ed,max} - T_0 = (+)52,7 \text{ °C bzw. } (+)41,6 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$\text{Verkürzung } \varepsilon_{T-,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,con,Dil}$$

$$\text{Ausdehnung } \varepsilon_{T+,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,exp,Dil}$$

Mit: $\alpha_T = 10^{-5} \text{ 1/K}$ für Beton

Paradiestabücke

$$T_{e,max} = T_{max} + 2 \text{ °C} = 40,9 \text{ °C}$$

$$T_{e,min} = T_{min} + 8 \text{ °C} = -20,2 \text{ °C}$$

Daraus folgt:

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = (-)30,2 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = (+)30,9 \text{ °C}$$

Nach NA.E.5.2.2 ergeben sich die Bemessungswerte der extremalen Temperaturanteile:

$$T_{ed,min} = T_0 - \gamma_F \times \Delta T_{N,con} - \Delta T_0 = 10 - 1,35 \times 30,2 \text{ °C} - 10 = (-)40,8 \text{ °C bzw. } (-)30,2 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$T_{ed,max} = T_0 + \gamma_F \times \Delta T_{N,exp} + \Delta T_0 = 10 + 1,35 \times 30,9 \text{ °C} + 10 = (+)61,7 \text{ °C bzw. } (+)50,9 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

Mit $\Delta T_0 = 10 \text{ °C}$ nach Tabelle NA.E.5, Fall 2

$T_0, \Delta T_{N,con}, \Delta T_{N,exp}$ nach DIN EN 1991-1-5

$$\gamma_F = 1,35 \text{ nach NA.E.5.2.2(2)}$$

Daraus folgt für die konstanten Temperaturanteile:

$$\Delta T_{N,con,Dil} = T_0 - T_{ed,min} = (-)50,8 \text{ °C bzw. } (-)40,2 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$\Delta T_{N,exp,Dil} = T_{ed,max} - T_0 = (+)51,7 \text{ °C bzw. } (+)40,9 \text{ °C (ohne } \gamma_F)$$

$$\text{Verkürzung } \varepsilon_{T-,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,con,Dil}$$

$$\text{Ausdehnung } \varepsilon_{T+,d} = \alpha_T \times \Delta T_{N,exp,Dil}$$

Mit: $\alpha_T = 10^{-5} \text{ 1/K}$ für Beton

7.1.3 Rechnerische Lagerwege gem. Bestandsstatik

In den Bildern 31 bis Bild 34 werden die Lagerwege laut Bestandsstatik je Brücke angegeben.

Hangbrücke Würgau Beton

VERFASSER: K+S Ingenieur-Consult GmbH & Co. KG, Nürnberg		VoJ	
PROGRAMM:		151-0009	
BAUWERK: BW 80a, Hangbrücke Würgau	ASB NR. 6032 706	Datum 17.08.2015	

1.1.4 Lagerwege in Brückenlängsrichtung

Die Ermittlung der Lagerwege erfolgt nach DIN EN 1990/NA/A1:2012-08, NA.E.5.2. Nach Abs. NA.E.5.2.1 (2) sind die Werte für Kriechen und Schwinden mit dem Faktor 1,35 zu vergrößern.

Dabei wird als Belastungsalter $t_b = 3$ Tage für das Aufbringen der Vorspannung angesetzt.

Die Lagerwege werden vereinfachend für den Endzustand am Eingussystem ermittelt. Dabei wird der Bauablauf nach Statik V.A.1 angesetzt. Für den Bauzustand mit temporärem Festpunkt am Widerlager Achse 10 wird für die Achse 20 der Lagerweg des Endzustandes überprüft, ob diese auch für den Bauzustand ausreichend sind. Ggf. werden diese für den Bauzustand erhöht.

Aufgrund der verschiedenen Bettungsfälle für die Pfähle werden die Lagerwege an den unter Abschnitt V.A.1, Pkt. 1.4 'horizontale Auflagerkräfte' beschriebenen Systemen, Fall 1 bis 6 ermittelt.

a) LF Temperatur

Lastansatz siehe Statik V.A.1, 1.2.5 bzw. V.A.1, 1.4.2

Die konstanten Temperaturschwankungen gegenüber der angenommenen Aufstelltemperatur ergeben sich analog DIN EN 1991-1-5, 6.1.3.3. unter Berücksichtigung der Korrekturwerte nach Tab. NA.E.4,

- Pfeiler Achsen 10 bis 50: Fall 3 (mittl. BW-Temperatur geschätzt, Festpunktwechsel):

Verkürzung:	$\Delta T_{N,con,d} = \gamma_F \cdot \Delta T_{N,con,k} - \Delta T_0 = 1,35 \cdot -26 - 20 = 55,1$	- 55 K
Verlängerung:	$\Delta T_{N,exp,d} = \gamma_F \cdot \Delta T_{N,exp,k} - \Delta T_0 = 1,35 \cdot +29 + 20 = 59,2$	+ 59 K
- Pfeiler Achsen 60 bis 110: Fall 3 (mittl. BW-Temperatur geschätzt, Festpunktwechsel):

Verkürzung:	$\Delta T_{N,con,d} = \gamma_F \cdot \Delta T_{N,con,k} - \Delta T_0 = 1,35 \cdot -26 - 20 = 55,1$	- 45 K
Verlängerung:	$\Delta T_{N,exp,d} = \gamma_F \cdot \Delta T_{N,exp,k} - \Delta T_0 = 1,35 \cdot +29 + 20 = 59,2$	+ 49 K

Als Temperaturkoeffizient wird angesetzt: $\alpha_T = 10 \cdot 10^{-6} /K$

Geprüft

BAUTEIL: V.B Lager und ÜKO	ARCHIV-NR.:
BLOCK: 1 Lager- und Üko-Daten	SEITE: 5
VORGANG:	

Bild 31: Auszug aus der Bestandsstatik Teil V.B. 01, S. 19. Verformung aus Temperatur mit roter Farbe gekennzeichnet Bemessungswert für den konstanten Temperaturanteil $\Delta T_N = 114 \text{ K} \Rightarrow \epsilon_T = 1,14 \text{ ‰} \Delta L_{\text{Statik}} = 1,14 \times 182 = 207,5 \text{ mm}$

Hangbrücke Würgau Stahlverbund

VERFASSER: BÜRO DIPL.-ING. FRANK BÜCHTING, DR.-ING. WALTER STREIT, MÜNCHEN PROGRAMM:		
BAUWERK: BW 80 - 1 Hangbrücke Würgau Berg	T696 ASB-NR.:	DATUM:
<u>Lagerwege</u>		
1. <u>Bremsen</u> : Bremskräfte pro Stütze: 75 kN		
Stützenkopfauslenkung:		
$f \sim \frac{Pl^3}{3 \cdot EI} + \frac{M \cdot l}{C_F^R} =$ <p style="text-align: right; margin-right: 50px;">(Knotenlage in VC Pfeiler) cpr 2273</p> $= \frac{0,075 \cdot 8,5^3}{3 \cdot 34000 \cdot 0,188} + \frac{0,075 \cdot 8,5}{2273} \cdot 8,5$ $= 0,0024 + 0,0024 \Rightarrow 4,8 \text{ mm} \approx 5 \text{ mm}$		
2. <u>Lagerreibung</u> :		
Sichere Lücke, volle Überlagerung mit Bremsen		
$f = \frac{E_{44} \cdot L^2}{900 \cdot R_{\text{Bremsen}}} = 3,5 \text{ mm}$		
3. <u>Kts</u> : kts ~ 0 + 0,1 ‰		
Faktor 1,3 → 0,13 ‰ = ε _{Stk}		
4. <u>Temperatur</u> : Tabelle 6 Einstellung bei 10° → Erwärmung +75° Abkühlung -50° 125° → ε _T = 1,25 ‰ Durch Vergleichsrechnung geprüft		
BAUTEIL: VB Lager	SEITE: 24	ARCHIV NR.:
BLOCK: 1. Nachweise		
VORGANG: Lagerwege		

Bild 32: Auszug aus der Bestandsstatik Teil V.B. Lager, S. 24. Verformung aus Temperatur mit roter Farbe gekennzeichnet Bemessungswert für den konstanten Temperaturanteil $\Delta T_N = 125 \text{ K} \Rightarrow \varepsilon_T = 1,25 \text{ ‰} \Delta L_{\text{Statik}} = 1,25 \times 184,5 = 230,6 \text{ mm}$

Trubbachbrücke

Verfasser: schumann + vitak Rolf-Küch-Str 5 82439 Großweil Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG 08851/92910 info@schumann-vitak.de Programm: Advance Bridge 2014.01		
Bauwerk: Straßenbrücke	ASB-Nr.: 6232 683	Datum: 24.02.14

Extr.	v _r mm	v _s mm	v _t mm	ϑ _r ‰	ϑ _s ‰
max. ϑ _s	7.12	-0.91	10.00	-2.73	3.06
min. ϑ _s	14.67	-1.59	-10.00	2.16	-2.33

extr. Verformungen nur aus Überlagerung

Zusatzverformungen aus Fb 101 Anhang O

Grundwerte
 Verformung aus ständiger Last + Vorspannung δ_{sp} = 11.72 mm (Grundverformung für Kriechen)
 Anteil aus Temperatur T = -27 K δ_n = -16.74 mm (Grundverformung für Schwinden)

Einzelanteile
 (1) Anteil aus Schwinden δ_{ck} = 21.86 mm mit 1.00*ε_{sk} = -35.25*10⁻⁵
 (2) Anteil aus Kriechen δ_{ck} = 21.99 mm mit 1.00*ε_{sp} = 1.00
 (3) Anteil aus Temperatur (1.00-fach) von ± 27 K auf T = ± 37 K δ_n = ± 6.20 mm

Erläuterung
 Die endgültigen Verformungen nach Anhang O ergeben sich wie folgt:
 Da in der Tabelle 'extr. Verformungen nur aus Überlagerung' bereits alle Grundanteile enthalten sind,
 sind die Anteile (1) bis (3) extremal zu diesen entsprechen Tabellezeilen aufzuaddieren.
 Die Anteile (1) und (2) sind ständig, der Anteil (3) ist extremal, d.h. mit ± zu berücksichtigen.
 Die Gesamtüberlagerung findet jedoch vektoriell statt.

⇒ max. Horizontalverschiebung v_{max} = 82.01 mm (max v_{xL} = 82.01 , v_{yL} = 1.05 mm)
 ⇒ max. Horizontalspiel v_{h,max} = 53.75 mm
 ⇒ max. Verdrehung ϑ_{max} = 5.63 prom. (max ϑ_{xL} = 3.66 , ϑ_{yL} = 4.28 prom.)

extr. Verformungen

Extr.	v _r mm	v _s mm	v _t mm	ϑ _r ‰	ϑ _s ‰
max. v _r	82.01	1.05	10.00	-2.20	2.91
min. v _r	28.26	-3.02	-10.00	-0.74	0.85
max. v _s	74.85	2.01	10.00	-2.73	3.23
min. v _s	33.41	-4.07	-10.00	0.75	-0.58
max. v _t	56.20	-1.00	10.00	-1.88	2.35
min. v _t	54.95	-1.14	-10.00	-0.98	1.37
max. ϑ _r	65.14	-0.99	-10.00	1.42	-0.92
min. ϑ _r	43.48	-1.31	10.00	-3.79	4.22
max. ϑ _s	44.77	-1.48	10.00	-3.66	4.28
min. ϑ _s	64.72	-0.99	-10.00	1.24	-1.12

Summe der Lagerreaktionen (in global X,Y,Z)
Summe der Belastung mit umgekehrten Vorzeichen

Lf. Nr.	Bez.	ΣAP _{xL} kN	ΣAP _{yL} kN	ΣAP _{zL} kN	Lf. Nr.	Bez.	ΣAP _{xL} kN	ΣAP _{yL} kN	ΣAP _{zL} kN
1	G1 Konstruktion	-0.0	-0.0	-32521.3	2	G2 Kappen	-0.0	0.0	-2712.4
3	G3 Mehreinbau	0.0	-0.0	-579.6	4	G4 Belag	0.0	-0.0	-2225.8
5	UDL Fahrbahn	-0.0	0.0	-156.7	6	UDL Fahrbahn	0.0	-0.0	-221.5
7	UDL Fahrbahn	0.0	0.0	-156.7	8	UDL Fahrbahn	0.0	0.0	-352.9
9	UDL Fahrbahn	-0.0	-0.0	-498.8	10	UDL Fahrbahn	-0.0	-0.0	-352.9
11	UDL Fahrbahn	0.0	0.0	-352.9	12	UDL Fahrbahn	0.0	-0.0	-498.8
13	UDL Fahrbahn	-0.0	-0.0	-352.9	14	UDL Fahrbahn	0.0	0.0	-152.9
15	UDL Fahrbahn	0.0	-0.0	-216.1	16	UDL Fahrbahn	-0.0	0.0	-152.9
17	UDL Kappen	-0.0	0.0	-235.6	18	UDL Kappen	0.0	-0.0	-333.0
19	UDL Kappen	0.0	0.0	-235.6	20	UDL Kappen	0.0	0.0	-227.8
21	UDL Kappen	0.0	0.0	-322.0	22	UDL Kappen	-0.0	0.0	-227.8
23	M101-1 R (1)	-0.0	-0.0	-150.0	24	M101-1 R (2)	0.0	0.0	-150.0
25	M101-1 R (3)	0.0	0.0	-300.0	26	M101-1 R (4)	0.0	0.0	-412.5
27	M101-1 R (5)	-0.0	0.0	-450.0	28	M101-1 R (6)	-0.0	0.0	-600.0
29	M101-1 R (7)	-0.0	0.0	-600.0	30	M101-1 R (8)	-0.0	0.0	-600.0
31	M101-1 R (9)	-0.0	0.0	-600.0	32	M101-1 R (10)	-0.0	0.0	-600.0
33	M101-1 R (11)	-0.0	0.0	-600.0	34	M101-1 R (12)	-0.0	-0.0	-600.0

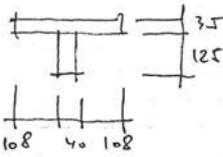
Bauteil : 3. Lager und ÜKO, 1. BA	Seite : 3 - 13	Archiv Nr.:
Block : Haupttragwerk		Durch Vergleichsrechnung geprüft
Vorgang : Bereich 59: Auflager		

Bild 33: Auszug aus der Bestandsstatik Teil 3. Lager und ÜKO, S. 3-21. Verformung aus Temperatur mit roter Farbe gekennzeichnet Bemessungswert für den konstanten Temperaturanteil ΔT_N = 94 K => ε_T = 0,94 ‰ ΔL_{Statik} = 0,94 x 67,5 = 63,5 mm

Paradiestabbrücke

III/8

Kriechen: $\epsilon_k = \epsilon_v \cdot \varphi_{\infty}$ $\epsilon_v = \sigma_b / E_0$
 $\varphi_{\infty} \approx 2,2$ (gesch.)
 $V_s = 6700 \text{ kN}$
 $F_0 = 0,25 \cdot 256$
 $10,4 \cdot 1,25 = 12,40 \text{ m}^2$
 $E_0 = 37 \cdot 10^6$



$\epsilon_k = \frac{6700}{12,40 \cdot 37 \cdot 10^6} \cdot 2,2 = 0,28 \text{ ‰}$

Schrunden: $\epsilon_s = 22 \cdot 10^{-5} = 0,22 \text{ ‰}$ (gesch.)
Temperatur: $\epsilon_T = \alpha \cdot \Delta T = 1,01 \cdot 10^{-5} \cdot 101 = 0,20 \text{ ‰}$

Verschiebungen für Lager
 $\text{max } w = (0,28 + 0,22 + 0,20) \cdot 27,2 = 21,8 \text{ mm}$
 $< 31,5 \text{ mm}$

Verschiebungen für Übergangsbauh.
 Verlangsamung (+) $\text{max } w = [1,3(0,28 + 0,22) + 0,50] \cdot 27,2 = 31,3 \text{ mm}$
 Ausdehnung (-) $\text{min } w = -0,5 \cdot 27,2 = -13,6 \text{ mm}$

5.2 Lagerpressungen
 $\text{max } \sigma = \frac{1157}{25,40} = 45,5 \text{ kN/m}^2 < 1,25$
 $\text{min } \sigma = \frac{642}{25,40} = 25,2 \text{ kN/m}^2 > 0,20$

Ingenieures. Schmitt & Stumpf, Leopoldstr. 173 f, 8000 München 40, Tel. (0 89) 36 00 07-0

Bild 34: Auszug aus der Bestandsstatik Teil III Lager, S. 3-21. Verformung aus Temperatur mit roter Farbe gekennzeichnet Bemessungswert für den konstanten Temperaturanteil $\Delta T_N = 101 \text{ K} \Rightarrow \epsilon_T = 1,01 \text{ ‰}$ $\Delta L_{\text{Statik}} = 1,01 \times 27,2 = 27,5 \text{ mm}$

Zusammenfassung

In Tabelle 17 sind die aus der Bestandsstatik entnommenen Verformungen in Brückenlängsrichtung zusammengefasst.

7.1.4 Vergleich der Lagerwege

Um die Messwerte mit Bemessungswerten aus der Statik zu vergleichen, werden die Messwerte der maximalen/minimalen Bauwerkstemperatur und Lagerwege verwendet wie folgt:

- Ermittlung der linearen Beziehung zwischen Lagerweg und Temperatur anhand der Messwerte (rote Linie Punkt 1 und 2),
- Extrapolation der Lagerwege auf die absolute Temperatur $T_{e,max}$ und $T_{e,min}$ (rote Linie Punkt 3 und 4),
- Ermittlung der linearen Beziehung zwischen Lagerweg und der Außenlufttemperatur mit den statischen Bemessungstemperaturen $\Delta T_{N,con}$ und $\Delta T_{N,exp}$ (ohne γ_F , blaue Linie Punkt 5 und 6) sowie $\Delta T_{N,con,Dil}$ und $\Delta T_{N,exp,Dil}$ (mit γ_F , blaue Linie Punkt 7 und 8) mit Beziehung auf die Einbautemperatur $T_0 = 10\text{ °C}$,
- Bezug der gemessenen Lagerweg/Temperatur-Beziehung auf die Einbautemperatur $T_0 = 10\text{ °C}$ und $s = 0\text{ mm}$ (Offset-Korrektur, schwarze gestrichelte Linie Punkt 1 und 2),
- Extrapolation der Lagerwege auf die statischen Bemessungstemperaturen $\Delta T_{N,con}$ und $\Delta T_{N,exp}$ (ohne γ_F , Punkt 5 und 6) sowie $\Delta T_{N,con,Dil}$ und $\Delta T_{N,exp,Dil}$ (mit γ_F , Punkt 7 und 8).

Die Punktbezeichnung ist exemplarisch für die Hangbrücke Würgau Beton dargestellt und wird in den weiteren Brücken nicht dargestellt.

Die Auswertung der Referenzobjekte lässt erkennen, dass die im Beobachtungszeitraum ausgewerteten Temperaturen bei keinem Tragwerk die minimalen und maximalen Temperaturwerte für Brückentyp 2 und Brückentyp 3 ($T_{e,min}$ und $T_{e,max}$) erreichen. Eine entsprechende Extrapolation zeigt die möglichen Bewegungen der Lager bis zu den absoluten Temperaturminima und -maxima ohne jegliche Teilsicherheiten.

Die Rückrechnung der gemessenen Lagerwege/Temperatur-Beziehung auf die Einbautemperatur $T_0 = 10\text{ °C}$ und $s = 0\text{ mm}$ ermöglicht den Vergleich mit

	$\Delta L_{\text{Statik mit } \gamma_F}$ [mm]
Würgau Beton	207,5
Würgau Stahlverbund	230,6
Trubbachbrücke	63,5
Paradiestabbrücke	27,4

Tab. 17: Längenänderung infolge Temperatur lt. Bestandsstatik

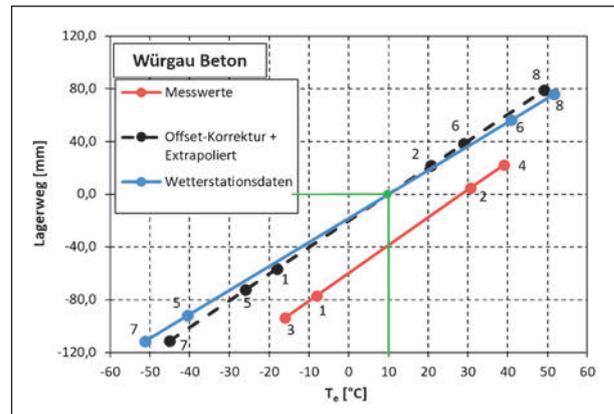


Bild 35: Ermittlung der Lagerwege bezogen auf die Bemessungstemperatur für die Hangbrücke Würgau Beton

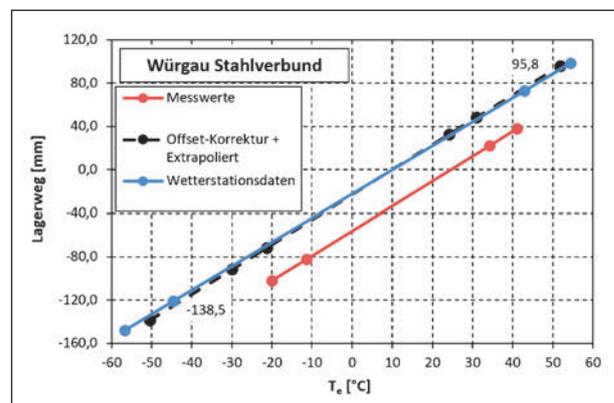


Bild 36: Ermittlung der Lagerwege bezogen auf die Bemessungstemperatur für die Hangbrücke Würgau Stahlverbund

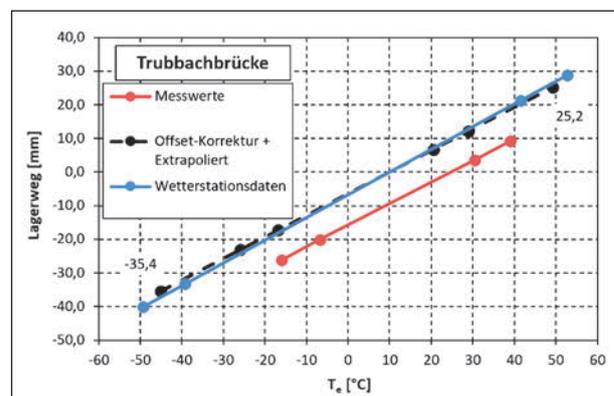


Bild 37: Ermittlung der Lagerwege bezogen auf die Bemessungstemperatur für die Trubbachbrücke

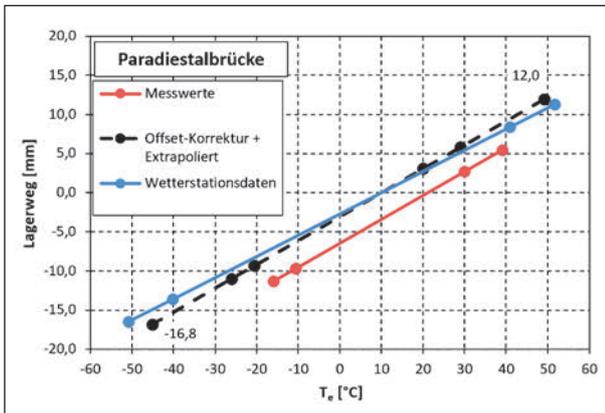


Bild 38: Ermittlung der Lagerwege bezogen auf die Bemessungstemperatur für die Paradiestabbrücke

den statischen Annahmen, wie sie die Norm vorgibt. Durch die Extrapolation der gemessenen Lagerwege auf die maximale negative (Verkürzung) und positive (Ausdehnung) Änderung des konstanten Temperaturanteils $\Delta T_{N,con}$ und $\Delta T_{N,exp}$ zeigt bei allen Objekten keine Überschreitung der normgemäßen Ausdehnung und der Verkürzung. Die Extrapolation der Lagerwege mit den Normvorgaben inkl. Teilsicherheitsbeiwerte ($\Delta T_{N,con,Dil}$ und $\Delta T_{N,exp,Dil}$) zeigt, dass für den Beobachtungszeitraum noch eine ausreichende Reserve bis zum Erreichen der Bemessungswerte vorhanden ist. Im Vergleich zu den normativen Regelungen unter Berücksichtigung eines Wiederkehrintervalls von 50 Jahren ist jedoch eine Aussage über die vorhandene Sicherheit gemäß aktueller Norm nur mit Einschränkung auf den Beobachtungszeitraum möglich. Die detaillierte Auswertung der Lagerwege/Temperatur-Beziehung mit allen Messdaten ist im Anhang 2 enthalten.

7.2 Vergleich der Längenänderung infolge Temperatur

Bei der Gegenüberstellung von Messungen hat sich generell gezeigt, dass die Speichermasse und die zugehörige Trägheit gegenüber Temperaturänderung ein wesentliches Kriterium bei der Kerntemperatur eines Tragwerks und den daraus resultierenden Längsverschiebungen am Ende des Überbaus darstellt.

Grundsätzlich zeigt sich im Hinblick auf das Ansprechen auf Temperaturen folgender Zusammenhang (Reihung vom maximalen Ansprechen auf Temperaturänderungen in abnehmender Reihenfolge):

- Stahltragwerke mit orthotroper Fahrbahnplatte: maximale Tragwerkstemperaturen und maximale Längenänderungen,
- Stahlverbundtragwerke mit Stahlbeton-Fahrbahnplatte,
- Massivbrücken mit schlanken Tragwerksquerschnitten,
- Massivbrücken mit großen Tragwerksquerschnitten (insbesondere Hohlkästen), welche grundsätzlich im Vergleich die kleinsten Längenänderungen zufolge Temperatur aufweisen.

Besonders Stahlbrücken sind auf unterschiedliche Temperaturgradienten, die sich durch Sonneneinstrahlung ergeben können, sehr sensibel.

Anhand der gemessenen maximalen und minimalen Brückentemperaturen und der maximalen und minimalen Lagerverschiebungen wird die Längenänderung [mm] pro Grad [K] berechnet und mit normativen Werten verglichen:

$$\Delta l_T = \alpha_T \times l \text{ [mm/K]}$$

wird verglichen mit

$$(s_{max} - s_{min}) / (T_{max} - T_{min}) \text{ [mm/K]}$$

wobei:

α_T Wärmeausdehnungskoeffizient
 $\alpha_T = 10^{-5} \text{ 1/K}$ für Betonbrücken, $\alpha_T = 1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$ für Stahlverbundbrücken

l Brückenlänge zwischen Brückenfestpunkt und instrumentiertem Brückenlager

s_{max} maximale gemessene Lagerverschiebung

s_{min} minimale gemessene Lagerverschiebung

T_{max} maximale gemessene Bauwerkstemperatur

$T_{W,max}$ maximale Bemessungstemperatur mit Außenlufttemperatur aus Wetterstationen

T_{min} minimale gemessene Bauwerkstemperatur

$T_{W,min}$ minimale Bemessungstemperatur mit Außenlufttemperatur aus Wetterstationen

Die tatsächlich gemessenen Tragwerkslängsverformungen sind in Tabelle 15 unter Δs_{gem} dargestellt. Laut Eurocode (Ausgabe 2012) ergibt sich für die Referenzobjekte folgende Tragwerksverlängerung ΔL_{EC} (inkl. Sicherheitsbeiwert $\gamma = 1,35$):

$$\Delta L_{EC} = \alpha_T \times l \times \Delta T_{N,EC} \text{ [mm]}$$

mit $\Delta T_{N,EC}$ laut Eurocode (s. Kapitel 7.1):

$$\Delta T_{N,EC} = \Delta T_{N,exp,Dil} - \Delta T_{N,con,Dil}$$

Für den direkten Vergleich der gemessenen Längsverschiebungen Δs_{gem} mit rechnerisch ermittelten Tragwerksverformungen auf Basis der gemessenen Bauwerks- und Außenlufttemperaturen werden folgende Temperaturunterschiede angesetzt. Die Längsverschiebungen werden analog zu ΔL_{EC} ermittelt.

ΔT_e Temperaturdelta Minima/Maxima
Bauwerkstemperatur

$$\Delta T_e = T_{e,max} - T_{e,min}$$

ΔT_W Temperaturdelta Minima/Maxima gemäß
Lufttemperatur aus Wetterstationen
(s. Tabelle 16)

$$\Delta T_W = T_{W,max} - T_{W,min}$$

Die ermittelten Längenänderungen sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 sowie auch in Bild 39 dargestellt.

Die in Tabelle 18 gem. Eurocode berechnete Längenänderung (ΔL_{EC}) liegt im Vergleich zur gemessenen

(Δs_{gem}) und zur auf Basis der Tragwerkstemperatur berechneten ($\Delta L_{ber,e}$) Längenänderung ca. beim 2-fachen. Durch die Verwendung des anhand der durchgeführten Messungen ermittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten nach Bild 27 ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den zwei letzten Vergleichsparametern. Darüber hinaus ist dadurch auch eine gute Korrelation zwischen den gemessenen und den gerechneten Längenänderungen pro Grad ($\Delta s/\Delta T_e$ und $\alpha_{Tn} \times l$) zu beobachten. Dadurch wird die Genauigkeit der Messung bestätigt.

Die in Tabelle 19 berechneten Lagerverschiebungen ($\Delta L_{ber,W}$) sind deutlich größer als die gemessenen Werte (Δs_{gem}), jedoch kleiner als die gem. Eurocode berechneten Längenänderungen (ΔL_{EC}). Den Längenänderungen nach Eurocode liegt ein Bemessungswert für den konstanten Temperaturanteil $\Delta T_{N,EC}$ von 75 K für die Betonbrücken bzw. 81 K für die Stahlverbundbrücke zugrunde, während dieser Wert bei ca. 81 K für die Betonbrücken bzw. 88 K für die Stahlbetonbrücken auf Grundlage der Wetterstationsdaten liegt. Der Ansatz der Außenlufttemperaturen liefert realitätsnahe Ergebnisse, die für die Ermittlung von Reserven sinnvoll sind. Dadurch kann ein direkter Vergleich zu Lagerwegen nach EC ermöglicht werden (siehe Tabelle 20 und Bild 39).

	Würgau Beton	Würgau Stahlverbund	Trubbachbrücke	Paradiestalbrücke
α_T [1/K]	1×10^{-5}	$1,2 \times 10^{-5}$	1×10^{-5}	1×10^{-5}
l [m]	182,0	184,5	67,5	27,1
ΔT_e [K]	38,7	45,6	37,3	40,6
Δs_{gem} [mm]	81,8	104,2	23,7	9,3
$\Delta L_{ber,e}$ [mm]	70,5	100,9	25,2	11,0
ΔL_{EC} [mm]	136,5	179,3	50,6	20,3
$\gamma_F \Delta L_{EC}$ [mm]	171,6	226,6	63,7	25,6
$\Delta s/\Delta T_e$ [mm/K]	2,11	2,29	0,64	0,23
$\alpha_T \times l$ [mm/K]	1,82	2,21	0,68	0,27
Update α_T -Faktor gem. Bild 27				
α_{Tn} [1/K]	$1,17 \times 10^{-5}$	$1,24 \times 10^{-5}$	$0,94 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-5}$
Δs_{gem} [mm]	81,8	104,2	23,7	9,3
$\Delta L_{ber,e}$ [mm]	82,5	104,3	23,7	11,6
ΔL_{EC} [mm]	159,7	185,3	47,6	21,3
$\gamma_F \Delta L_{EC}$ [mm]	200,8	234,2	59,8	26,8
$\Delta s/\Delta T_e$ [mm/K]	2,11	2,29	0,64	0,23
$\alpha_{Tn} \times l$ [mm/K]	2,13	2,29	0,63	0,30

Tab. 18: Darstellung Längenänderung infolge Temperatur

	Würgau Beton	Würgau Stahlverbund	Trubbachbrücke	Paradiestabücke
α_T [1/K]	1×10^{-5}	$1,2 \times 10^{-5}$	1×10^{-5}	1×10^{-5}
l [m]	182,0	184,5	67,5	27,1
ΔT_W [K]	81,5	87,5	80,8	81,1
$\gamma_F \Delta T_W$ [K]	103,0	111,1	102,1	102,5
$\Delta L_{ber,W}$ [mm]	148,3	193,7	54,5	22,0
$\gamma_F \Delta L_{ber,W}$ [mm]	187,5	246,0	68,9	27,8
$\Delta s / \Delta T_W$ [mm/K]	1,82	2,21	0,68	0,27
$\alpha_T \times l$ [mm/K]	1,82	2,21	0,68	0,27

Tab. 19: Darstellung Längenänderung infolge Temperatur unter Berücksichtigung der an Wetterstationen gemessenen Lufttemperaturen

	Würgau Beton	Würgau Stahlverbund	Trubbachbrücke	Paradiestabücke
Δs_{gem} [mm]	81,8	104,2	23,7	9,3
$\Delta L_{ber,W}$ [mm]	148,3	193,7	54,5	22,0
ΔL_{EC} [mm]	136,5	179,3	50,6	20,3
$\Delta L_{ber,W} - \Delta L_{EC}$ [mm]	11,8	14,4	3,9	1,7
$\Delta L_{EC} / \Delta L_{ber,W}$ [-]	0,92	0,93	0,93	0,92

Tab. 20: Zusammenfassung und Ermittlung von Reserven aus rechnerisch ermittelten Lagerwegen gemäß dem normativen Regelwerk und rechnerisch ermittelten Lagerwegen mit Wetterstationsdaten

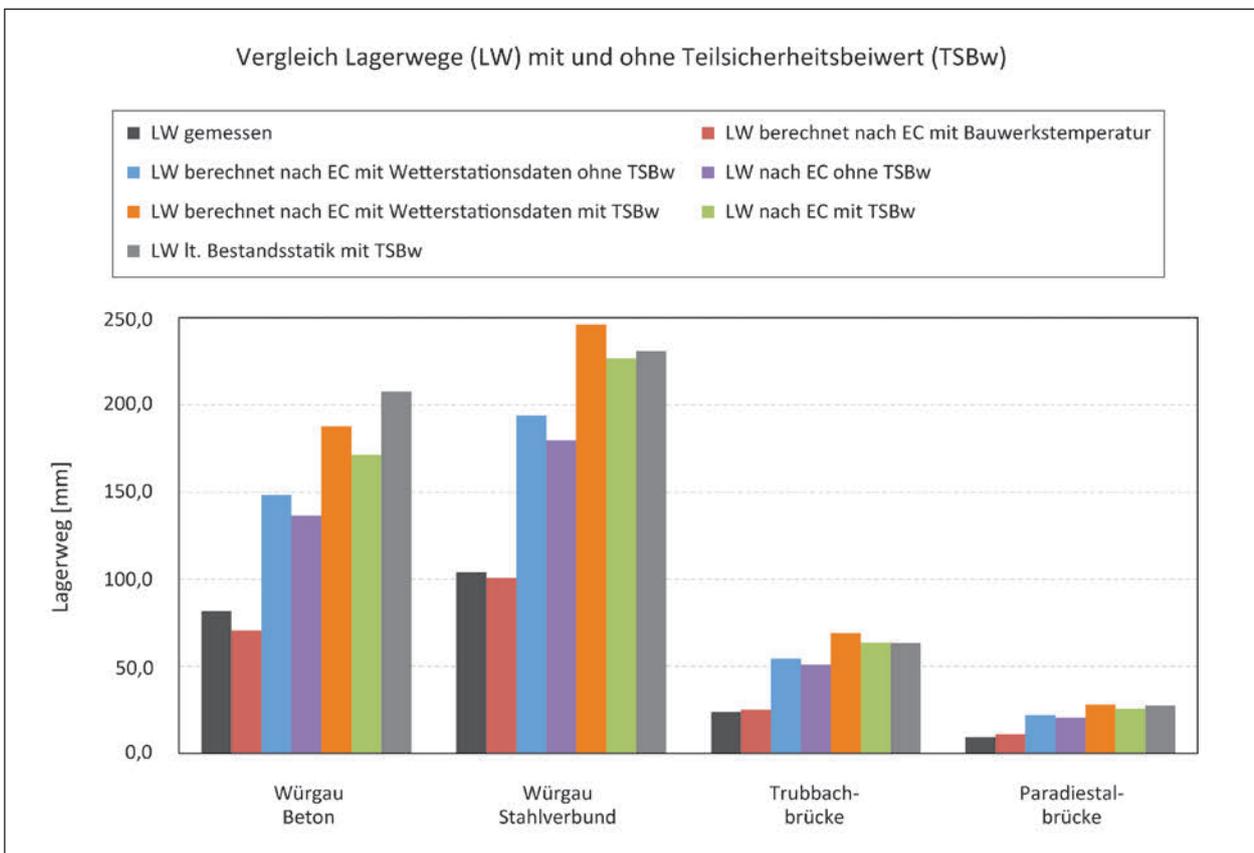


Bild 39: Vergleich gemessener und rechnerisch ermittelter Lagerwege

Es ist zu erkennen, dass für den gemessenen Zeitraum eine ausreichende Reserve bis zu den maximalen Lagerwegen hinsichtlich der Außenlufttemperaturen vorhanden ist. Aufgrund der Messperiode von nur einem Jahr und der Untersuchung von nur vier Brücken kann in Bezug auf normative Reserven jedoch keine aussagekräftige Verifizierung gemacht werden. Mit Ausnahme der Würgau Betonbrücke konnten gute Übereinstimmungen zwischen den ermittelten Lagerwegen gem. aktuell gültiger Norm und den Lagerwegen aus der objektspezifischen Bestandsstatik festgestellt werden.

7.3 Akkumulierter Gleitweg

Ein wesentliches Indiz für die Lebensdauer von Brückenlagern ist der akkumulierte Gleitweg dieser Bauteile. Zur Abschätzung der Lebensdauer in Jahren wurde für die gegenständlichen Brücken der akkumulierte Weg ermittelt und in Bild 40 dargestellt. Dieser ergibt sich aus der Integration des Lagerweges über einen gewählten Messzeitraum von einem Jahr:

$$L_k = \int_{t_0}^{t_i} W_k(t) dt$$

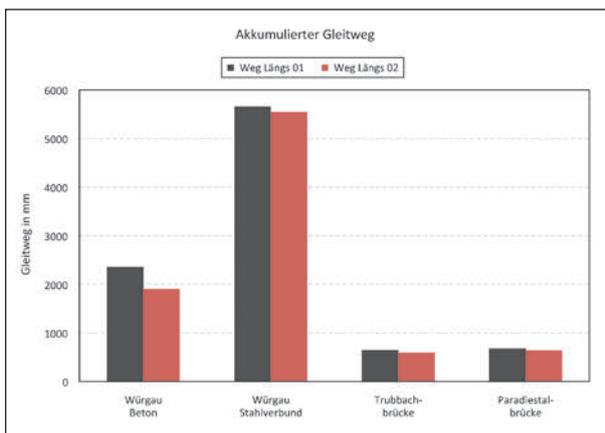


Bild 40: Akkumulierter Gleitweg für den Messzeitraum je Brücke und Sensor in mm

Dabei bedeutet:

L_k akkumulierter Gleitweg eines Wegaufnehmers „k“

W_k der gemessene tägliche Lagerweg eines Wegaufnehmers „k“

t_0 Messzeitbeginn = 03.06.2017

t_i Messzeitende = 03.06.2018

7.4 Korrelation Außenluft zu Bauwerkstemperatur

Anhand der Messwerte im Überbau und an der Basisstation als Referenzwert für die Außenlufttemperatur wird die Korrelation zwischen Außenluft- zu Bauwerkstemperatur für die Referenzbrücken ermittelt und mit den Angaben nach DIN EN 1991-1-5 verglichen.

Zu beachten ist, dass in der DIN EN 1991-1-5 als Außenlufttemperatur die Luftschattentemperatur angesetzt wird. An den Referenzbrücken wird in der Basisstation, die sich im Wartungsgang des Widerlagers befindet, die Temperatur gemessen. Erwartet wird, dass die Luftschattentemperatur für hohe Temperaturen etwas höher ist und für tiefe Temperaturen etwas tiefer ist als die Temperatur an der Basisstation. Im Anschluss werden die Außenlufttemperaturen im Bereich der Basisstation für alle Brücken dargestellt.

Für den Abgleich wurden die Temperaturdaten der vier nächstgelegenen Wetterstationen (siehe Tabelle 22) im überschneidenden Zeitraum je Brücke verglichen und davon der jeweilige Maximal- und Minimalwert der Temperatur zu je einem Datensatz zusammengefasst (T_{DWDmax} in schwarz und T_{DWDmin} in grau). In Bild 41 bis Bild 44 ist deutlich zu sehen, dass die gemessene Lufttemperatur am Widerlager je Brücke ($T1_{max}$ in rot, $T1_{min}$ in blau) innerhalb des Bereiches liegt. Die Differenz zwischen gemessenen und tatsächlich vorherrschenden Lufttemperaturen am Widerlager wird in Tabelle 21 dargestellt.

Brücke	Würgau 1		Würgau 2		Trubbachbrücke 3		Paradiestalbrücke 4	
	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}
	[°C]							
$T_{gemessen}$	-11,4	29,4	-12,6	30,7	-8,5	29,7	-13,1	30,9
$T_{Wetterstation}$	-21,8	37,9	-21,8	37,9	-19,1	37,9	-21,8	37,9

Tab. 21: Vergleich gemessener Außenlufttemperaturen am Bauwerk vs. Temperatur Wetterstationen

Für die vier Bauwerke wurden die in Tabelle 22 angeführten Wetterstationen zur Auswertung herangezogen. Dabei wurde standortabhängig versucht, aus jeder Richtung eine Station auszuwählen. Die Auswahl kann mit den Koordinaten und Namensbezeichnung verifiziert werden und beschränkt sich pro Brücke auf vier Wetterstationen. Die Entfernungen zur jeweiligen Station ist im rechten Tabellenteil angeführt.

Vergleicht man nun die minimalen und maximalen Temperaturen je Tag für alle 4 Brücken wie in den folgenden Abbildungen dargestellt (Bild 41 bis Bild 44), zeigt sich, dass die 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. Zur Feststellung einer

quantitativen Korrelation dieser Temperaturen wurden zunächst die maximalen Temperaturdifferenzen in der sommerlichen und in der winterlichen Jahreszeit ermittelt. Aus diesen Werten wurden zunächst die Differenz und anschließend das Verhältnis zueinander ermittelt. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tabelle 23 zusammengefasst. Als Bezugsgröße wurde hierfür die Außenlufttemperatur herangezogen.

Der Vergleich der gemessenen Temperaturen an den Betonbrücken Würzgau, Trubbachbrücke und Paradiestalbrücke zeigt, dass die normative Beziehung auf der sicheren Seite liegt (siehe Bild 46). Der Vergleich der Messwerte an der Stahlverbundbrücke Würzgau zeigt, dass die normative Beziehung bei tiefen Temperaturen bereits knapp bemessen sind (siehe Bild 47), was aufgrund dieser Einzelmessung jedoch erst durch weitere Untersuchungen geprüft werden kann.

Wetterstation			Entfernung zur Brücke		
Nr.	Station	Koordinaten	Hangbrücke Würzgau	Trubbachbrücke	Paradiestalbrücke
0282	Bamberg	49.8742, 10.9206	16,9 km	20,1 km	23,0 km
0320	Heinersreuth-Vollhof	49.9667, 11.5197	30,6 km	-	24,6 km
0867	Lautertal-Oberlauter	50.3067, 10.968	37,6 km	-	37,5 km
2750	Kronach	50.2523, 11.3209	34,5 km	-	30,1 km
1279	Möhrendorf-Kleinseebach	49.6497, 11.0074	-	7,9 km	-
1721	Gräfenberg-Kasberg	49.664, 11.2239	-	13,5 km	-
3668	Nürnberg	49.503, 11.0549	-	23,5 km	-

Tab. 22: Entfernungen Brücken-Wetterstationen

	Würzgau 1		Würzgau 2		Trubbachbrücke 3		Paradiestalbrücke 4	
	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer
	[°C]							
T_1	-1,4	24,8	-2,1	25,9	-0,2	25,0	-2,6	25,6
T_{DWD}	-4,8	30,8	-4,8	30,8	-5,0	31,3	-4,8	30,8
$ T_{DWD} - T_1 $	3,4	6,0	2,7	4,9	4,8	6,3	2,2	5,2
$\frac{T_1}{T_{DWD}} [-]$	0,29	0,81	0,44	0,84	0,04	0,80	0,54	0,83

Tab. 23: Korrelation zwischen Basisstationstemperaturen (T_1) und Außenlufttemperatur aus Wetterstationen (T_{DWD})

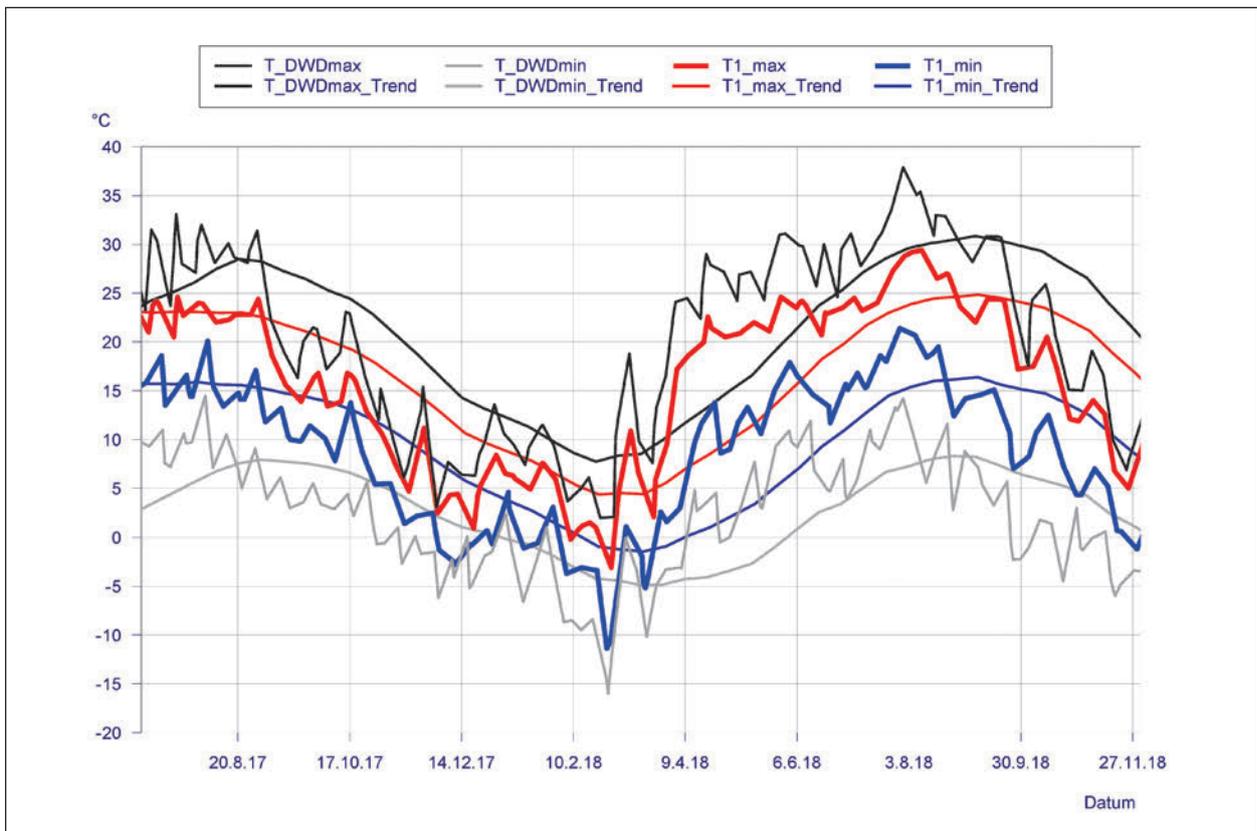


Bild 41: Temperaturvergleich Basisstation (T1) mit Außenlufttemperatur Wetterstationen (T_DWD) Hangbrücke Würgau Beton

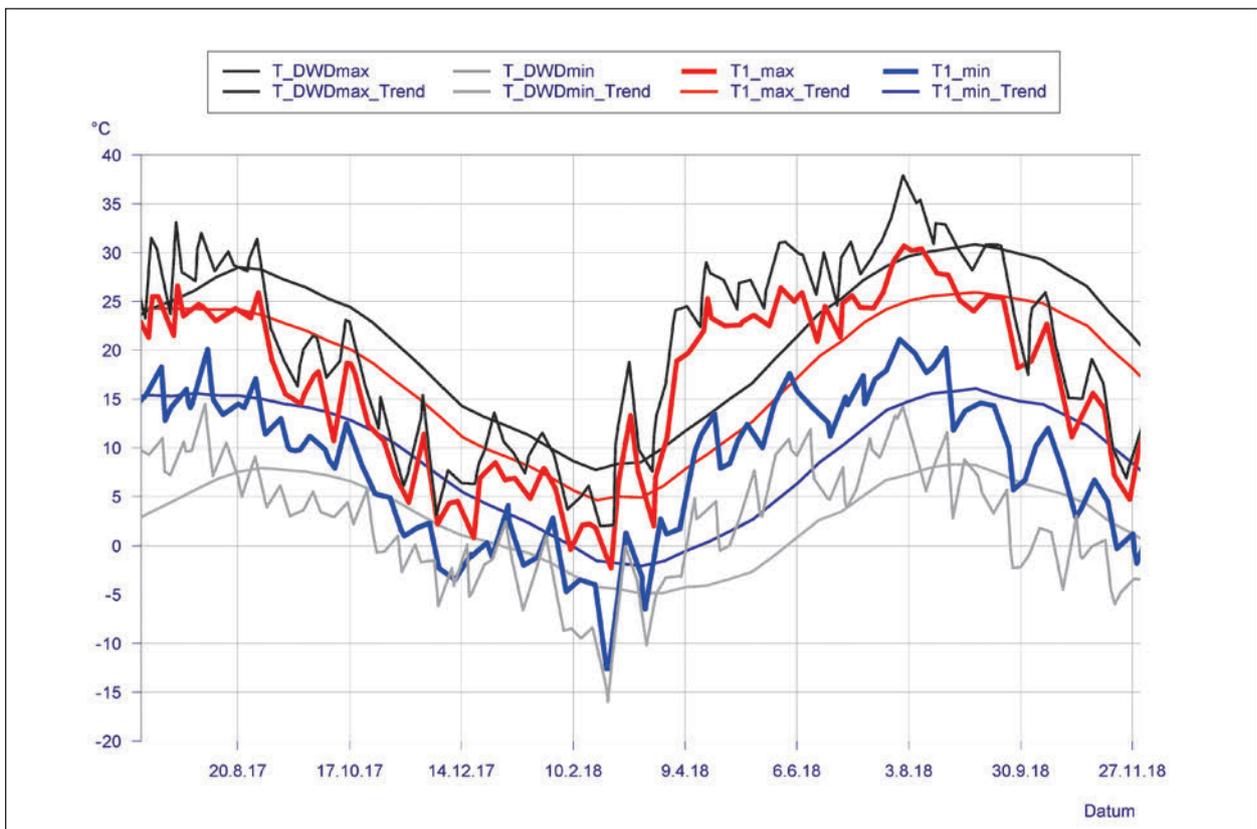


Bild 42: Temperaturvergleich Basisstation (T1) mit Außenlufttemperatur Wetterstationen (T_DWD) Hangbrücke Würgau Stahlverbund

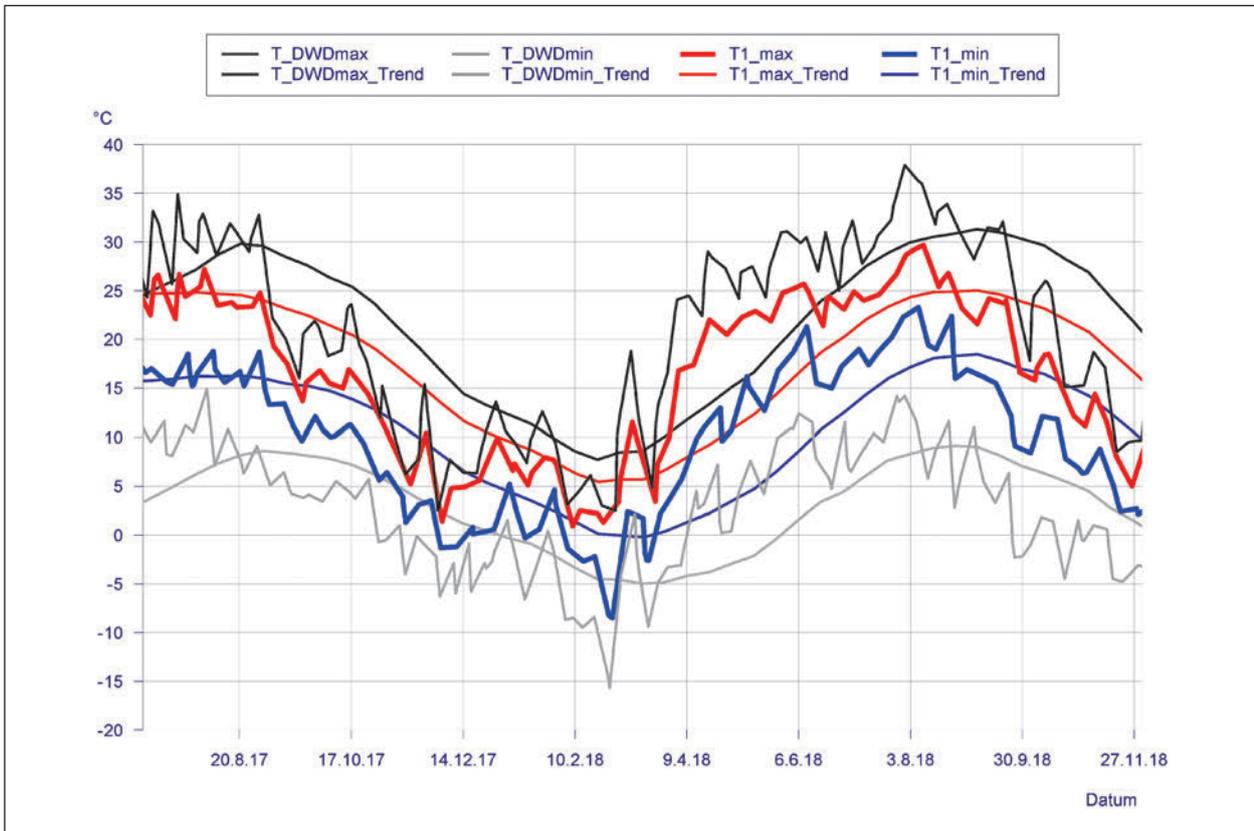


Bild 43: Temperaturvergleich Basisstation (T1) mit Außenlufttemperatur Wetterstationen (T_DWD) Trubbachbrücke

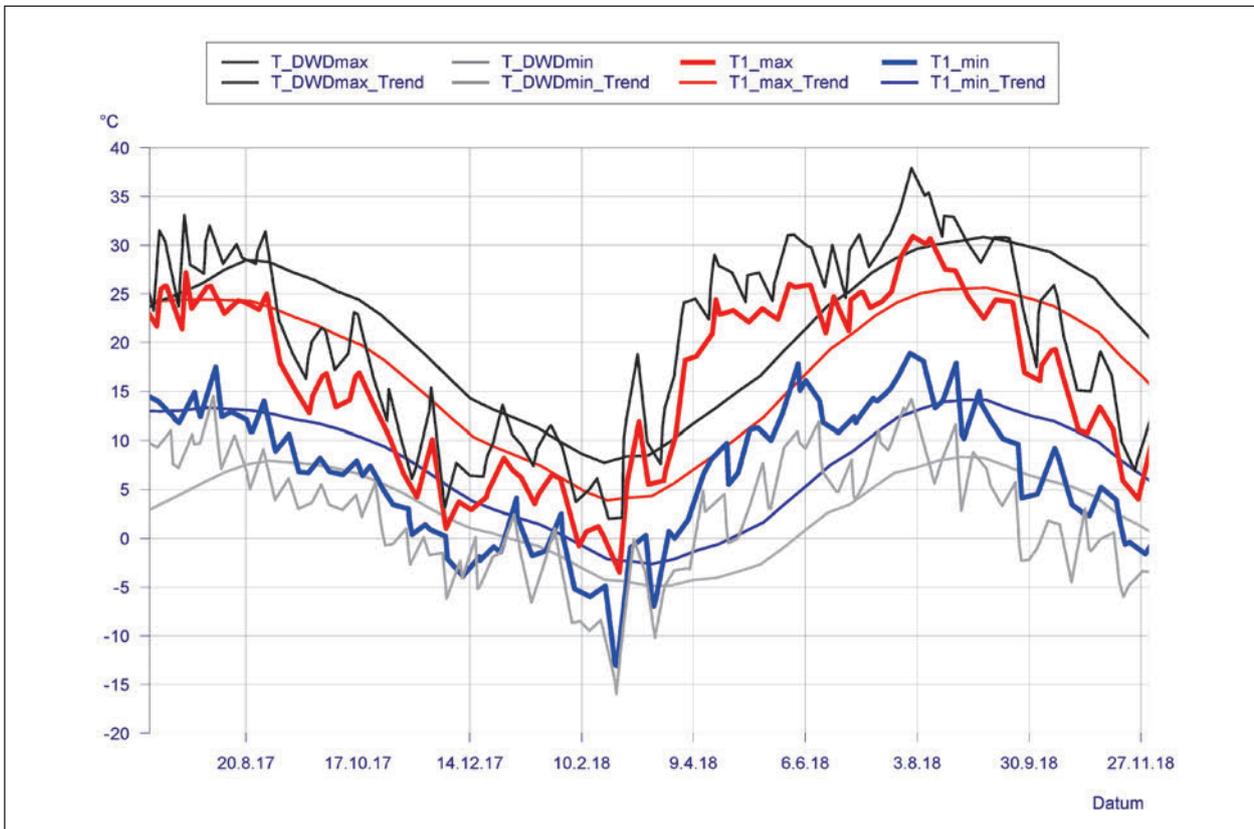


Bild 44: Temperaturvergleich Basisstation (T1) mit Außenlufttemperatur Wetterstationen (T_DWD) Paradietalbrücke

Eine Verifizierung, ob die normative Beziehung tatsächlich konservativ ist, erfolgt, indem statt der gemessenen Luftschattentemperatur am Widerlager die Außenlufttemperatur aus nahegelegenen Wetterstationen herangezogen wird. Es ist zu erkennen, dass die normative Bauwerkstemperatur für den Extremfall der Minimaltemperatur mit der Bauwerkstemperatur auf Basis der Außenlufttemperatur in Bild 47 für die Stahlverbundbrücke korreliert. Im Falle der Maximaltemperatur sind jedoch noch Reserven vorhanden. Die Betonbrücken verfügen hingegen über eine ausreichende Reserve in Bezug auf die normative Bauwerkstemperatur, was in Bild 46 zu erkennen ist.

Die Korrelation zwischen den vom Eurocode vorgegebenen Werten aus Bild 45 mit den gemessenen Werten aus Bild 46 und Bild 47 wurde abgeleitet, indem die Differenz zwischen der blauen Linie (ent-

spricht EC für Brücke Type 3 bzw. Type 2) und der Trendlinie (nicht dargestellt) für die gemessenen Außenlufttemperaturen bei den gewählten Bezugspunkten $T_{min} = -24 \text{ °C}$ und $T_{max} = 37 \text{ °C}$ ermittelt und daraus das Verhältnis gebildet wurde. Diese sind in Tabelle 24 dargestellt.

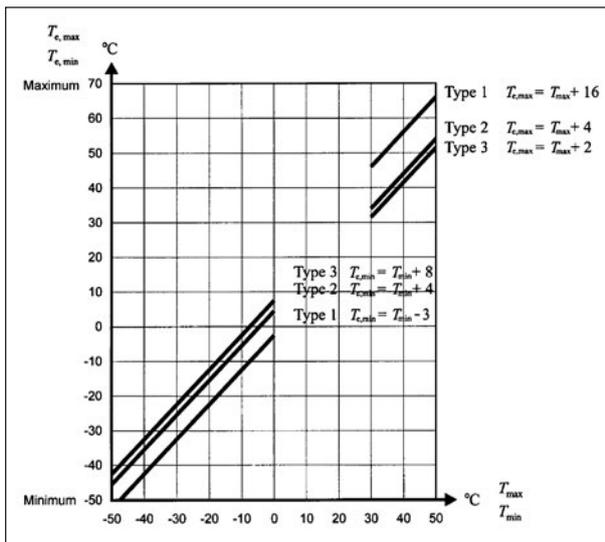


Bild 45: Korrelation zwischen min/max Außenlufttemperatur und min/max konstanter Temperaturanteil für Brücken nach DIN EN 1991-1-5

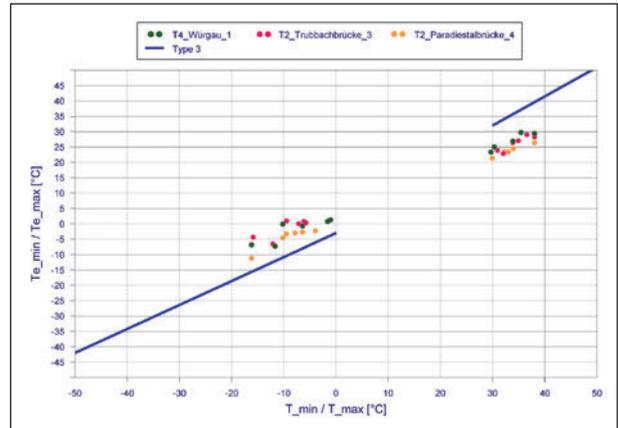


Bild 46: Korrelation zwischen Außenluft und Bauwerkstemperatur für die Betonbrücken Hangbrücke Würgau, Trubbachbrücke und Paradiestalbrücke

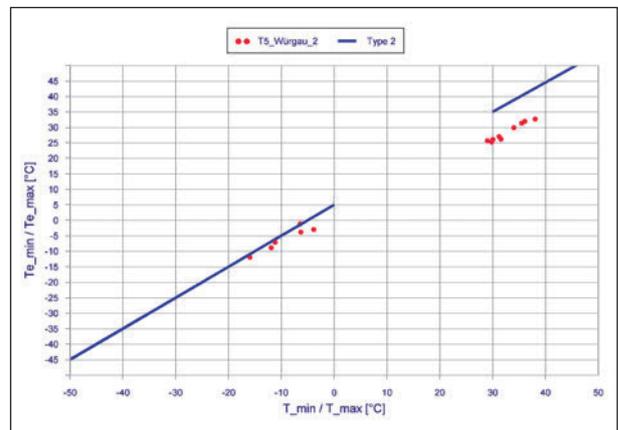


Bild 47: Korrelation zwischen Außenluft und Bauwerkstemperatur für die Stahlverbundbrücke Hangbrücke Würgau

	Würgau 1		Würgau 2		Trubbachbrücke 3		Paradiestalbrücke 4	
	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}
[°C]								
$T_{e,min,gem}$	-10,9	-	-18,4	-	-10,7	-	-15,7	-
$T_{e,min,EC}$	-16,0	-	-20,0	-	-16,0	-	-16,0	-
$\frac{T_{e,min,gem}}{T_{e,min,EC}}$ [-]	0,68	-	0,92	-	0,67	-	0,98	-
$T_{e,max,gem}$	-	29,6	-	32,4	-	28,5	-	26,1
$T_{e,max,EC}$	-	39,0	-	41,0	-	39,0	-	39,0
$\frac{T_{e,max,gem}}{T_{e,max,EC}}$ [-]	-	0,76	-	0,79	-	0,73	-	0,67

Tab. 24: Abgeleitete Korrelation zwischen Außenluft- und Bauwerkstemperatur je Brücke

7.5 Beurteilung Lage Tragwerk zur Sonneneinstrahlung

Die Ausrichtung der Referenzobjekte zur Sonneneinstrahlung ist folgende:

Die Hangbrücke Würgau (Beton und Stahlverbund) und die Paradiestalbrücke sind Teil der Autobahnstrecke A70, welche parallel zum Sonnenverlauf (von Osten nach Westen) steht. Die Längsseite der Brücken befindet sich in einer exponierten Lage zur Sonneneinstrahlung. In Bild 48 ist exemplarisch die Draufsicht der Hangbrücke Würgau Beton dargestellt. Die Autobahn A73, auf welcher die Trubbachbrücke befindet, liegt 90° versetzt zum Sonnenverlauf. Dazu wird die Draufsicht der Trubbachbrücke in Bild 49 dargestellt.

Besonders für Stahlbrücken kann der Energieeintrag durch direkte Sonneneinstrahlung ein nennenswertes Ausmaß erreichen. Neben einer Längsänderung des gesamten Tragwerks kann es insbesondere durch eine (ungünstige) Lage dazu kommen, dass durch einseitigen Energieeintrag eine ungleichmäßige Erwärmung und ungleiche Ver-

schiebungswege für die Lager hervorgerufen werden und insbesondere eine Schiefstellung des Fahrbahnüberganges entsteht. Bei den gegenständlichen Referenzobjekten konnten zwar im Tagesgang kleine Verformungen festgestellt werden (siehe Bild 20), die auf die Ausrichtung zurückzuführen sind, im jahreszeitlichen Verlauf konnten jedoch keine wesentlichen Unterschiede im Hinblick auf die maximalen Lagerwege erkannt werden.

7.6 Einfluss Fahrbahnbelag/Überbauwerkstoff auf Verschiebung

In Bild 50 sind die gemessenen Temperaturen der Fahrbahnplatten aus Beton der vier Referenzobjekten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es keine großen Unterschiede im Temperaturverlauf der einzelnen Brückentragwerke gibt. Grund dafür ist ein ähnlicher Fahrbahnbelag bei den gemessenen Objekten. Es ist auf den Brücken ein Splittmastixasphalt (Hangbrücke Würgau Beton, Trubbachbrücke), Gussasphalt (Paradiestalbrücke) bzw. Asphalt (Hangbrücke Würgau Stahlverbund) vorhanden.

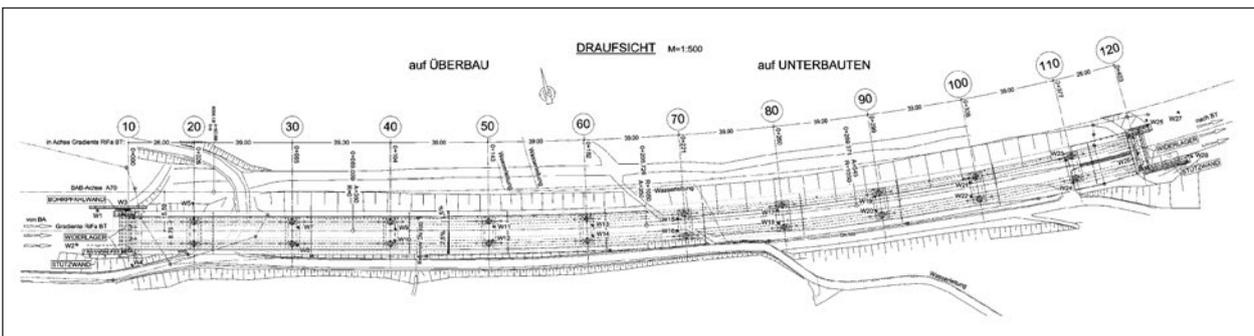


Bild 48: Draufsicht Hangbrücke Würgau mit Nordpfeilausrichtung

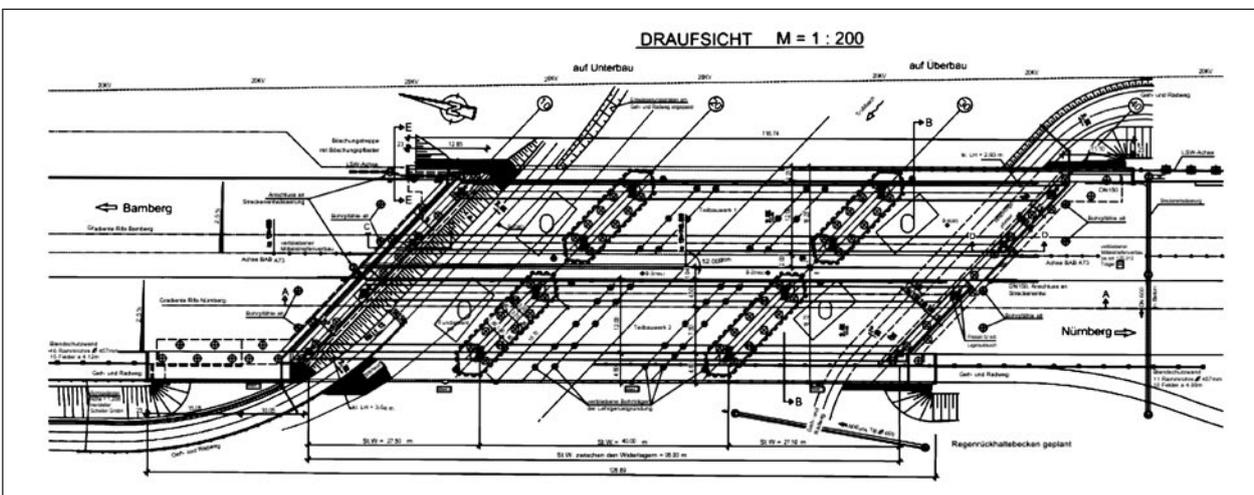


Bild 49: Draufsicht Trubbachbrücke mit Nordpfeilausrichtung

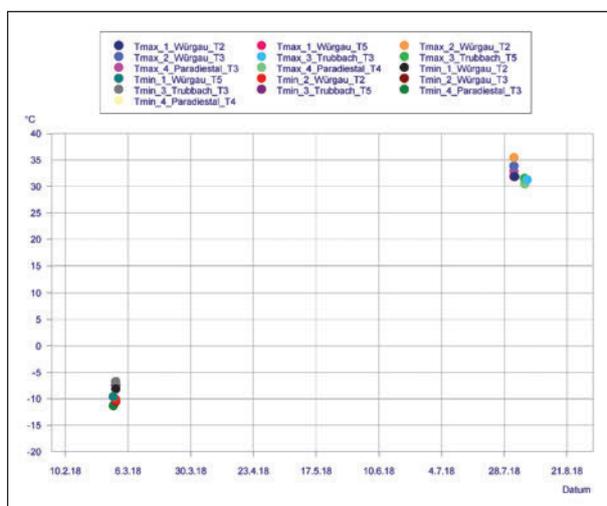


Bild 50: Maxima und Minima für je Brücke 2 Sensoren in der Fahrbahnplatte

Der Unterschied der drei Asphaltvarianten liegt in der Zusammensetzung der Mineralstoffgemische, Bindemittel und Füller.

Für die Tragwerkstemperatur und somit die auftretenden Längenänderungen hat die Ausführung des Fahrbahnbelages Bedeutung. Maximale Längenänderungen ergeben sich erfahrungsgemäß bei Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten und bituminösen Belägen, während der Einfluss bei Massivbrücken durch die Speichermasse des Betons nur gering ausgeprägt ist. Bei Messungen in der Vergangenheit konnte gezeigt werden, dass die Tragwerkstemperatur bei bituminösen Belägen insbesondere in der Fahrbahnplatte höher ist als bei Brücken mit Betonfahrbahn. In der Literatur wird die Wirkung des Fahrbahnbelagsbaustoffs aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeiten und im Hinblick auf die Temperaturbeanspruchungen von Brücken wie eine Wärmedämmung beschrieben, während die Asphalteeigenschaften – Wärmeleitfähigkeit und Dichte – sogar mit jenen vom Beton verglichen werden.¹ Darüber hinaus wird die Wärmeübertragung wesentlich durch den Adsorptionsgrad des Fahrbahnbelags beeinflusst. Ein sehr dunkler bituminöser Fahrbahnbelag bewirkt eine stärkere Erwärmung der oberen Faser des Überbaus im Vergleich zu einer helleren Betonfahrbahn. Der dadurch entstehende Temperaturunterschied zwischen der

oberen und der unteren Querschnittsfaser führt zu einer Krümmung des Bauwerks und in weiterer Folge zu einer Lagerverdrehung, welche je nach Bauweise des Überbaus deutlicher zu erkennen ist. Verdrehungen waren nicht Teil des gegenständlichen Projektes und des Messprogramms.

Bei massiven Brücken ist durch die Speichermasse des Betons der Einfluss des Überbauwerkstoffs nur gering ausgeprägt, bei Stahlbrücken mit orthotroper Platte ist dieser Effekt deutlich erkennbar. Dieser Einfluss ist auch bei den gemessenen Längenänderungen an der Hangbrücke Würgau aus Beton und an der Hangbrücke Würgau aus Stahlverbund erkennbar. Während bei der Brücke in Massivbauweise ein Weg von max. 82,42 mm gemessen wurde, betrug die max. Längenänderung der Brücke in Stahlverbundbauweise 104,37 mm, was einem Unterschied von über 25 % entspricht. Die Lagerwegunterschiede sind auf die vergleichsweise höheren Temperaturschwankungen der Stahlverbundbrücke zurückzuführen, wodurch die Auswirkungen der Bauweise, Materialwahl (Beton, Stahl, Stahlverbund) und Fahrbahnbelag klar erkennbar ist.

7.7 Einfluss querende Gewässer unterhalb der Brücke

Die zur Verfügung gestellten Referenzobjekte der Autobahndirektion Nordbayern enthielten ein Brückenobjekt mit einem Fließgewässer darunter. Die Trubbachbrücke auf der A73 führt über den Trubbach. Die Temperatursauswertungen haben gezeigt, dass keine Einflüsse zufolge des Trubbaches erkennbar sind. Ein Grund dafür dürfte die Entfernung des Messquerschnittes zum Fließgewässer sein. Das monitorierte Widerlager wird durch eine unter der Trubbachbrücke durchführende Straße abgetrennt. Der Abstand Messquerschnitt zu Gewässer beträgt ca. 20 m. Um eine Abhängigkeit erkennen zu können, müsste direkt über dem Fließgewässer ein Messquerschnitt installiert werden.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse aus bereits durchgeführten Messungen, bei denen ein entsprechendes Messgerät direkt über dem Wasser installiert wurde, kann ein Einfluss auf die Temperatureinwirkung im Brückenumfeld zufolge Fließgewässer bestätigt werden. Generell führen Gewässer im Umfeld von Brücken dazu, dass die maximal auftretenden Verschiebungswege bei den Lagern etwas geringer ausfallen als bei Brücken, die sich beispielsweise im versiegelten Bereich befinden. Be-

¹ LICHTER, U. (2014): Klimatische Temperatureinwirkungen und Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

trachtet man stehende Gewässer, so kann die Speichermasse des Wassers noch deutlich über Nacht nachwirken und den Temperaturabfall des Tragwerks vermindern (siehe Steyrtalbrücke im Anhang).

Der Einfluss querender Gewässer auf die Temperatur im Brückenüberbau kann im Allgemeinen als dämpfend beschrieben werden. Die Speichermasse des Wassers führt dazu, dass im Sommer die Maximaltemperaturen etwas reduziert werden (ausgleichender Effekt im Tagesgang). Nur bei tiefen und lang anhaltenden Temperaturen unter dem Gefrierpunkt kann es im Frühjahr bei beginnender stärkerer Sonneneinstrahlung zu einer Erhöhung der Temperaturgradienten (Tag – Nacht) kommen. Dieser Effekt kann anhand der Messergebnisse des an der Seitenhafenbrücke in Wien (S. 69) installierten Monitoring-Systems verdeutlicht werden, welches aufgrund der Exponiertheit des Temperatursensors über dem Wasserkörper niedrigere Temperaturwerte sowohl im Durchschnitt als auch im Extremfall im Vergleich zum Temperatursensor in Widerlagernähe aufgenommen hat. Am ausgeprägtesten zeigt sich der durch querende Gewässer hervorgerufene Umwelteinfluss auf das Bauwerk im Tagesgang, was jedoch für die maximalen Lagerwege nicht bestimmend ist.

Es werden daraus jedoch keine maßgeblichen Bemessungsparameter abgeleitet, da die Effekte meist von untergeordneter Bedeutung sind.

8 Zusammenfassung/ Schlussfolgerung

Im Fokus des gegenständlichen Projektes „Lagerwege von Brücken (FE-Nr. 15.0537/2011/GRB)“ liegt die Ableitung von Rückschlüssen für Temperaturansätze im Hinblick auf die statische Bemessung. Die an vier von der Autobahndirektion Nordbayern zur Verfügung gestellten Referenzobjekten messtechnisch erfassten Lagerverschiebungen, Bauwerks- und Lufttemperatur am Widerlager sollen Aufschluss über die Korrelation zwischen normativ festgelegten Bauwerkstemperaturen und den damit verbundenen Lagerwegen zu den noch vorhandenen Reserven aus der Bemessung geben. Die dafür vorgesehenen Monitoringsysteme wurden mit 01.06.2017 an den in Tabelle 25 aufgelisteten Brückentragwerken installiert und in Betrieb genommen.

Nr.	Name	Ort	Gesamtlänge
1	Hangbrücke Würgau Beton	Würgau/ Scheßlitz	403 m
2	Hangbrücke Würgau Stahlverbund	Würgau/ Scheßlitz	425,37 m
3	Trubbachbrücke	Forchheim	95 m
4	Paradiestälbrücke	Wölkendorf	27,06 m

Tab. 25: Gemessene Brücken

Die Messdaten wurden vor Ort im internen Speicher des Datenloggers gespeichert und in einem 5-Tage-Intervall auf die Schimetta-Server transferiert. Diese Daten wurden bis zum 27.01.2019 bezogen und ausgewertet. Hierbei wurden folgende Punkte festgestellt:

Temperaturen

Die Temperaturen sind im erwarteten Rahmen und haben die statischen Rechenwerte nicht erreicht. Aktuell wurden bei der Hangbrücke Würgau maximale Betontemperaturen von +32,7 °C (Sensor T5) und minimale Temperaturen von -9,7 °C (Sensor T5) gemessen. Bei der Hangbrücke Würgau (Stahlverbund) wurden maximale Stahltemperaturen von +35,4 °C (Sensor T2) und minimale Stahltemperaturen von -12,4 °C (Sensor T4) aufgezeichnet. Bei der Trubbachbrücke wurden maximale Betontemperaturen von +31,5 °C (Sensor T5) und minimale Betontemperaturen von -7,5 °C (Sensor T5) gemessen. Die Paradiestälbrücke zeigt im Beobachtungszeitraum maximale Betontemperaturen von +32,8 °C (Sensor T3) und minimale Betontemperaturen von -11,4 °C (Sensor T3).

Im Vergleich zu den genannten Messwerten ergeben sich aus DIN EN 1991-1-5, 6.1.3 in Abhängigkeit des Materials folgende maximale und minimale Temperaturanteile:

- Betonbrücken:
 $T_{e,min} = -16 \text{ °C}$,
 $T_{e,max} = +39 \text{ °C}$.
- Verbundbrücken:
 $T_{e,min} = -20 \text{ °C}$,
 $T_{e,max} = +41 \text{ °C}$.

Längenänderungen

Die Wegaufnehmer zeigen im Beobachtungszeitraum, aufgrund der Temperaturschwankungen, den

zu erwarteten Verlauf. Die maximalen Längsbewegungen bei der Hangbrücke Würgau wurden für den Messzeitraum 01.06.2017 bis 27.01.2019 mit ca. 81 – 82 mm aufgezeichnet. Bei der Hangbrücke Würgau (Stahlverbund) wurde eine maximale Längsbewegung von ca. 104 mm gemessen. Die Trubbachbrücke zeigt eine maximale Längsverschiebung von ca. 23 – 25 mm und die Paradiestalbrücke eine maximale Längsbewegung von ca. 12,5 mm.

Wie in Kapitel 7 bereits erwähnt ergeben die Temperatursauswertungen der Referenzobjekte keine Überschreitung der minimalen und maximalen Temperaturen für Brückentyp 2 und Brückentyp 3 ($T_{e,min}$ und $T_{e,max}$). Weiter kann durch die in Kapitel 7 dargestellte Auswertung gezeigt werden, dass bei allen Objekten keine Überschreitung der normgemäßen Ausdehnung und der Verkürzung vorliegt. Die Lagerwege mit den Normvorgaben inkl. Teilsicherheitsbeiwerte ($\Delta T_{N,con,Dil}$ und $\Delta T_{N,exp,Dil}$) zeigen, dass noch eine ausreichende Reserve bis zum Erreichen der Bemessungswerte vorhanden ist. Der als Fahrbahnbelag dienende Baustoff hat aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit eine wärmedämmende Wirkung. Bei massiven Brücken hat der Fahrbahnbelag nur eine geringe Auswirkung auf die Lagerwege, während dieser Effekt bei Stahlbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte deutlich ausgeprägter ist.

Die Messergebnisse sowie die im Anhang dokumentierten weiteren Projektergebnisse zeigen, dass die verformungswirksamen Bauteiltemperaturen sehr träge auf die aktuellen Außenlufttemperaturen reagieren. Zwischen den Extremwerten der Außen- und der Bauteiltemperatur bestehen bauwerksabhängige zeitliche Verschiebungen von z. B. $\frac{1}{2}$ Tag. Grund dafür ist die relativ hohe Wärmekapazität von Beton und insbesondere die massive Querschnittsform bei z. B. Plattenbalkensystemen. Weiterführende Messungen können daher eine Datenbasis schaffen, mit der gezeigt werden kann, dass bei der Festlegung von maximalen und minimalen Außentemperaturen über längere Zeitintervalle gemittelt werden kann als bisher angenommen. Umgekehrt können diese Erkenntnisse auch in eine mögliche Optimierung der wirksamen Bauteiltemperaturen $T_{e,max}$ und $T_{e,min}$ einfließen. Die Auswertung der trägen Reaktion der wirksamen Bauteiltemperatur auf die Außenlufttemperatur ist außerdem ein Beleg dafür, dass lokale Effekte, wie z. B. zeitlich begrenzte Teilabschattungen durch die Lage des Tragwerkes zur Sonneneinstrahlung, un-

berücksichtigt bleiben können. Gewässer direkt unter einer Brücke haben aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser eine untergeordnete Auswirkung auf die Kerntemperatur des Tragwerks und werden daher in der Bemessung nicht berücksichtigt, da eine konstante Temperaturänderung durch das Gewässer nicht gewährleistet ist.

Fazit und Schlussfolgerungen

Die im gegenständlichen Bericht dokumentierten Messwerte (Temperaturen und Verschiebwege) liefern wertvolle Informationen zum Temperaturverformungsverhalten realer Brückensysteme und bestätigen das im Rahmen der bauphysikalischen Eigenschaften erwartete Systemverhalten. Umwelteinflüsse, wie querende Gewässer unterhalb des Bauwerks oder die einseitige Sonneneinstrahlung aufgrund der Bauwerkslage, haben einen Einfluss auf die oberflächliche Bauwerkstemperatur und teilweise auf die Lagerverdrehung, jedoch keine nennenswerte Auswirkung auf die Lagerwege.

In Bezug auf die in der DIN EN 1991-1-5 angeführten Bemessungswerte hat sich mit den Messwerten eine gute Korrelation gezeigt, wobei noch Reserven erkennbar sind. Hierbei ist anzumerken, dass in Summe vier Tragwerke über ein Jahr gemessen wurde und damit zu wenig Daten vorliegen, um statistisch abgesicherte Aussagen treffen zu können.

Eine Empfehlung wäre die Temperaturminima und -maxima in der Normung aufgrund der veränderlichen Klimadaten der letzten Jahrzehnte auf Aktualität zu prüfen. Im aktuellen Projekt liegen die Daten von Wetterstation nur für den Messzeitraum vor. Die Lagerwege selbst haben eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten gezeigt und die in der Norm fixierten Sicherheiten wurden nicht berührt.

Bilder

- Bild 1: Lage der Brücken (Quelle: © OpenStreet Map und Mitwirkende, CC-BY-SA)
- Bild 2: Hangbrücke Würgau Beton
- Bild 3: Hangbrücke Würgau Stahlverbund
- Bild 4: Trubbachbrücke
- Bild 5: Paradiestalbrücke

- Bild 6: Sensorpositionen
(1 – Hangbrücke Würgau)
- Bild 7: Sensorpositionen
(2 – Hangbrücke Würgau)
- Bild 8: Sensorpositionen (3 – Trubbachbrücke)
- Bild 9: Sensorpositionen (4 – Paradiestalbrücke)
- Bild 10: Foto Basisstation
- Bild 11: Anordnung der Komponenten in einer Basisstation
- Bild 12: Datenlogger
- Bild 13: Datenfernübertragungsmodul
- Bild 14: Stromversorgung DFÜ
- Bild 15: NTC Temperatursensor
- Bild 16: Wegaufnehmer 200 mm Novotechnik
- Bild 17: Wegaufnehmer montiert (Paradiestalbrücke)
- Bild 18: Temperaturverlauf – Hangbrücke Würgau Beton – 02.06.2017-27.01.2019
- Bild 19: Temperaturverlauf – Hangbrücke Würgau Stahlverbund – 01.06.2017-27.01.2019
- Bild 20: Temperaturverlauf Herbstwoche – Hangbrücke Würgau Stahlverbund – 15.11.2018-22.11.2018
- Bild 21: Temperaturverlauf – Trubbachbrücke – 01.06.2017-27.01.2019
- Bild 22: Temperaturverlauf – Paradiestalbrücke – 02.06.2017-20.08.2018
- Bild 23: Längenänderung – Hangbrücke Würgau Beton – 02.06.2017-27.01.2019
- Bild 24: Längenänderung – Hangbrücke Würgau Stahlverbund – 01.06.2017-27.01.2019
- Bild 25: Längenänderung – Trubbachbrücke – 01.06.2017 – 27.01.2019
- Bild 26: Längenänderung – Paradiestalbrücke – 02.06.2017 – 27.01.2019
- Bild 27: Längenänderung je Brücke bei 1 °C Temperaturunterschied in Bezug auf die Verschiebelänge
- Bild 28: Statistische Verteilung der Jahresextrema auf Gumpelpapier für die Wetterstation Nr. 1107 in Ebrach
- Bild 29: Interpolation der Bemessungstemperaturen $T_{\min,98\%}$ für die Brückenstandorte
- Bild 30: Interpolation der Bemessungstemperaturen $T_{\max,98\%}$ für die Brückenstandorte
- Bild 31: Auszug aus der Bestandsstatik Teil V.B. 01, S. 19. Verformung aus Temperatur mit roter Farbe gekennzeichnet Bemessungswert für den konstanten Temperaturanteil $\Delta T_N = 114 \text{ K} \Rightarrow \varepsilon_T = 1,14 \text{ ‰}$ $\Delta L_{\text{Statik}} = 1,14 \times 182 = 207,5 \text{ mm}$
- Bild 32: Auszug aus der Bestandsstatik Teil V.B. Lager, S. 24. Verformung aus Temperatur mit roter Farbe gekennzeichnet Bemessungswert für den konstanten Temperaturanteil $\Delta T_N = 125 \text{ K} \Rightarrow \varepsilon_T = 1,25 \text{ ‰}$ $\Delta L_{\text{Statik}} = 1,25 \times 184,5 = 230,6 \text{ mm}$
- Bild 33: Auszug aus der Bestandsstatik Teil 3. Lager und ÜKO, S. 3-21. Verformung aus Temperatur mit roter Farbe gekennzeichnet Bemessungswert für den konstanten Temperaturanteil $\Delta T_N = 94 \text{ K} \Rightarrow \varepsilon_T = 0,94 \text{ ‰}$ $\Delta L_{\text{Statik}} = 0,94 \times 67,5 = 63,5 \text{ mm}$
- Bild 34: Auszug aus der Bestandsstatik Teil III Lager, S. 3-21. Verformung aus Temperatur mit roter Farbe gekennzeichnet Bemessungswert für den konstanten Temperaturanteil $\Delta T_N = 101 \text{ K} \Rightarrow \varepsilon_T = 1,01 \text{ ‰}$ $\Delta L_{\text{Statik}} = 1,01 \times 27,2 = 27,5 \text{ mm}$
- Bild 35: Ermittlung der Lagerwege bezogen auf die Bemessungstemperatur für die Hangbrücke Würgau Beton
- Bild 36: Ermittlung der Lagerwege bezogen auf die Bemessungstemperatur für die Hangbrücke Würgau Stahlverbund
- Bild 37: Ermittlung der Lagerwege bezogen auf die Bemessungstemperatur für die Trubbachbrücke
- Bild 38: Ermittlung der Lagerwege bezogen auf die Bemessungstemperatur für die Paradiestalbrücke
- Bild 39: Vergleich gemessener und rechnerisch ermittelter Lagerwege

Bild 40: Akkumulierter Gleitweg für den Messzeitraum je Brücke und Sensor in mm	Tab. 6: Beschreibung Messparameter, Sensoren und Anzahl
Bild 41: Temperaturvergleich Basisstation (T1) mit Außenlufttemperatur Wetterstationen (T _{DWD}) Hangbrücke Würgau Beton	Tab. 7: Darstellung Temperaturdaten
Bild 42: Temperaturvergleich Basisstation (T1) mit Außenlufttemperatur Wetterstationen (T _{DWD}) Hangbrücke Würgau Stahlverbund	Tab. 8: Darstellung Temperaturdaten
Bild 43: Temperaturvergleich Basisstation (T1) mit Außenlufttemperatur Wetterstationen (T _{DWD}) Trubbachbrücke	Tab. 9: Darstellung Temperaturdaten
Bild 44: Temperaturvergleich Basisstation (T1) mit Außenlufttemperatur Wetterstationen (T _{DWD}) Paradiestalbrücke	Tab. 10: Darstellung Temperaturdaten
Bild 45: Korrelation zwischen min/max Außenlufttemperatur und min/max konstanter Temperaturanteil für Brücken nach DIN EN 1991-1-5	Tab. 11: Darstellung Auslenkungen der Wegaufnehmer
Bild 46: Korrelation zwischen Außenluft und Bauwerkstemperatur für die Betonbrücken Hangbrücke Würgau, Trubbachbrücke und Paradiestalbrücke	Tab. 12: Darstellung Auslenkungen der Wegaufnehmer
Bild 47: Korrelation zwischen Außenluft und Bauwerkstemperatur für die Stahlverbundbrücke Hangbrücke Würgau	Tab. 13: Darstellung Auslenkungen der Wegaufnehmer
Bild 48: Draufsicht Hangbrücke Würgau mit Nordpfeilausrichtung	Tab. 14: Darstellung Auslenkungen der Wegaufnehmer
Bild 49: Draufsicht Trubbachbrücke mit Nordpfeilausrichtung	Tab. 15: Bemessungswerte der Lufttemperatur für die Wetterstationen
Bild 50: Maxima und Minima für je Brücke 2 Sensoren in der Fahrbahnplatte	Tab. 16: Extremwerte aus Wetterstationen in der Umgebung
	Tab. 17: Längenänderung infolge Temperatur lt. Bestandsstatik
	Tab. 18: Darstellung Längenänderung infolge Temperatur
	Tab. 19: Darstellung Längenänderung infolge Temperatur unter Berücksichtigung der an Wetterstationen gemessenen Lufttemperaturen
	Tab. 20: Zusammenfassung und Ermittlung von Reserven aus rechnerisch ermittelten Lagerwegen gemäß dem normativen Regelwerk und rechnerisch ermittelten Lagerwegen mit Wetterstationsdaten
	Tab. 21: Vergleich gemessener Außenlufttemperaturen am Bauwerk vs. Temperatur Wetterstationen

Tabellen

Tab.1: Gemessene Brücken	Tab. 22: Entfernungen Brücken-Wetterstationen
Tab. 2: Beschreibung Hangbrücke Würgau Beton	Tab. 23: Korrelation zwischen Basisstationstemperaturen (T ₁) und Außenlufttemperatur aus Wetterstationen (T _{DWD})
Tab. 3: Beschreibung Hangbrücke Würgau Stahlverbund	Tab. 24: Abgeleitete Korrelation zwischen Außenluft- und Bauwerkstemperatur je Brücke
Tab. 4: Beschreibung Trubbachbrücke	Tab. 25: Gemessene Brücken
Tab. 5: Beschreibung Paradiestalbrücke	

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2016

B 123: **Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung**

Geißler, Krohn € 15,50

B 124: **Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**

Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 125: **Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 126: **Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**

Mielecke, Graubner, Roth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 127: **Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden**

Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: **Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden**

Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: **Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen**

Schmellekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 130: **Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags**

Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 131: **Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus**

Schmidt-Thrö, Mielecke, Jungwirth, Graubner, Fischer, Kuhlmann, Hauf
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 132: **Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke**

Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 133: **Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 134: **Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erhaltungskonzepte von Straßenbrücken**

Gehrlein, Lingemann, Jungwirth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

B 135: **Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: **HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: **Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton**

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: **Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken**

Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: **Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie**

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: **Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5**

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: **Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln**

Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 142: **Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken**

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brenninger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

B 143: **Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: **Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: **8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

B 147: **Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen**

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

B 146: **Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden**

Paschen, Dürrer, Gronau, Rentmeister
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 148: **Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit**

Maurer, Bettin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 149: **Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke**

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: **Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze**

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 151: **Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken**

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 152: **Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens**

Kuhlmann, Stempniewski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 153: **Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: **Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern**

Friedrich € 9,00

B 155: **Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken**

Wirker, Donner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 156: **Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten**

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 157: **9. BASt-Tunnelsymposium – Tagungsband**

in Vorbereitung

B 158: **Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags**

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 159: **Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems**

Lebhardt, Seiler, Gerdes € 15,50

2021

B 160: **Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager**

Butz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 161: **Lagerwege von Brücken**

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

ANHANG 1

Erläuterung Temperatursensoranordnung

1 Anordnung Temperatursensoren

Um die Anordnung der Temperatursensoren zu erläutern, werden nachfolgend aus der Vielzahl von Messungen durch die Firma Schimetta Consult exemplarisch 4 aktuelle Beispiele dargestellt. Es soll verdeutlicht werden, dass Temperaturvariationen über die Länge des Tragwerkes keinen großen Einfluss auf die resultierenden Lagerwege verursachen. Weiters wird auf einen Artikel in der Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau verwiesen: Sanio, D.; Mark, P.; Ahrens, M. A.: Temperaturfeldberechnung für Brücken. Beton- und Stahlbeton 112 (2017), Heft 2, S. 85 – 95. In diesem Artikel wird folgende Aussage getätigt: „Das Temperaturfeld wenig gekrümmter Brücken gilt allgemein als konstant über die Länge.“

Zum Abschluss an die 4 Brückenbeispiele wird auch die aktuell gemessene Hangbrücke Würgau Beton mit den Messdaten dargestellt. Ein Detailausschnitt zeigt die Abhängigkeit Temperatur vs. Lagerweg.

2 Steyrtalbrücke (Oberösterreich, Österreich)

Bauerwerksbeschreibung:	Tragwerkstyp	Beton-Bogentragwerk
	Anzahl Brückenfelder	4 Richtung Linz + 5 Richtung Selztal
	Länge	180,50 m

Die neue Steyrtalbrücke spannt sich mittels eines Bogens über die aufgestaute Steyr. Beiderseits der Steyr befinden sich die Bogenwiderlager etwa 10 Höhenmeter über dem Stauziel. Die Widerlager der neuen Brücke befinden sich im Bereich des alten ersten Bogenpfeilers neben dem bestehenden Widerlager. Die aufgeständerte Fahrbahn in Fahrtrichtung Linz weist vier Felder auf, in Fahrtrichtung Selzthal wurden fünf Felder ausgeführt.

Der jahreszeitliche Verlauf der Temperatur für das Tragwerk wird an unterschiedlichen Stellen durch Temperaturlaufnehmer erfasst (Betontemperatur). Dabei wurden Aufnehmer an unterschiedlichen Stellen des Tragwerks angeordnet, um Temperaturgradienten ermitteln zu können. Die Temperaturen werden im Bogenscheitel, im Bogen selbst sowie in den Achsen 0, 2 und 9 gemessen und sind Grundlage für die Interpretation der weiteren Messdaten.



Abbildung 51: Foto Steyrtalbrücke

Sensorpositionen:

Die Sensoren 1 und 4 sind im Bogen im den Viertelpunkten montiert. Der Umstand der ausgeprägten Temperaturgradienten ist bei diesen Sensoren vermutlich auf den Einfluss des Wasserkörpers zurückzuführen, der durch Strahlung bzw. auch Reflexion den Temperaturgang des Tragwerks beeinflusst.

Der Sensor 5 befindet sich im Kabeltrog in Achse 2 und der Sensor 6 am Endquerträger Achse 0, und beide Sensoren haben direkten Kontakt mit der Umgebungstemperatur im Freien und sind daher von den Temperaturschwankungen der Außenluft abhängig.

Geringere Schwankungen zeigen die Sensoren 2, 3 und 7. Temperatursensor 2 und 3 sind im Bogenscheitel montiert und Sensor 7 am Endquerträger Achse 9 in der Widerlagerkammer. In diesen Bereichen sind die Einflüsse durch den Wasserkörper, direkte Sonneneinstrahlung, Umgebungstemperatur und Änderung der Temperatur durch direkten Windangriff geringer oder nicht vorhanden.

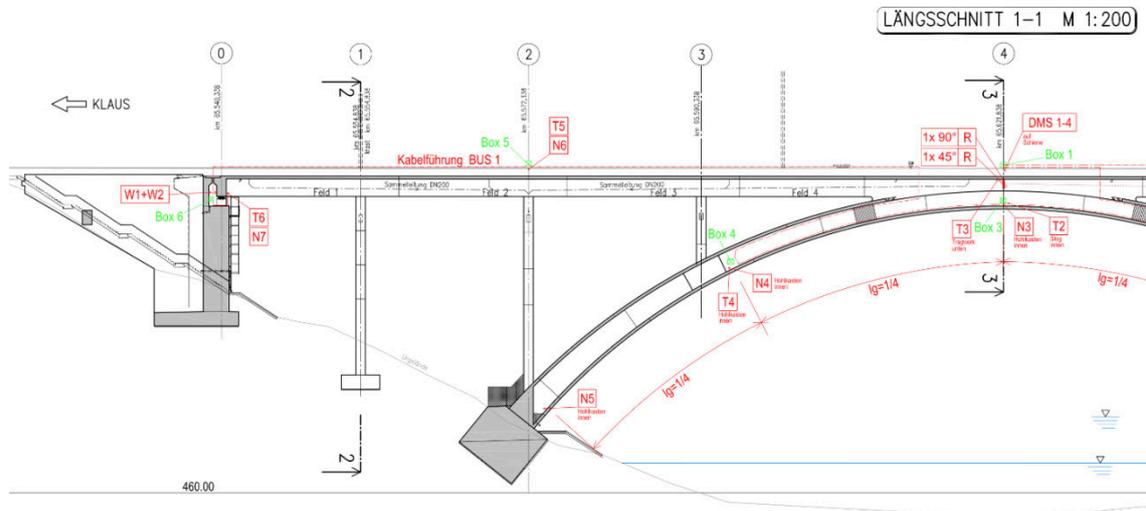


Abbildung 52: Sensorpositionen nordseitig

- Temp_2: Bogenscheitel, in Bodenplatte
- Temp_3: Bogenscheitel, Unterseite Haupttragwerk
- Temp_4: ¼-Punkt des Bogens nordseitig
- Temp_5: Kabeltrog Achse 2
- Temp_6: Endquerträger, Achse 0, nordseitig

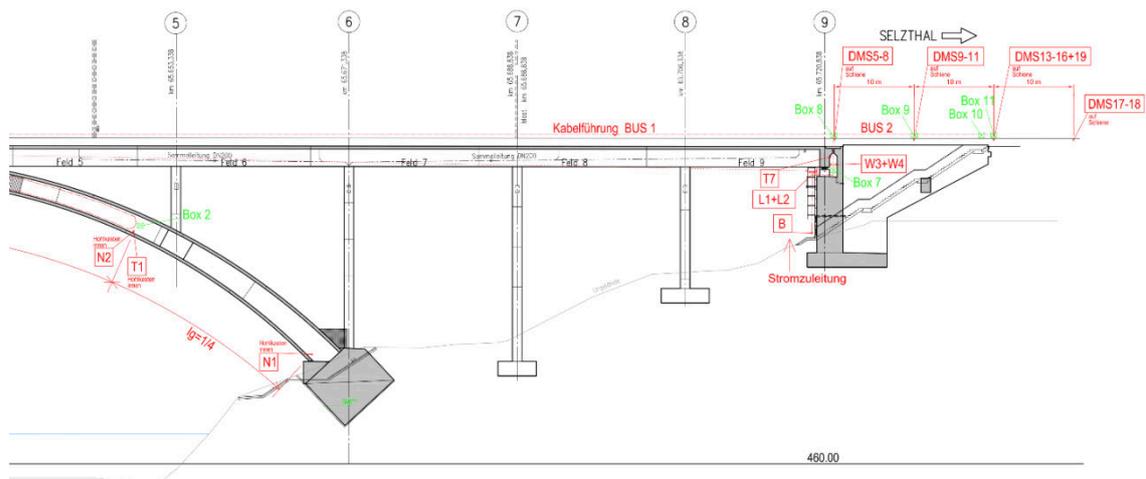


Abbildung 53: Sensorpositionen südseitig

- Temp_1: ¼-Punkt des Bogens südseitig
- Temp_7: Endquerträger, Achse 9, südseitig

Gemessene Temperaturen:

Durch das Monitoringsystem an der Steyrtalbrücke wurde im Zeitraum von November 2014 – Juni 2017 die nachfolgenden Temperaturmessdaten aufgezeichnet.

Die deutlichsten Temperaturschwankungen zeigen die Sensoren 1, 4, 5 und 6 mit ähnlich intensiver Ausprägung. Dies war einerseits bei den gemessenen Tiefstwerten im Januar 2015 der Fall sowie auch im Sommer (August 2015), wo die höchsten Temperaturen erfasst wurden.

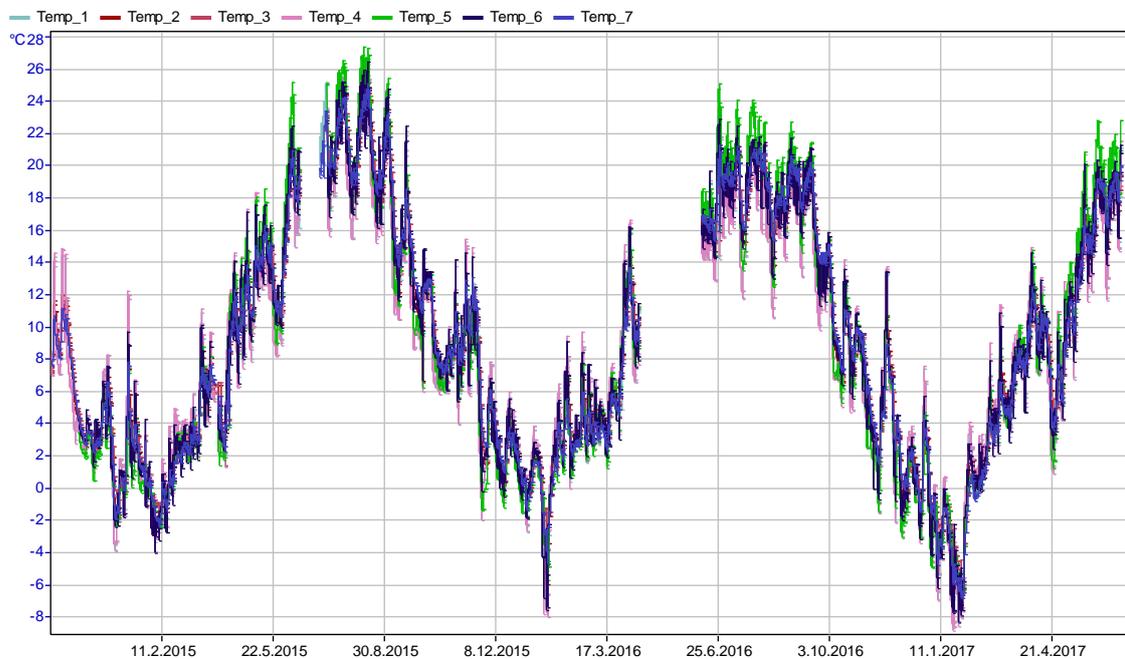


Abbildung 54: Temperaturmessdaten 11-2014 – 6-2017

Tab. 26: Darstellung Mittel-/Minimum-/Maximumwert und Temperaturgradient

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Mittelwert in °C	9,0	9,5	9,5	9,0	9,5	9,5	9,5
Minimum in °C	-8,5	-6,5	-6,5	-9,0	-6,5	-8,5	-7,0
Maximum in °C	26,0	25,0	25,0	26,5	27,5	26,5	25,0
Temperaturgrad. in °C	± 17,25	± 15,75	± 15,75	± 17,75	± 17,00	± 17,50	± 16,00

Über die gesamte Messdauer zeigt sich jedoch keine große Abweichung der mittleren Temperatur (Gesamtdifferenz ca. 0,5 °C) über alle Temperaturmessstellen.

Man erkennt im Vergleich Temperatur vs. Längenänderung, dass sich durch die unterschiedlichen Temperaturmesspositionen auf der Steyrtalbrücke keine Unterschiede in den aufgezeichneten Längenänderungen ergeben. Die Längenänderungen (Weg) laufen von den Temperaturänderungen ohne große Ausreißer dahin.

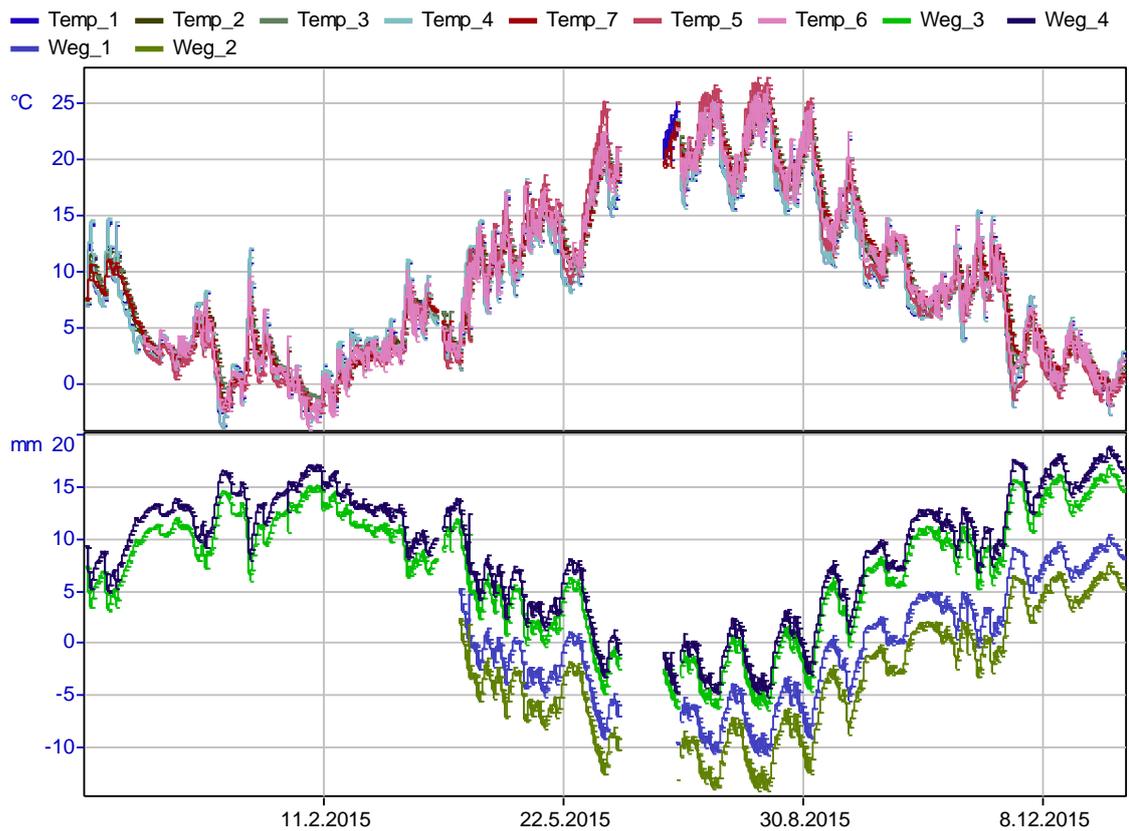


Abbildung 55: Vergleich Temperatur Längenänderung Steyrtalbrücke 2015

In einem Detailausschnitt wie nachfolgend dargestellt erkennt man noch genauer die Unabhängigkeit der Längenänderung (Weg) zur Temperatur. Die Temperatur in den einzelnen Messquerschnitten unterliegt teilweise starken Schwankungen. Die Längenänderung des Tragwerks in den Messpunkten ist davon aber nicht beeinflusst bzw. so träge, dass sich solche Temperaturänderungen nicht auf die Lagerwege auswirken.

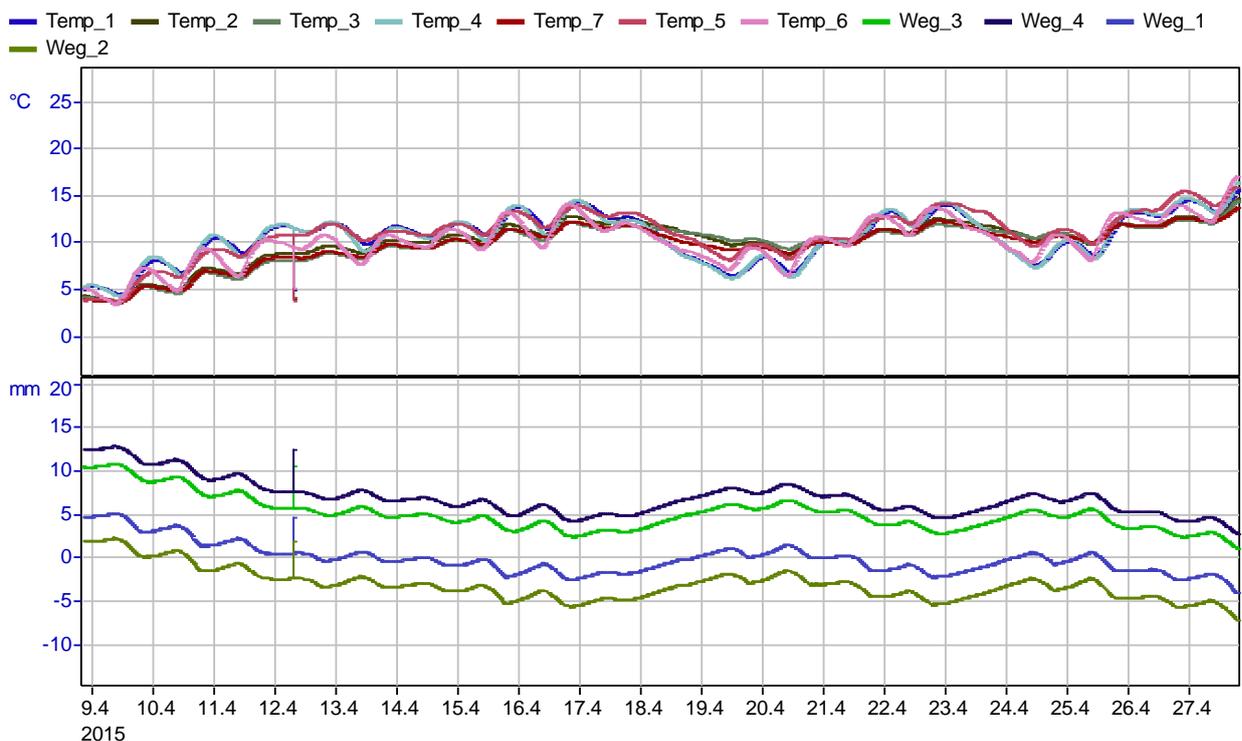


Abbildung 56: Vergleich Temperatur Längenänderung Steyrtalbrücke 2015

3 Seitenhafenbrücke (Wien, Österreich)

Bauwerksbeschreibung:	Tragwerkstyp	vorgespannte integrale Betonbrücke
	Anzahl Brückenfelder	3 Felder
	Länge	128,69 m

Mit der Seitenhafenbrücke B0245 wurde eine neue Donaukanalquerung in Wien für den Straßen-, Fuß- und Radwegverkehr als Teilstück der Freudenauer Hafenstraße B14 errichtet. Die Brücke kam innerhalb des Straßenzuges von km 1,6 + 87,196 bis km 1,8 + 15,889 zu liegen. Mit Einzelstützweiten von 32,0 m + 64,69 m + 32,0 m weist die Seitenhafenbrücke eine Gesamtlänge von 128,69 m auf. Die Breite ist im gesamten Brückenverlauf konstant und beträgt 15,00 m. Die Brückennivellette steigt bis km 1,7 + 02,046 mit 4%, geht in eine Kuppe mit dem Radius von 1000 m über und fällt danach bis km 1,7 + 82,046 zum Kreuzungsbereich um 4%. Hochpunkt ist bei km 1,7 + 42,046 mit einer Höhe von 9,426 m über Wiener Null. Die Querneigung im gesamten Fahrbahnbereich beträgt konstant 2,5%. Im Fuß- und Radwegbereich wird ebenfalls um 2,5% gegengeneigt.

Die Seitenhafenbrücke wurde mit einem digitalen Monitoringsystem ausgestattet, welches einen Einsatz mit unterschiedlichen Sensortypen ermöglicht. Zur Erfassung des jahreszeitlichen Verlaufs der Temperatur am Tragwerk wurden Temperaturlaufnehmer an zwei Stellen montiert, welche je in Feldmitte zwischen den Achsen 0 und 10 und den Achsen 10 und 20 angeordnet sind.



Abbildung 57: Foto Seitenhafenbrücke

Sensorpositionen:

Zur Ermittlung von Temperaturgradienten wurden zwei Temperaturlaufnehmer an zwei unterschiedlichen Stellen des Tragwerks angebracht. Der Temperaturlaufnehmer T1 misst in Feldmitte zwischen Achse 0 und Achse 10. Der Sensor T2 misst in Brückenmitte.

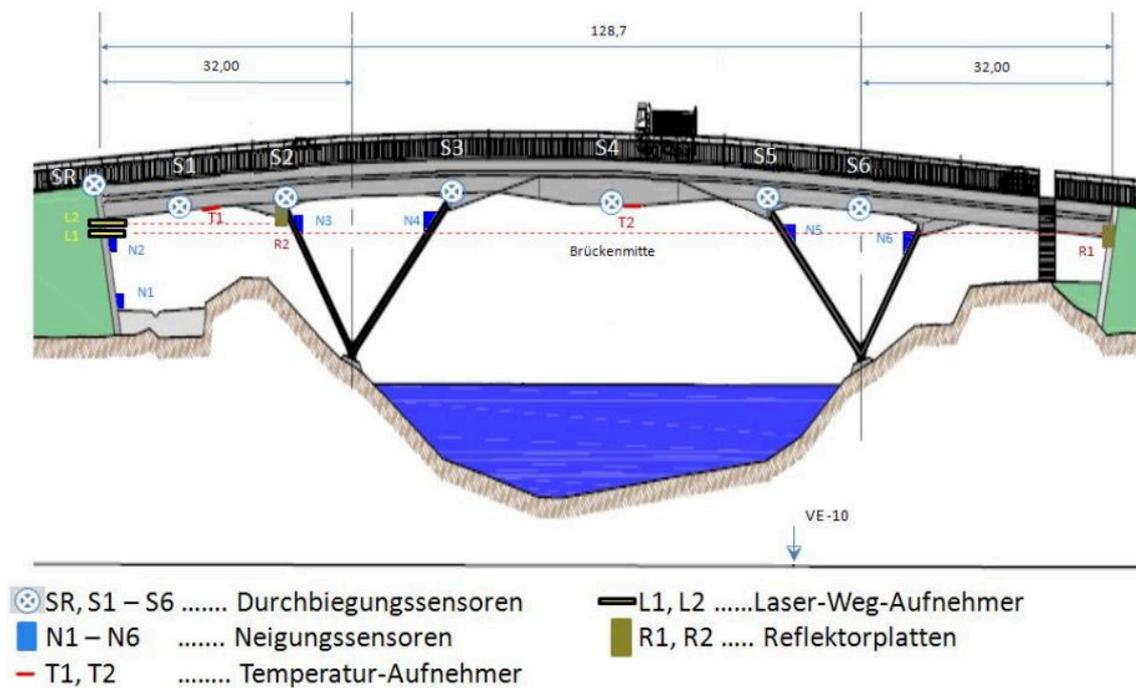


Abbildung 58: Anordnung der Sensoren am Tragwerk

Gemessene Temperaturen:

Nach Installation der Temperatursensoren und der zugehörigen Messtechnik wurde das System in Betrieb genommen. Der Nullabgleich erfolgte am 07.12.2011. Ab diesem Zeitpunkt startete die permanente Aufzeichnung der Messdaten bis 30.06.2017. Zuvor wurden laufend Kalibrierungsarbeiten durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung sind die Ergebnisse innerhalb diesen Zeitraums dargestellt.

Die gemessene Tragwerkstemperatur zeigt in Summe über 5½ Jahre grundsätzlich den erwarteten Verlauf. Die aktuell stärkste Erwärmung erfolgte in der Vorperiode mit ca. 34,5°C (T1) Mitte August 2015. Die bisher tiefste gemessene Temperatur trat Anfang Februar 2012 in einer starken Kälteperiode auf und betrug etwas mehr als 11°C unter Null (T2). Diese Extremwerte wurden im neuen Beobachtungszeitraum 1. Halbjahr 2017 nicht erreicht.

Der Messverlauf zeigt, dass der Sensor (T2) in Tragwerksmitte stärker auf Temperaturschwankungen reagiert, da er gegenüber den Umwelteinflüssen exponierter ist. Der Temperaturverlauf des Sensors (T1) in der Nähe des Widerlagers unterliegt weniger starken Schwankungen, hat aber trotzdem das bisherige Temperaturmaximum erfasst. Beide Sensoren befinden sich wie zu erwarten weiterhin im gleichen Temperaturbereich.

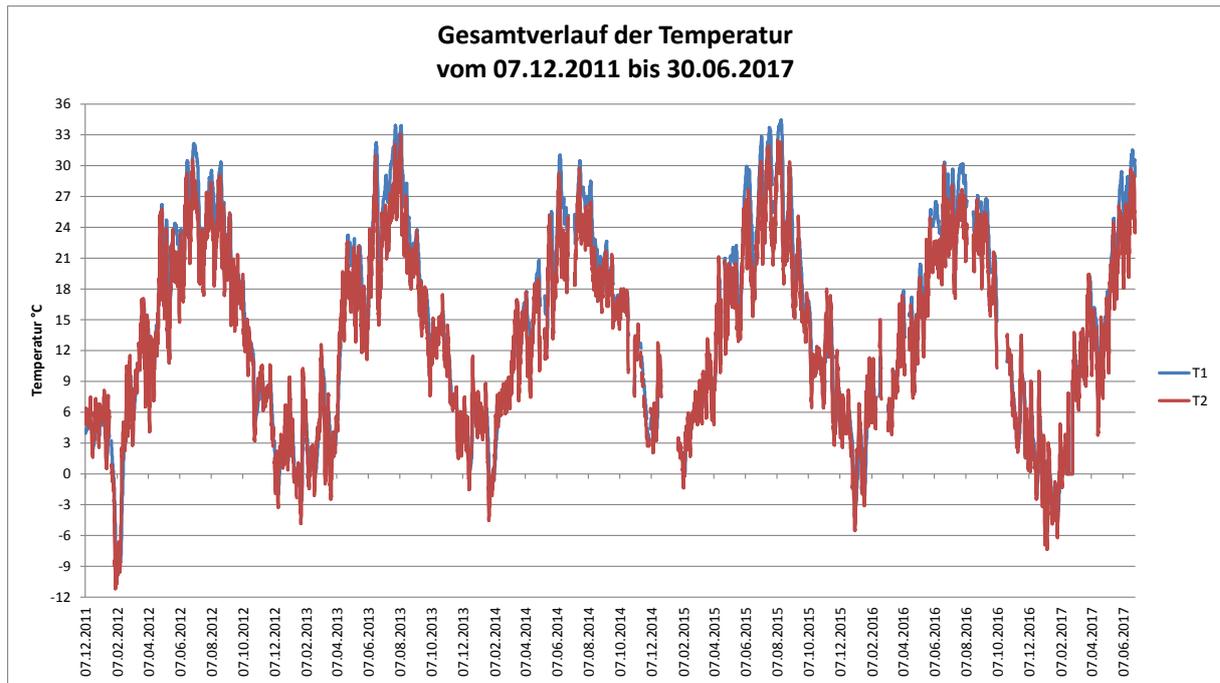


Abbildung 59: Temperaturverlauf der Seitenhafenbrücke (gesamter Beobachtungszeitraum)

Tab. 27: Darstellung Mittel-/Minimum-/Maximumwert und Temperaturgradient

	T1	T2
Mittelwert in °C	12,75	11,25
Minimum in °C	-9,0	-11,0
Maximum in °C	34,5	33,5
Temperaturgrad. in °C	± 21,75	± 22,25

Über die gesamte Messdauer zeigt sich jedoch keine große Abweichung der mittleren Temperatur (Gesamtdifferenz ca. 1,5 °C) über alle Temperaturmessstellen.

Die der Statik zu Grunde liegenden Fahrbahnübergänge (Belagsdehnfugen) bei den Widerlagern Achse 0 und 30 weisen einen maximalen Dehnweg von ± 50 mm auf. Die maximale Längenänderung ist daher mit 100mm begrenzt. Der Sensor L1 misst die Längenänderung zwischen beiden Widerlagern (Achse 0 – Achse 30). In Achse 0 ist der Sensor, in Achse 30 ist die Reflektorplatte montiert. Sensor L2 misst nur die Längenänderung zwischen Widerlager Achse 0 und Stahlstütze noch vor Achse 10, da die Reflektorplatte unter dem Brückentragwerk am Kopf der Stahlstütze befestigt ist. In den dargestellten Messdaten (in nachfolgender Abbildung) weisen die Laserdaten (Wege L1 und L2) einen elektronischen Drift auf. Die maximale Längenänderung über den jahreszeitlichen Verlauf von 5½ Jahren liegt bei ca. 52 mm für den Laser 1.

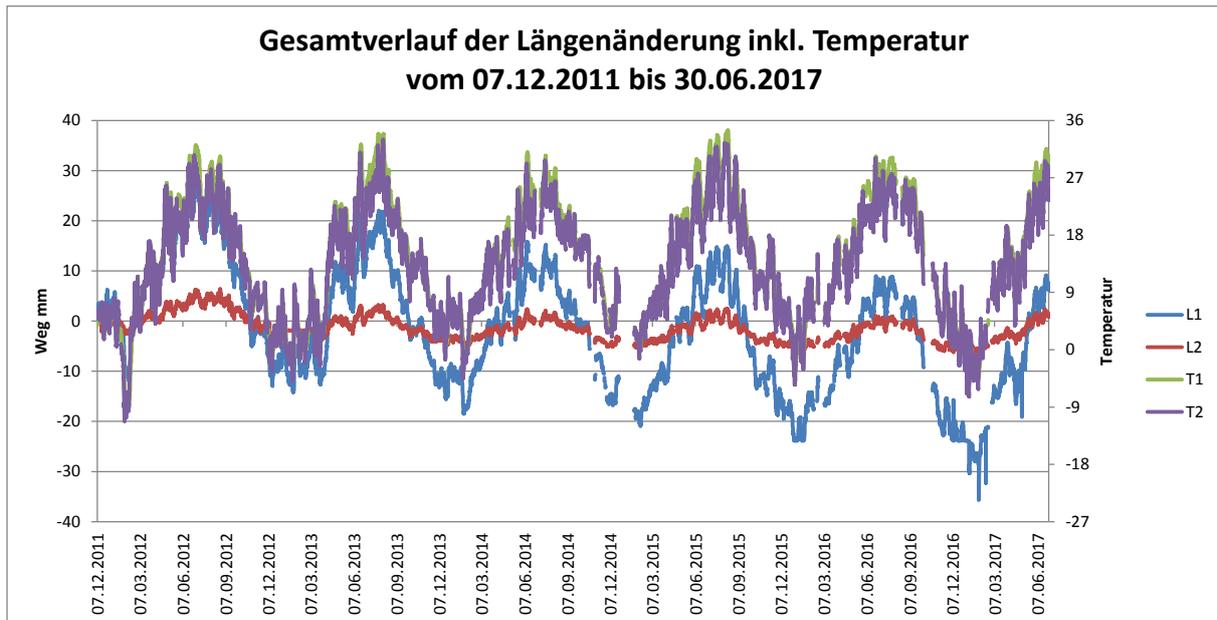


Abbildung 60: Längenänderungen über den Beobachtungszeitraum

4 Chao Phraya River Crossing, Nonthaburi (Thailand)

Bauerwerksbeschreibung: Tragwerkstyp Schrägseilbrücke mit zwei Pylonen

Anzahl Brückenfelder 3 Felder

Länge 460,00 m

Die Nonthaburi-Brücke überquert den Chao Phraya River in Thailand und ist Bestandteil der Nonthaburi-1 Strecke. Die Brücke weist eine Gesamtlänge von 460,0 m mit Einzelstützweiten von 130,0 m + 200,0 m + 130,0 m auf. Die als Hohlkasten ausgeführte Fahrbahn hängt an in Fahrbahnmitte angeordneten Schrägseilen, welche an zwei 45,96 m hohen Pylonen befestigt sind.

Die Brücke wurde mit einem permanenten Monitoringsystem versehen, um in regelmäßigen Zeitintervallen objektspezifische Daten via Internet zu erheben. Der jahreszeitliche Verlauf der Temperatur für das Tragwerk wird an unterschiedlichen Stellen durch Temperaturempfänger erfasst (Betontemperatur). Dabei wurden Empfänger an unterschiedlichen Stellen des Tragwerks angeordnet, um Temperaturgradienten ermitteln zu können. Die Temperaturen werden an den Eckpunkten des Fahrbahnquerschnittes im mittleren und im seitlichen Feld zwischen den Achsen M3 und M4 gemessen und sind Grundlage für die Interpretation der weiteren Messdaten.



Abbildung 61: Foto Chao Phraya River Crossing, Nonthaburi

Sensorpositionen

Die Sensoren T2 bis T5 wurden in Brückenfeldmitte installiert, jeweils in einer Ecke bei den Außenwänden des Hohlkastens. Im Feld zwischen den Achsen M3 und M4 wurden die Sensoren T7 und T8 in entgegengesetzten Ecken der Hohlkastenaußenwänden montiert. Die Sensoren befinden sich im Inneren der Betonwände und haben daher keinen Kontakt mit der Umgebungstemperatur im Freien.

LONGITUDINAL SECTION (overall layout)

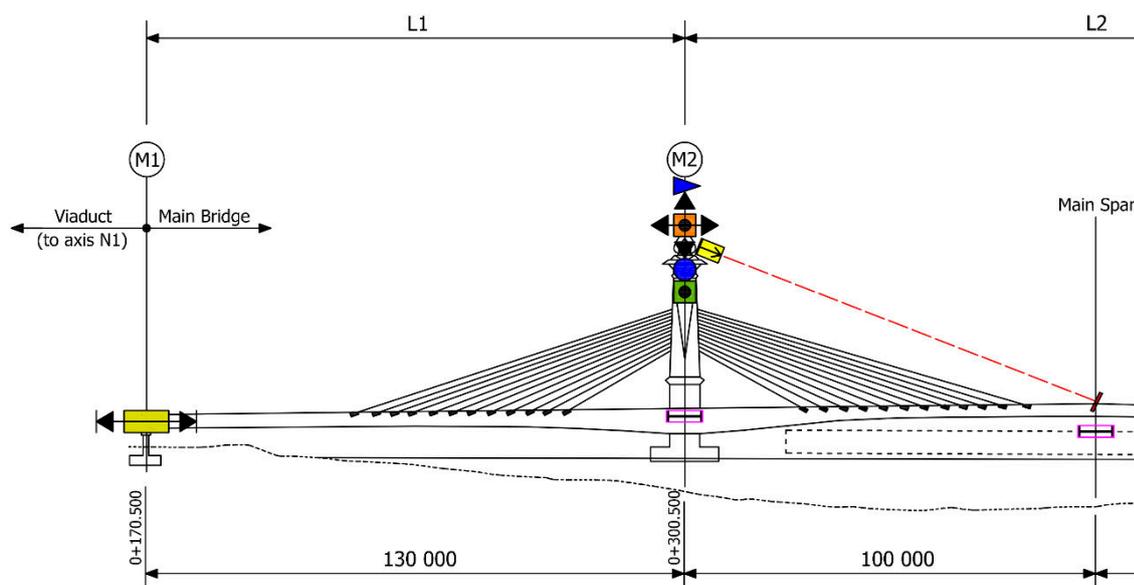


Abbildung 62: Längsschnitt Chao Phraya River Crossing im Bereich Pylon M2

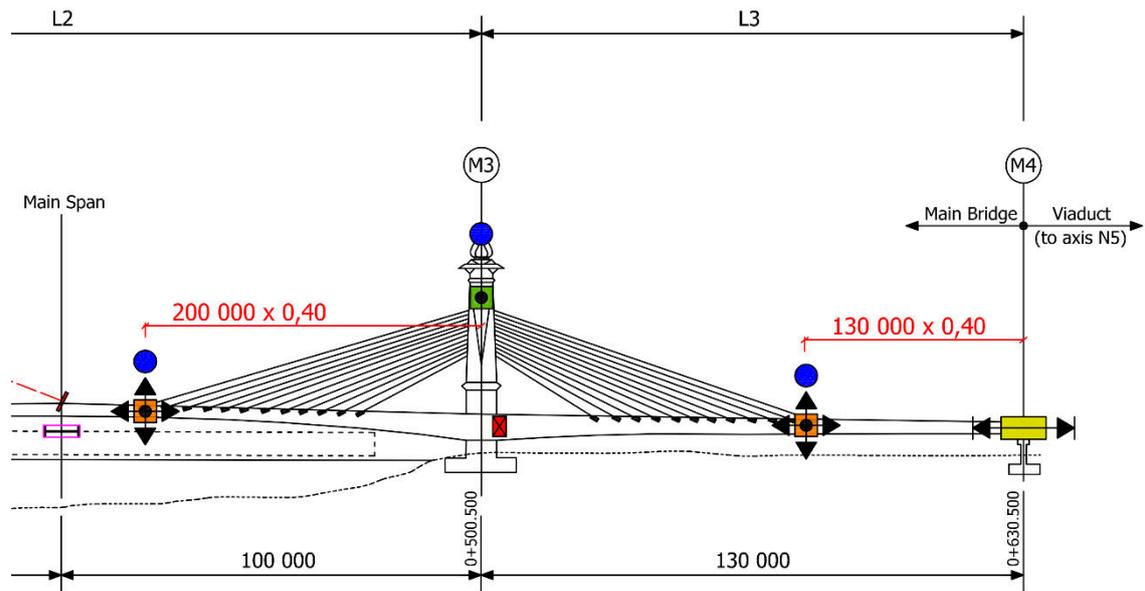
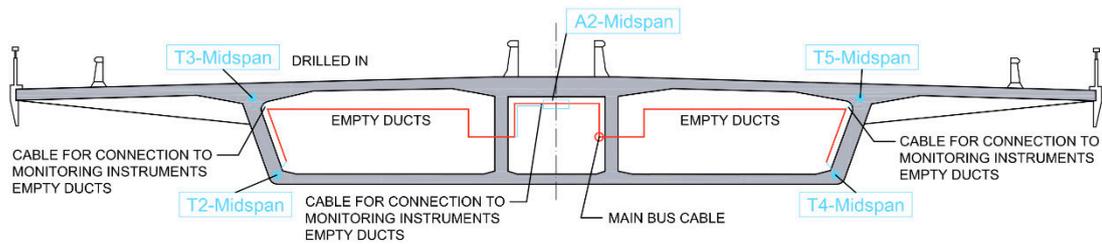


Abbildung 63: Längsschnitt Chao Phraya River Crossing im Bereich Pylon M3

SECTION 5-5 - 1:100



SECTION 6-6 - 1:100

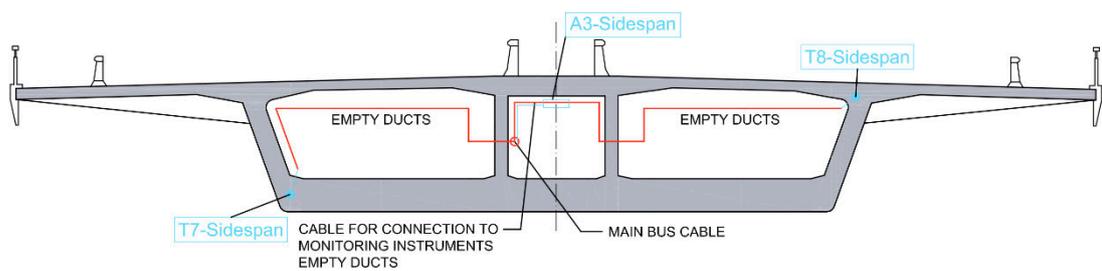


Abbildung 64: Querschnitte Chao Phraya River Crossing im Bereich Schnitt 5-5 und 6-6

	T2-Midspan:	Ecke links-unten
	T3-Midspan:	Ecke links-oben
Section 5-5	T4-Midspan:	Ecke rechts-unten
	T5-Midspan:	Ecke rechts-oben
Section 6-6	T7-Sidespan:	Ecke links-unten
	T8-Sidespan:	Ecke rechts-oben

Gemessene Temperaturen:

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Tragwerkstemperatur an den angeführten Positionen im Messzeitraum von März 2015 – November 2016. Die stärkste Erwärmung erfolgte am 13.05.2016 mit ca. 39,4°C (T8). Die tiefste gemessene Temperatur trat Ende Januar 2016 in einer außergewöhnlich kalten Periode für Thailand auf und betrug knapp 21,5°C (T4).

Die Bauwerkstemperatur ist die wesentliche Grundlage für die Interpretation aller übrigen Messdaten, um zwischen gewöhnlichen (temperaturbedingten) und außergewöhnlichen Veränderungen der Messaufnehmer unterscheiden zu können.

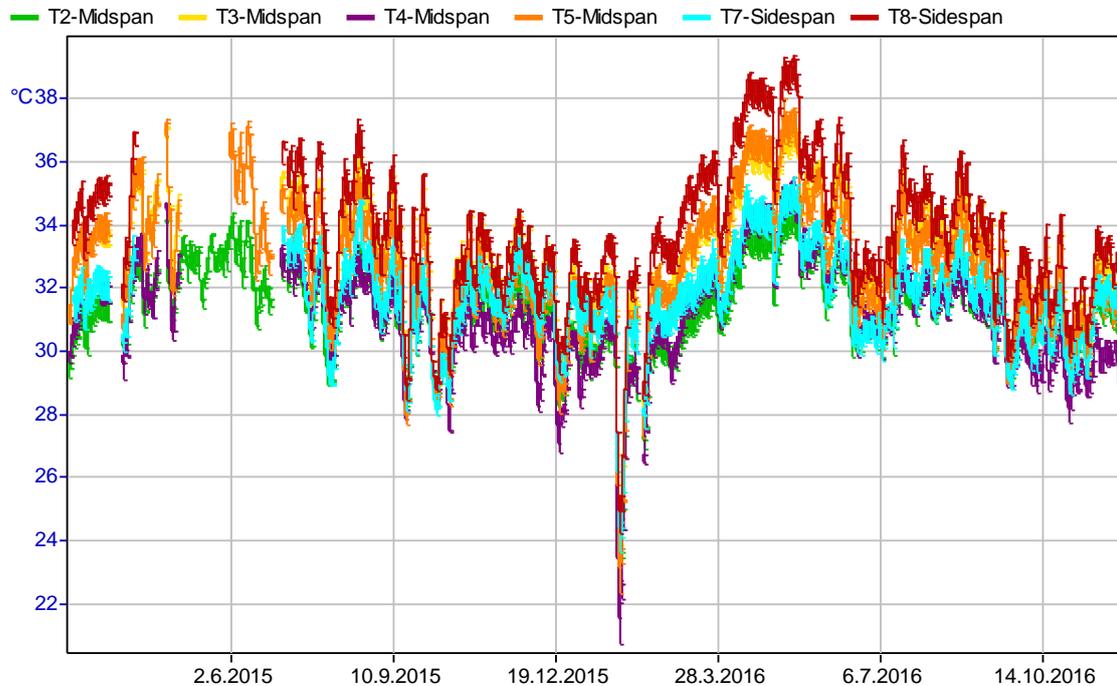


Abbildung 65: Temperaturmessdaten Chao Phraya River Crossing

Tab. 28: Darstellung Mittel-/Minimum-/Maximumwert und Temperaturgradient

	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Mittelwert in °C	6,25	6,50	7,50	7,75	6,00	7,75
Minimum in °C	22,5	24,0	20,5	22,5	23,5	24,0
Maximum in °C	35,0	37,0	35,5	38,0	35,5	39,5
Temperaturgrad. in °C	± 28,75	±30,50	±28,00	±30,25	±29,50	±31,75

Über die gesamte Messdauer zeigt sich jedoch keine große Abweichung der mittleren Temperatur (Gesamtdifferenz ca. 1,75 °C) über alle Temperaturmessstellen.

Auch bei der Brücke Chao Phraya River Crossing wie nachfolgend dargestellt erkennt man genau die Unabhängigkeit der Längenänderung (Weg) zur Temperatur. Die Temperatur in den einzelnen Messquerschnitten unterliegt wiederum Schwankungen. Die Längenänderung des Tragwerks in den Messpunkten ist davon aber nicht beeinflusst bzw. so träge, dass sich solche Temperaturänderungen nicht auf die Lagerwege auswirken und einem durchschnittlichen täglichen Temperaturverlauf folgen.

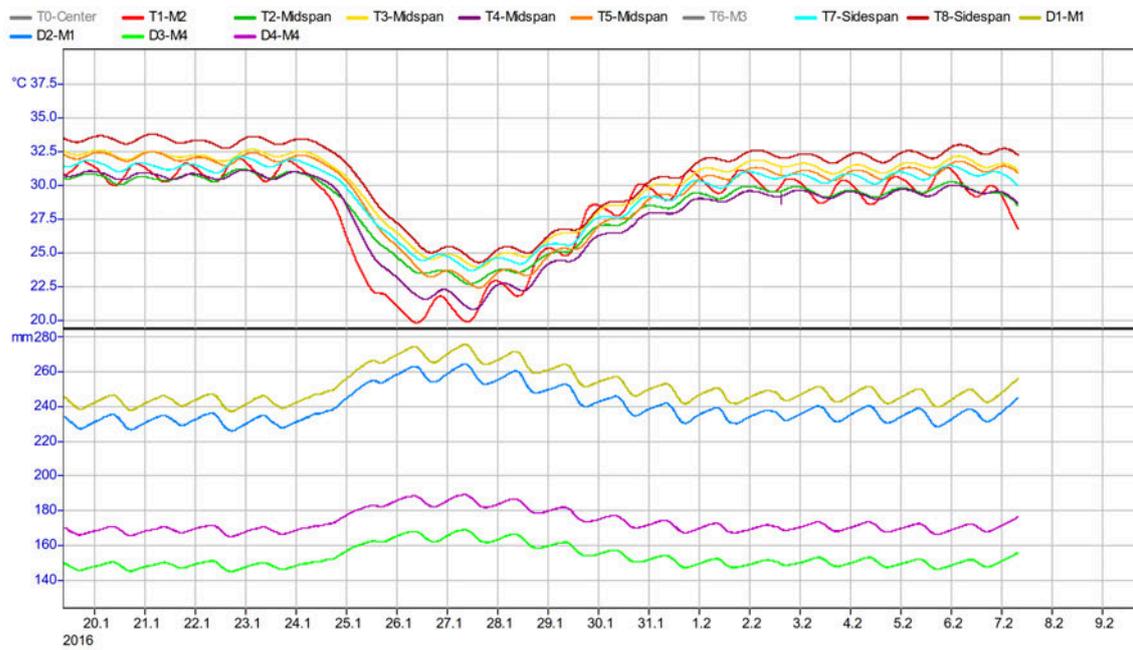


Abbildung 66: Temperaturmessdaten Chao Phraya River Crossing

5 Brückenbauwerk B2309

Bauwerksbeschreibung:	Tragwerkstyp	Integrales Beton-Brückentragwerk
	Anzahl Brückenfelder	5
	Länge	120,84 m

Im Zuge der Instandsetzung der HS Inzersdorf wurde im Knoten Inzersdorf das bestehende Brückenobjekt B2309 abgetragen und als mehrfeldrige integrale Brücke mit einer Gesamtlänge von rund 120 m neu errichtet. Um die Überwachung der Zustandsentwicklungen im Betrieb, die Erfassung von Vergleichswerten für statische Berechnungen und die Aufnahme des Einflusses der Randbedingungen auf das Tragwerk gewährleisten zu können, wurde das Brückenobjekt mit einer messtechnischen Überwachung ausgerüstet.

Die Einzelspannweiten betragen 23,42 m+24,68 m+24,68 m+24,68 m+23,38 m, was zu einer Gesamtlänge von 120,84 m führt. Die Breite von 10,8 m ist während des gesamten Verlaufes konstant.



Abbildung 67: Foto B2309

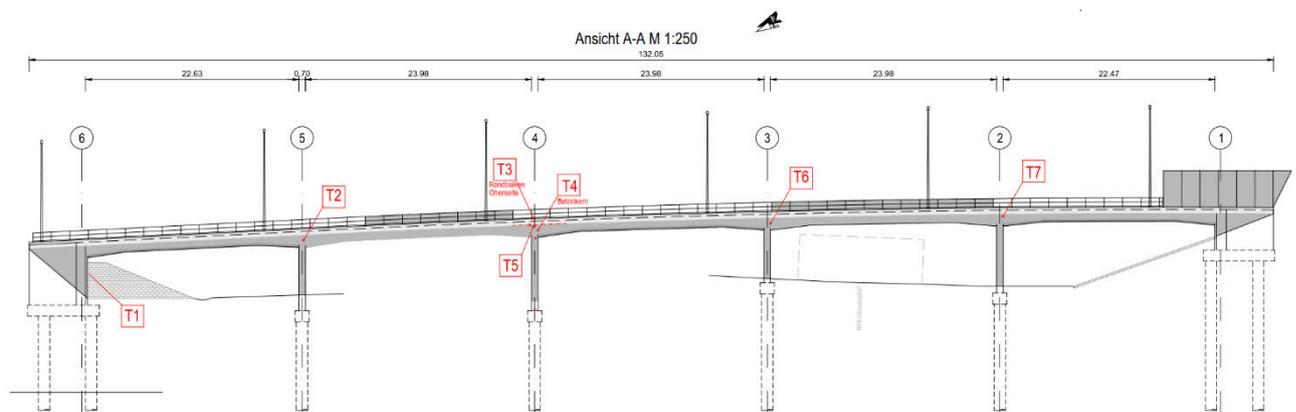
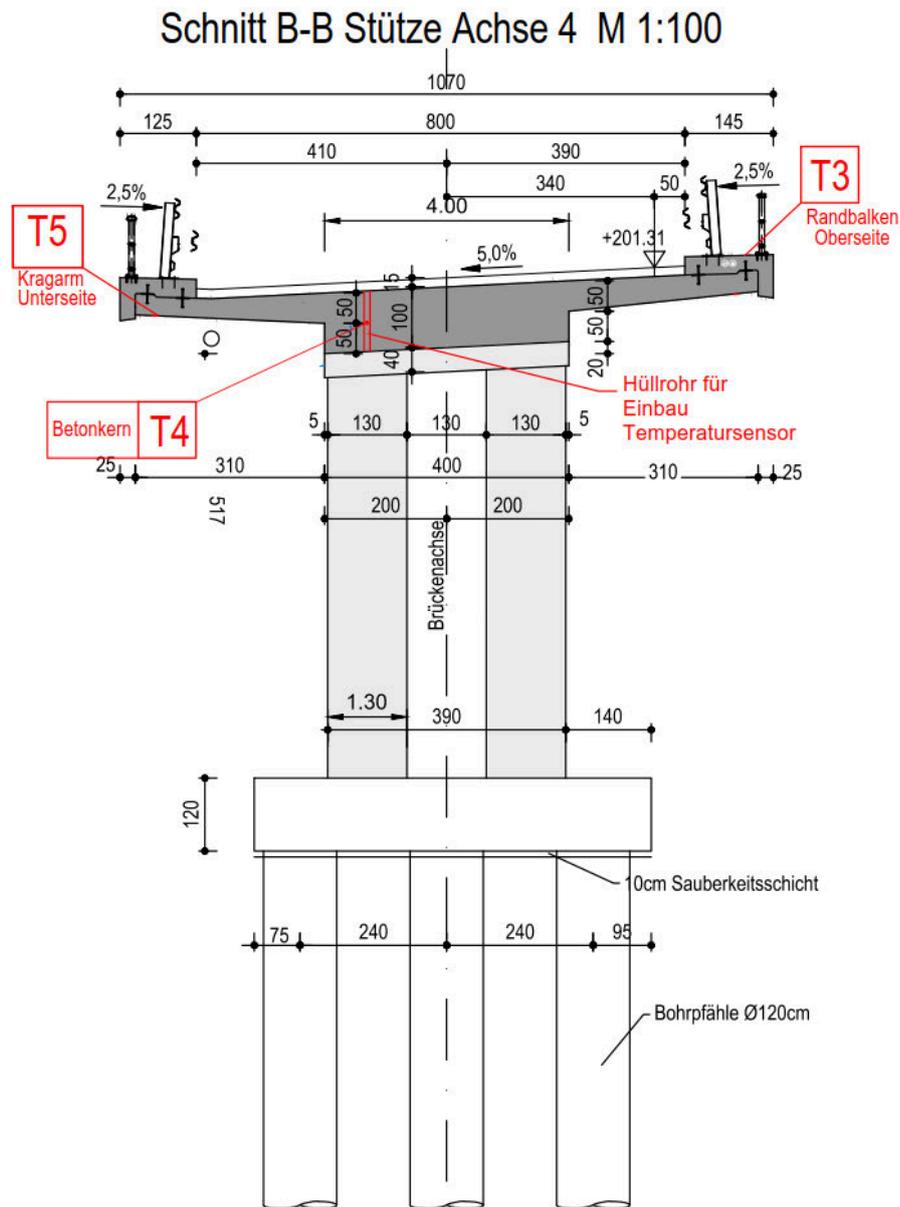


Abbildung 68: Auszug Position Temperatursensoren B2309



Beschreibung Messpositionen:

- T1: Widerlagerbereich Achse 6
- T2: Kragarm Unterseite Achse 5
- T3: Randbalken Oberseite Achse 4
- T4: Betonkern Achse 4
- T5: Kragarm Unterseite Achse 4
- T6: Kragarm Unterseite Achse 3
- T7: Kragarm Unterseite Achse 2

Gemessene Temperaturen:

Die nachfolgende Abbildung behandelt die Tragwerkstemperatur an den angeführten Positionen im Messzeitraum von Juli 2016 – Juni 2017. Die aktuell stärkste Erwärmung erfolgte am 22.06.2017 mit ca. 36,0°C (T3). Die bisher tiefste gemessene Temperatur trat Anfang Januar 2017 in einer starken Kälteperiode auf und betrug knapp -9,5°C unter null (T1).

Der Messverlauf zeigt, dass der Sensor (T3) in Tragwerksachse 3 (Randbalken Oberseite) etwas früher auf Temperaturschwankungen reagiert, da er gegenüber den Umwelteinflüssen exponierter ist. Der Temperaturverlauf der Sensoren (T2, T5, T6, T7) an der Bauteilunterseite bzw. der Temperaturverlauf im Bauteilkern (T4) unterliegt weniger starken Schwankungen.

Die Bauwerkstemperatur ist die wesentliche Grundlage für die Interpretation aller übrigen Messdaten, um zwischen gewöhnlichen (temperaturbedingten) und außergewöhnlichen Veränderungen der Messaufnehmer unterscheiden zu können.

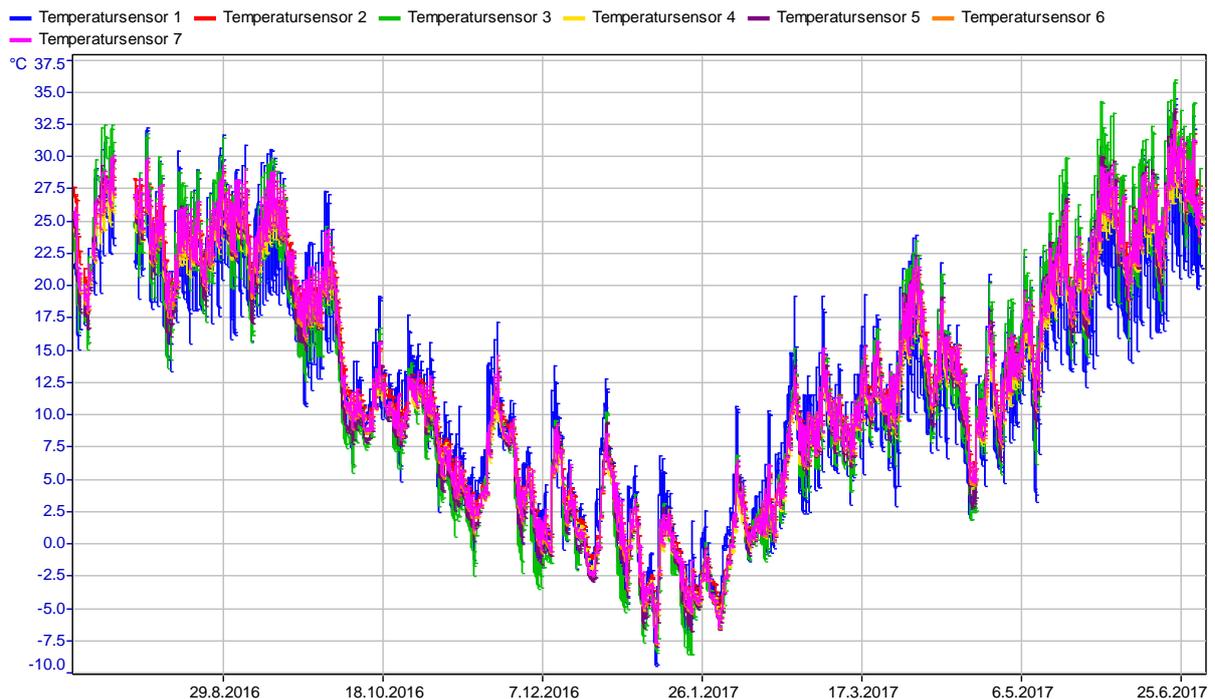


Abbildung 70: Temperaturmessdaten Juli 2016 – Juni 2017

Für den angegebenen Beobachtungszeitraum vom Juni 2016 bis Juli 2017 sind folgende Temperaturwerte der Bauwerkstemperatur (Mittelwert, Minimum, Maximum und Temperaturgradient) bei den einzelnen Temperatursensoren aufgetreten:

Tab. 29: Darstellung Mittel-/Minimum-/Maximumwert und Temperaturgradient

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Mittelwert in °C	12,0	13,5	12,0	12,5	12,5	12,5	13,0
Maximum in °C	34,5	33,0	36,0	32,0	33,5	32,5	33,0
Minimum in °C	-9,5	-6,0	-8,5	-7,0	-8,0	-7,5	-7,5
Temperaturgrad. in °C	± 22,00	± 19,50	± 22,25	± 19,50	± 20,75	± 20,00	± 20,25

Über die gesamte Messdauer zeigt sich jedoch keine große Abweichung der mittleren Temperaturen (Gesamtdifferenz ca. 1,5 °C) über alle Temperaturmessstellen.

6 Hangbrücke Würgau Beton (Würgau, Deutschland)

Die Hangbrücke Würgau Beton wird im Punkt 3 „Ausgewählte Messobjekte“ detailliert beschrieben. Hier soll nun lediglich das Verhalten der Temperaturen im Messquerschnitt und die dazugehörigen Lagerwege dargestellt werden und die zuvor beschriebenen Beispielbrücken in der Aussage der Unabhängigkeit der Anordnung der Temperatursensoren zur Lagerwegaufzeichnung bekräftigen.

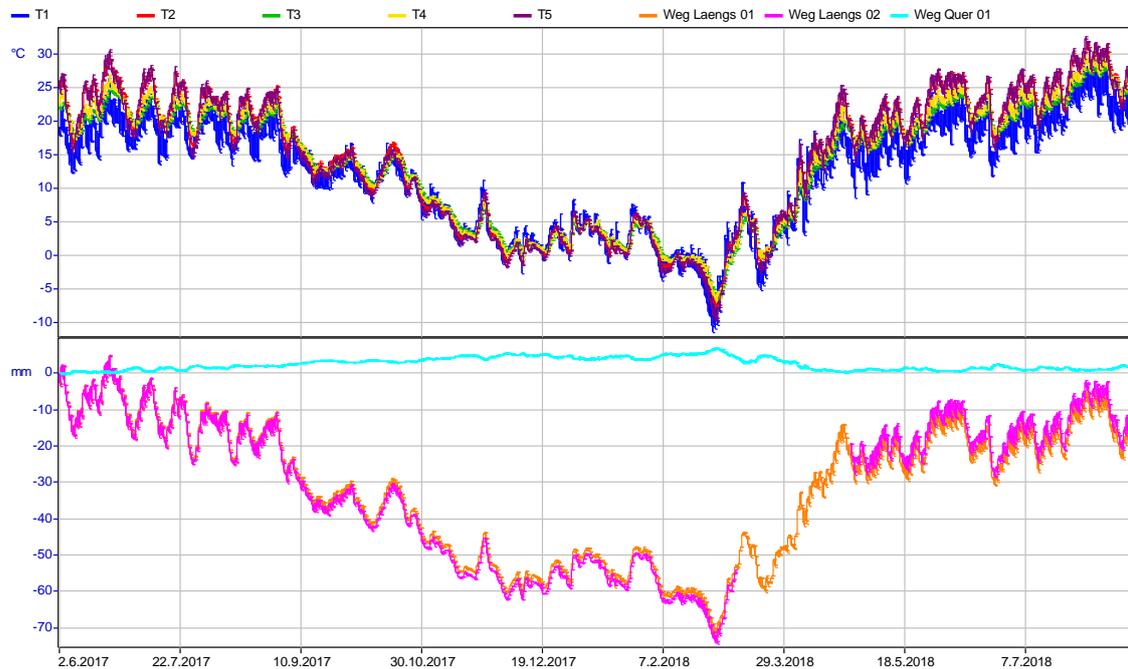


Abbildung 71: 1 – Hangbrücke Würgau Beton– Temperaturverlauf und Längenänderung – 01.06.2017-20.08.2018

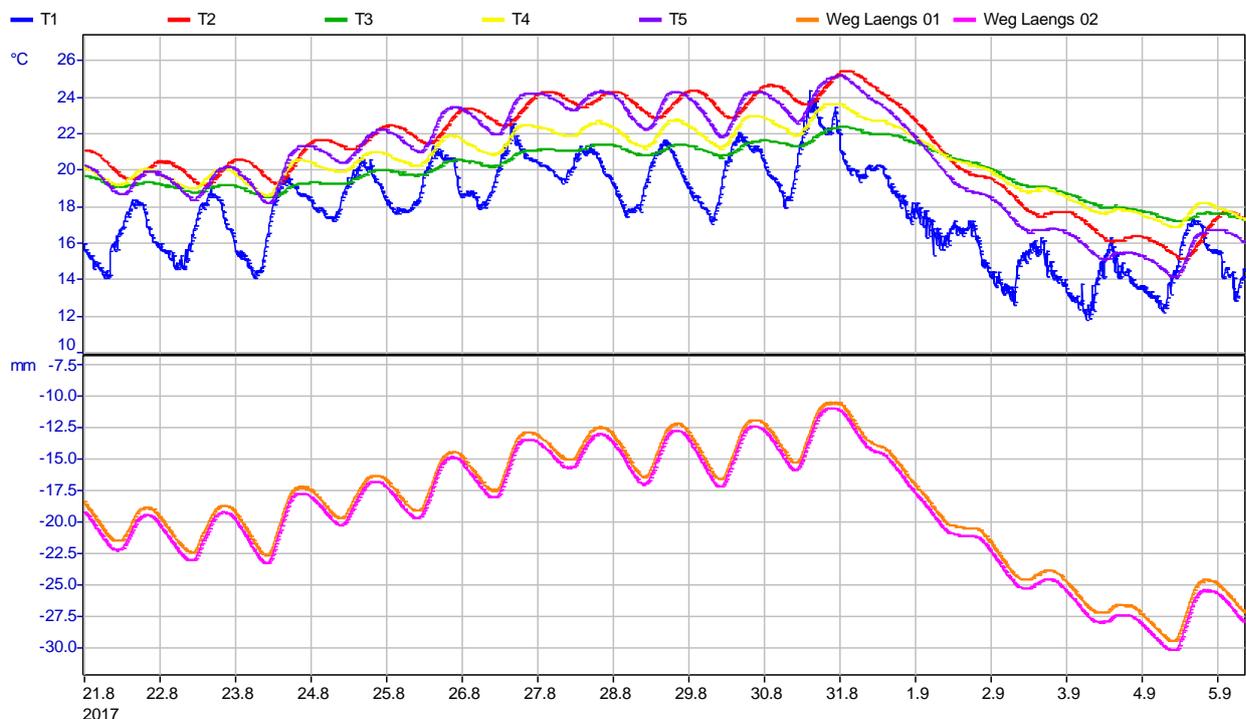


Abbildung 72: 1 – Hangbrücke Würgau Beton – Temperaturverlauf und Längenänderung Detailausschnitt

Anhang 2

Wartungsprotokolle

Unsere Geschäftszahl: 170050.40

Projekt: Monitoringsystem Lagerwege von Brücken



WARTUNGSPROTOKOLL 2017

Bearbeiter:	DI Dr. Alexander Krawtschuk	erstellt am:	06.11.2017
E-Mail:	alexander.krawtschuk@schimetta.at	Tel:	0664/8479950

Wartungsarbeiten 1 – Wartung und Kontrolle Monitoring

Datum:	18.10.2017 – 20.10.2017
Baustellenbesuche am:	19.10.2017
Geplante Leistungserbringung:	Kontrolle Messdaten, Sensorik und Ersetzen aller Batterien an allen 4 instrumentierten Monitoringsystemen
Kontrolle durch:	Doppler Dominic, Schimetta Consult

Um einen reibungslosen Betrieb und eine lückenlose Datenaufzeichnung gewährleisten zu können muss eine regelmäßige Kontrolle und Wartung des Monitoringsystems durchgeführt werden. Dazu wurden im Vorfeld die Daten analysiert und auf Plausibilität und Unstimmigkeiten untersucht. Dabei entstandene Fragen können so vor Ort abgeklärt oder nachgebessert werden. Durch die regelmäßigen Wartungsbesuche können auch drohende Ausfälle frühzeitig erkannt werden und somit in Folge Lücken in den Messdaten vermieden werden. Mögliche Ursachen für Ausfälle können mangelhafte Stromversorgung, Vandalismus, Baustellenbetrieb, Tierverbiss oder auch ein technischer Defekt sein.

Um 08:30 am 19.10.2017 wurde am vereinbarten Treffpunkt bei den Brücken in Würgau der Widerlagerschlüssel der ABDNB von Herrn _____ in Empfang genommen. Diesem wurde das System an einer Brücke beispielhaft kurz gezeigt.

Beim aktuellen Besuch aller 4 Brücken am 19.10.2017 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

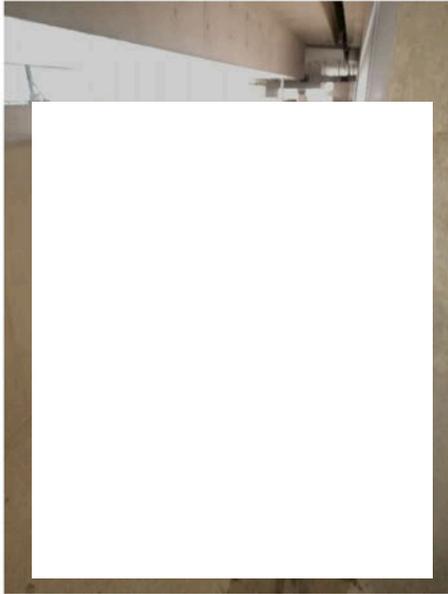
- Sicherung der gespeicherten Messdaten zu Beginn
- Tausch aller eingesetzten Batterien der Messsysteme
- Sichtkontrolle Hardware und Verkabelung
- Reinigen und Pflegen der Wegaufnehmer
- Neustart aller Systeme und anschließender Testlauf

An den 2 Hangbrücken in Würgau wurden zusätzliche Antennen montiert um die Datenübertragung zu vereinfachen und sicherzustellen.

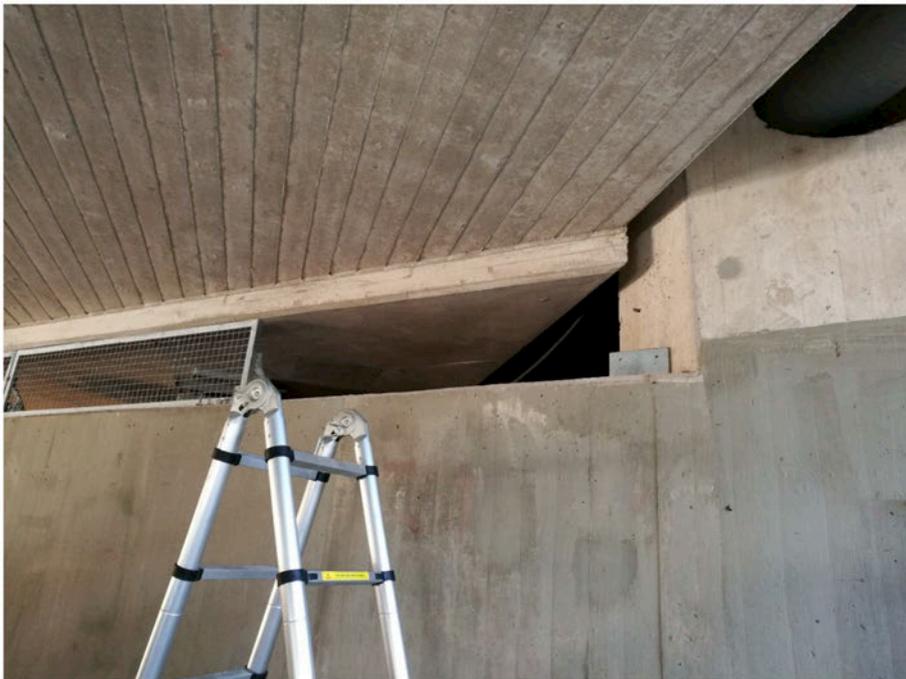
An der Trubbachbrücke in Forchheim war über die versperrte Tür auch nach langen Bemühungen kein Zugang möglich. Die Tür war leichtgängig, der Schlüssel passte ins Schloss, ließ sich aber nicht drehen. Die Ursache liegt möglicherweise an einem ausgetauschten oder defekten Schloss. Nach unzähligen Versuchen wurde später ein Zugang durch demontieren des Gitters zwischen Widerlager und Brücke realisiert. Somit konnten die Wartungsarbeiten trotzdem termingerecht durchgeführt werden. Dabei ist auch aufgefallen, dass _____ im Widerlagerbereich gelagert werden. Das Gitter wurde nach Fertigstellung wieder exakt und ordnungsgemäß rückmontiert.

An der Paradiestabücke wurden bei den Querschnittsmessungen noch Unstimmigkeiten entdeckt. Die Lage wurde vor Ort überprüft und es konnte die Sensorbefestigung, die durch die schwierige Situation im Lagerbereich angewendet werden musste, als nichtzufriedenstellend eingestuft werden. Beim nächsten Wartungsbesuch sollte daher eine Montage des Sensor an anderer Position mit detaillierter vorgefertigter Sensorhalterung angedacht werden, damit die gemessenen Werte als plausibel verifiziert werden können. Dafür wäre eine sicherere Herstellung der Zugänglichkeit zu den Lagern, als die an den Fotos erkennbare Leiter von großem Vorteil.

Fotos:



E-Bike im Widerlagerbereich Trubbachbrücke



Zugänglichkeit Trubbachbrücke über Türe nicht möglich



Zugänglichkeit Paradiestalbrücke

Erforderliche Korrekturen:

- Zugänglichkeit Trubbachbrücke Widerlagerbereich
- Herstellen besserer Zugänglichkeit Paradiestalbrücke
- Herstellen Sensorbefestigung Querweg Paradiestalbrücke

Korrektur bis:

nächste Wartung Frühjahr 2018

Auftragnehmer

Wien, 19.10.2017

Ort, Datum

Unsere Geschäftszahl: 170050.40

Projekt: Monitoringsystem Lagerwege von Brücken



WARTUNGSPROTOKOLL 2018_1

Bearbeiter:	DI Dr. Alexander Krawtschuk	erstellt am:	15.05.2017
E-Mail:	alexander.krawtschuk@schimetta.at	Tel:	0664/8479950

Wartungsarbeiten 2 – Wartung und Kontrolle Monitoring									
Datum:	25.04.2018 – 27.04.2018								
Baustellenbesuche am:	25.04.2018 – 27.04.2018								
Geplante Leistungserbringung:	Kontrolle Messdaten, Ersetzen defekter Wegaufnehmer, Sensorik und Ersetzen aller Batterien an allen 4 instrumentierten Monitoringsystemen								
Kontrolle durch:	Doppler Dominic, Schimetta Consult								
<p>Um einen reibungslosen Betrieb und eine lückenlose Datenaufzeichnung gewährleisten zu können muss eine regelmäßige Kontrolle und Wartung des Monitoringsystems durchgeführt werden. Dazu wurden im Vorfeld die Daten analysiert und auf Plausibilität und Unstimmigkeiten untersucht. Dabei entstandene Fragen können so vor Ort abgeklärt oder nachgebessert werden. Durch die regelmäßigen Wartungsbesuche können auch drohende Ausfälle frühzeitig erkannt werden und somit in Folge Lücken in den Messdaten vermieden werden. Mögliche Ursachen für Ausfälle können mangelhafte Stromversorgung, Vandalismus, Baustellenbetrieb, Tierverschiss oder auch ein technischer Defekt sein.</p> <p>In der Datenaufzeichnungen zur Hangbrücke Würzgau (Betonbrücke) wurden bei einem Wegaufnehmer (laut Plan siehe unten Wegaufnehmer „W längs 1.2.2“) Mitte März 2018 fehlerhafte Aufzeichnungen, bei der ständigen visuellen Kontrolle der Messdaten, wahrgenommen. In Abstimmung mit unserem Projektpartner Maurer und Söhne wurde eine erste handnahe Kontrolle des Sensors Vorort durchgeführt. Diese Kontrolle hat gezeigt, dass es sich um kein lösbares Problem handelt, da der Sensor komplett funktionstüchtig aussah und auch alle Kabelanschlüsse in Ordnung waren. Aufgrund dieser ersten Erkenntnisse wurde ein neuer Wegaufnehmer gleicher Bauart bestellt und ein Wechsel des Wegaufnehmers organisiert.</p>									
<table border="1"> <tr> <td> <p>Schimetta Consult ZT GmbH Arnoldstraße 89, 1120 Wien e-Mail: wien@schimetta.at</p> </td> <td> <p>Maurer SE Frankfurter Ring 193, 80807 München e-Mail: info@maurer.eu</p> </td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Lagerwege - 1 - 400m</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Hangbrücke Würzgau, A70</td> </tr> <tr> <td>A70 bei Würzgau</td> <td>14.06.2017</td> </tr> </table>		<p>Schimetta Consult ZT GmbH Arnoldstraße 89, 1120 Wien e-Mail: wien@schimetta.at</p>	<p>Maurer SE Frankfurter Ring 193, 80807 München e-Mail: info@maurer.eu</p>	Lagerwege - 1 - 400m		Hangbrücke Würzgau, A70		A70 bei Würzgau	14.06.2017
<p>Schimetta Consult ZT GmbH Arnoldstraße 89, 1120 Wien e-Mail: wien@schimetta.at</p>	<p>Maurer SE Frankfurter Ring 193, 80807 München e-Mail: info@maurer.eu</p>								
Lagerwege - 1 - 400m									
Hangbrücke Würzgau, A70									
A70 bei Würzgau	14.06.2017								
Plandarstellung defekter Wegaufnehmer „W längs 1.2.2“									



Defekter Wegaufnehmer „W längs 1.2.2“ Hangbrücke Würgau

Beim aktuellen Besuch aller 4 Brücken von 25.04. bis 27.04.2018 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Austausch defekter Wegaufnehmer „W längs 1.2.2“ Hanbrücke Würgau
- Tausch aller eingesetzten Batterien der Messsysteme
- Sichtkontrolle Hardware und Verkabelung
- Reinigen und Pflegen der Wegaufnehmer
- Neustart aller Systeme und anschließender Testlauf

Die Wartungsarbeiten an den vier Brücken konnten ohne Probleme durchgeführt werden.

Fotos:



Neuer Wegaufnehmer „W längs 1.2.2“ Hangbrücke Würgau



Widerlagerbereich Hangbrücke Würgau Stahlverbund



Widerlagerbereich Trubbachbrücke



Widerlagerbereich Paradiestälbrücke

Erforderliche Korrekturen:

- Keine

Auftragnehmer

Wien, 15.05.2018

Ort, Datum

Anhang 3

Messdaten

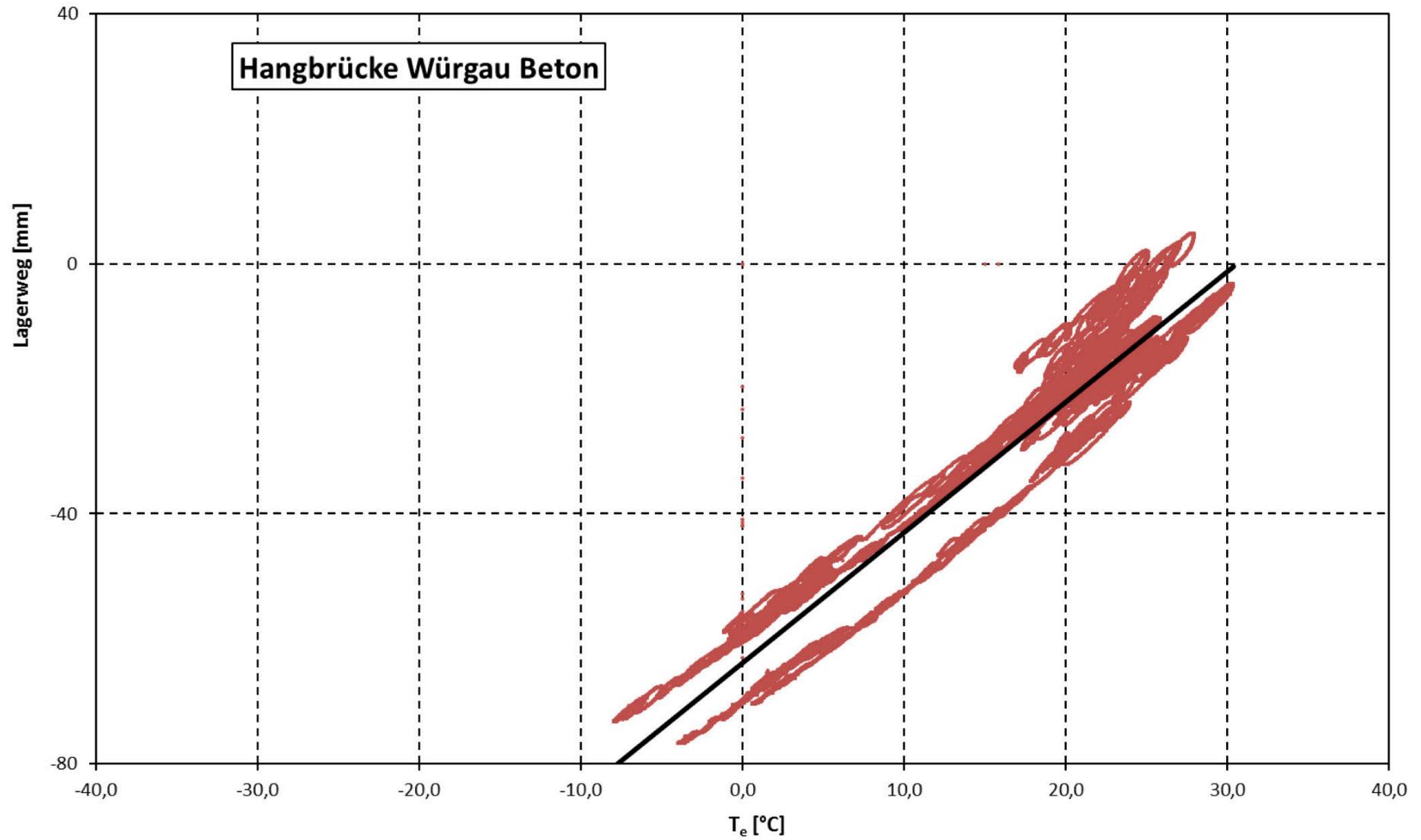


Abbildung 73: Hangbrücke Würgau Beton – Lagerweg/Temperatur-Beziehung – 01.06.2017-27.01.2019

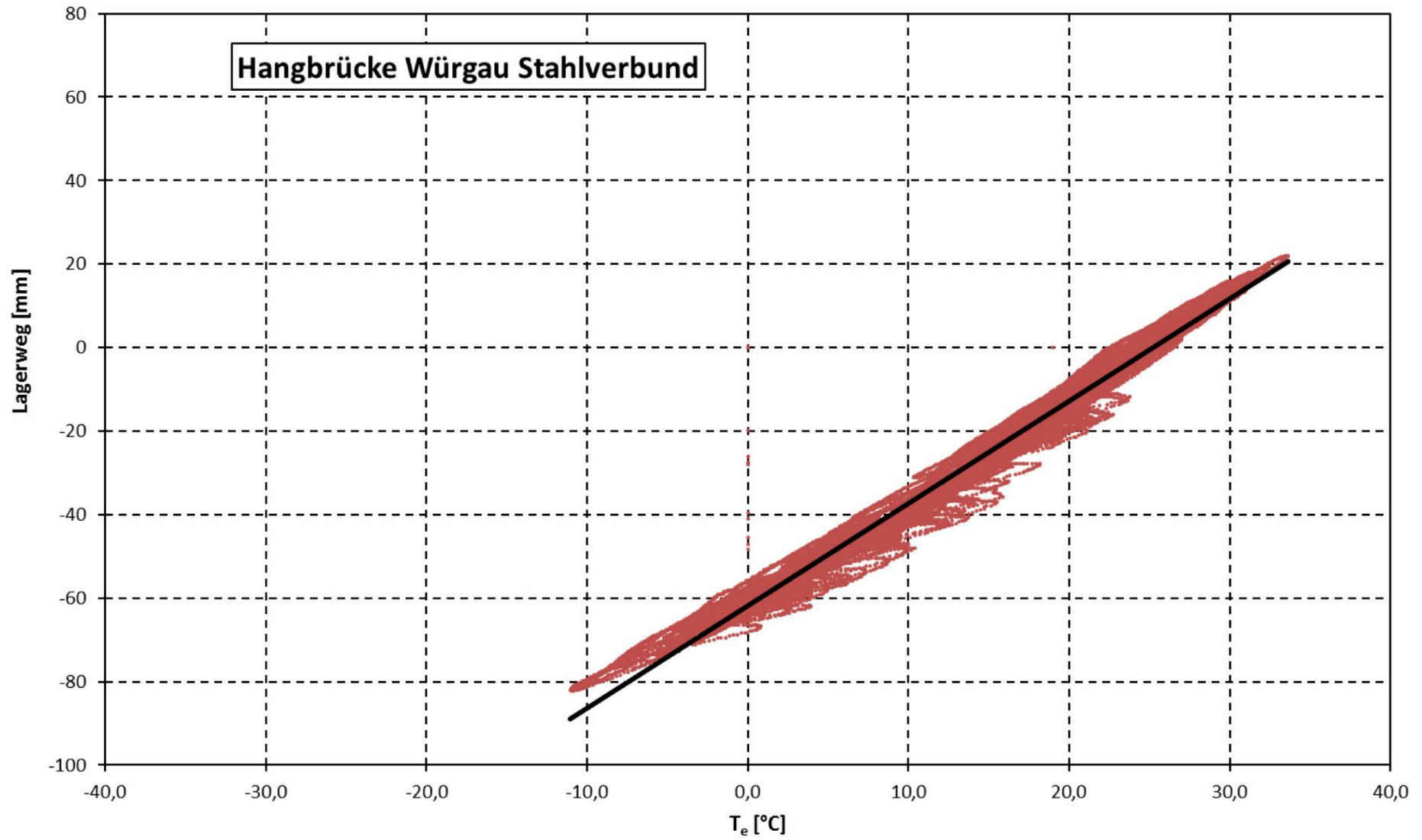


Abbildung 74: Hangbrücke Würgau Stahlverbund – Lagerweg/Temperatur-Beziehung - 01.06.2017-27.01.2019

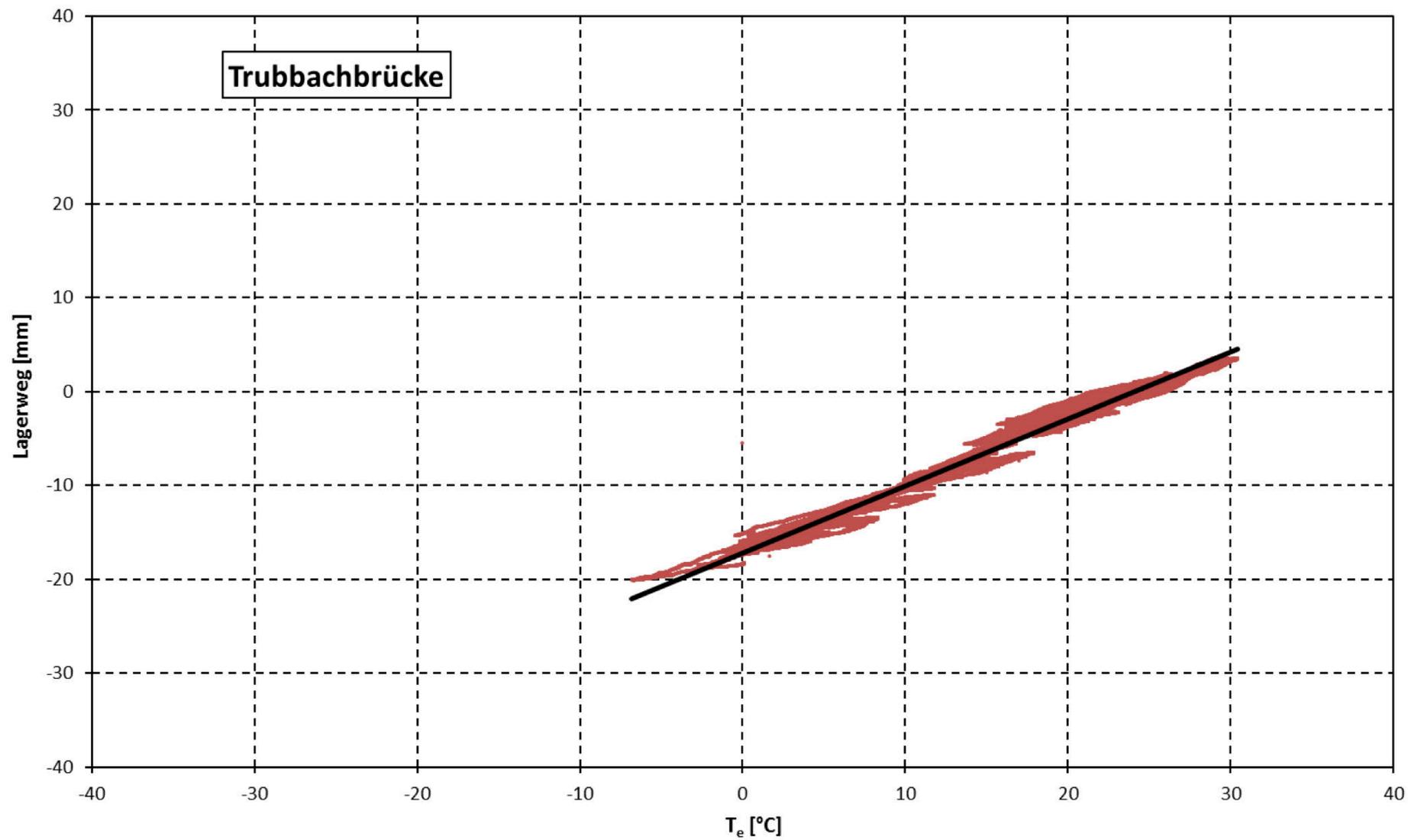


Abbildung 75: Trubbachbrücke – Lagerweg/Temperatur-Beziehung – 01.06.2017-27.01.2019

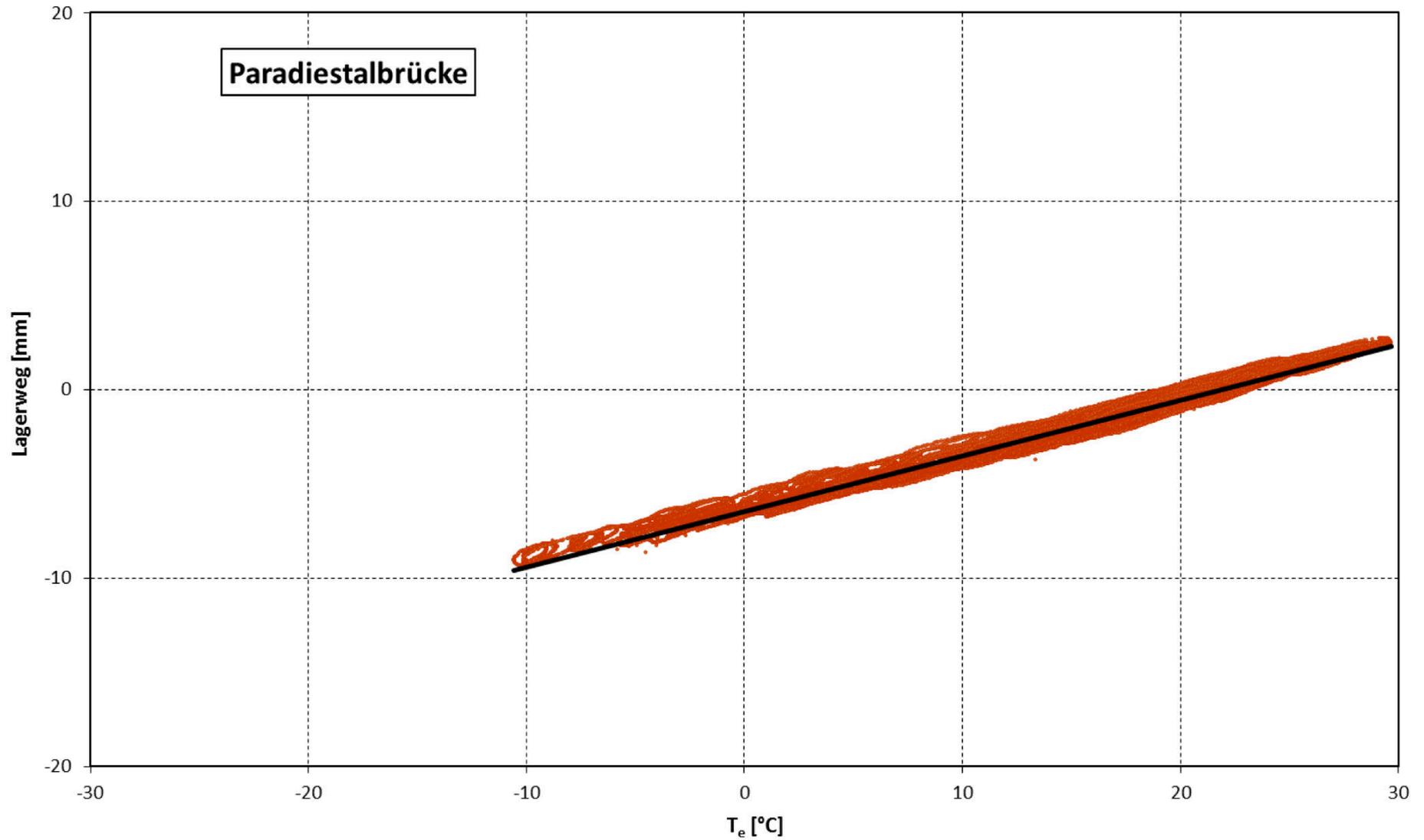


Abbildung 76: Paradiestabücke – Lagerweg/Temperatur-Beziehung – 01.06.2017-27.01.2019

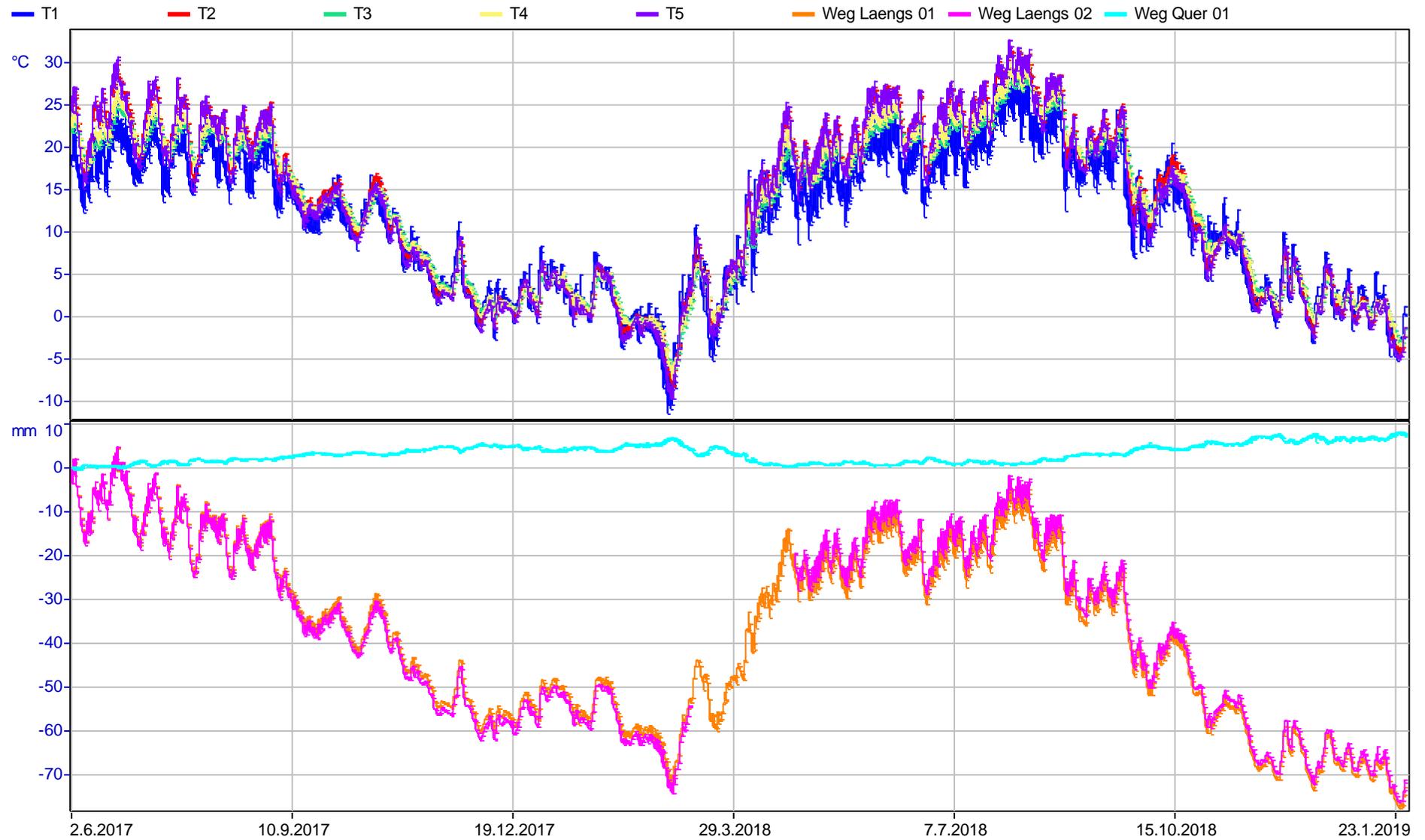


Abbildung 77: Hangbrücke Würgau Beton – Temperaturverlauf und Längenänderung – 01.06.2017-27.01.2019

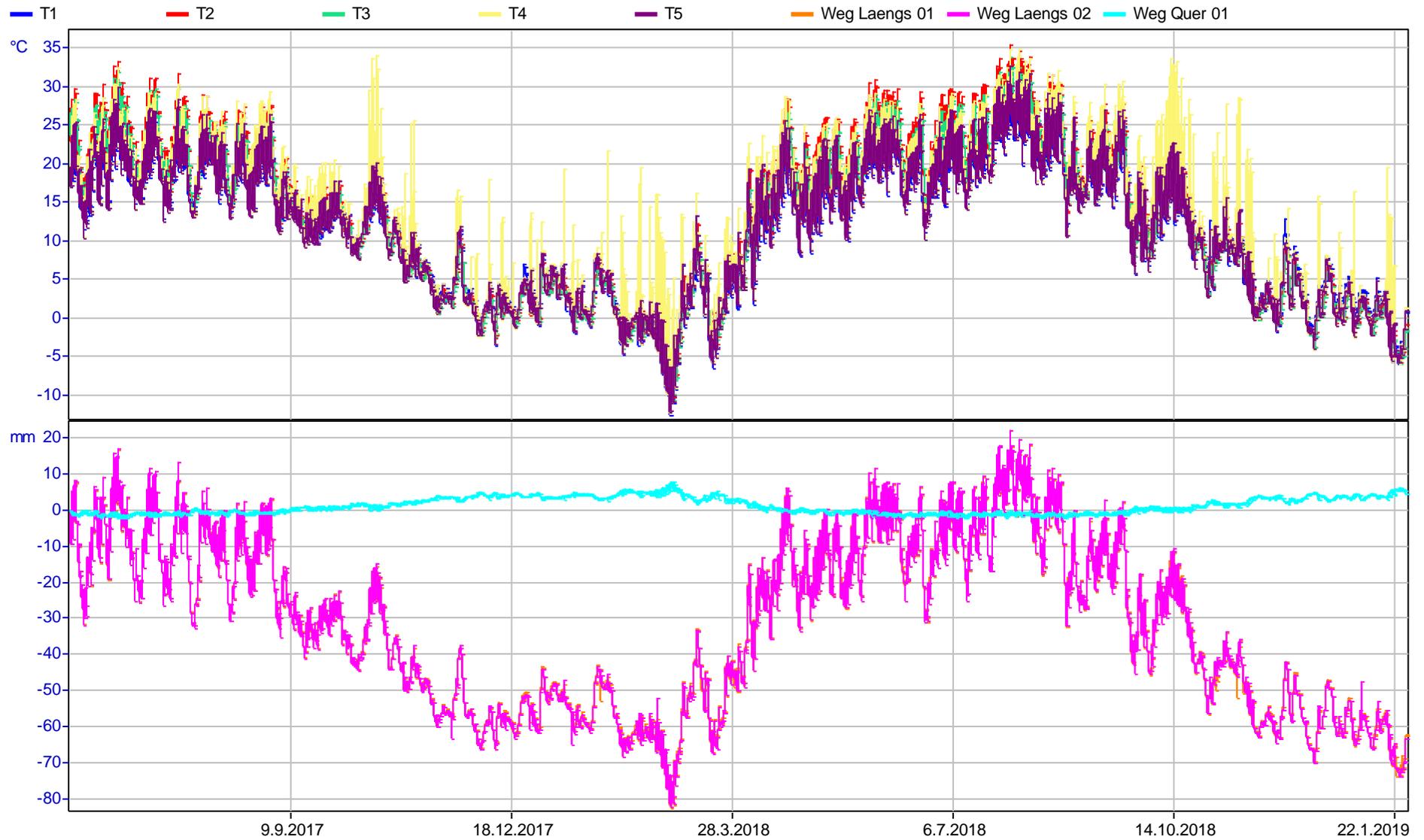


Abbildung 78: Hangbrücke Würgau Stahlverbund – Temperaturverlauf und Längenänderung – 01.06.2017-27.01.2019

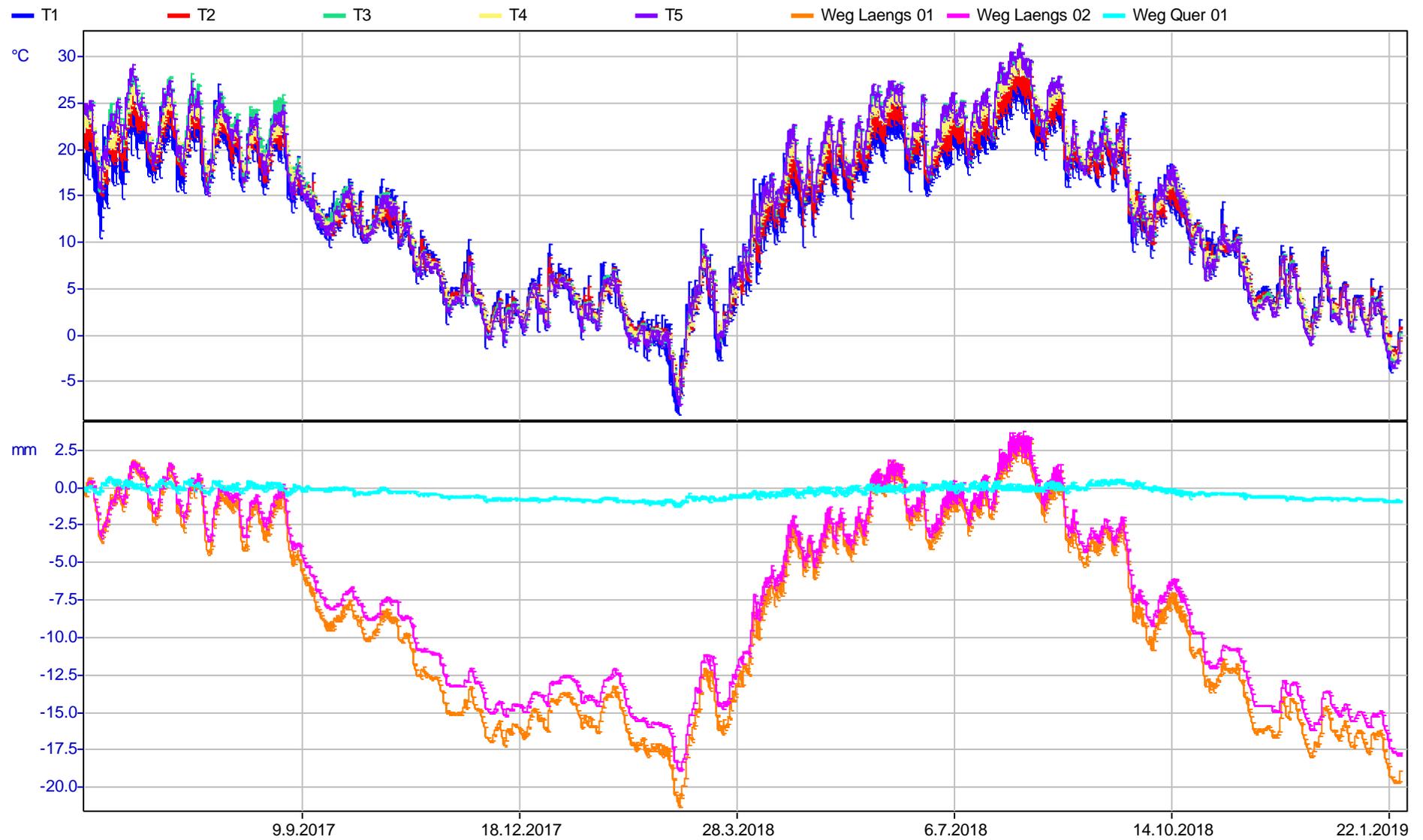


Abbildung 79: Trubbachbrücke – Temperaturverlauf und Längenänderung – 01.06.2017-27.01.2019

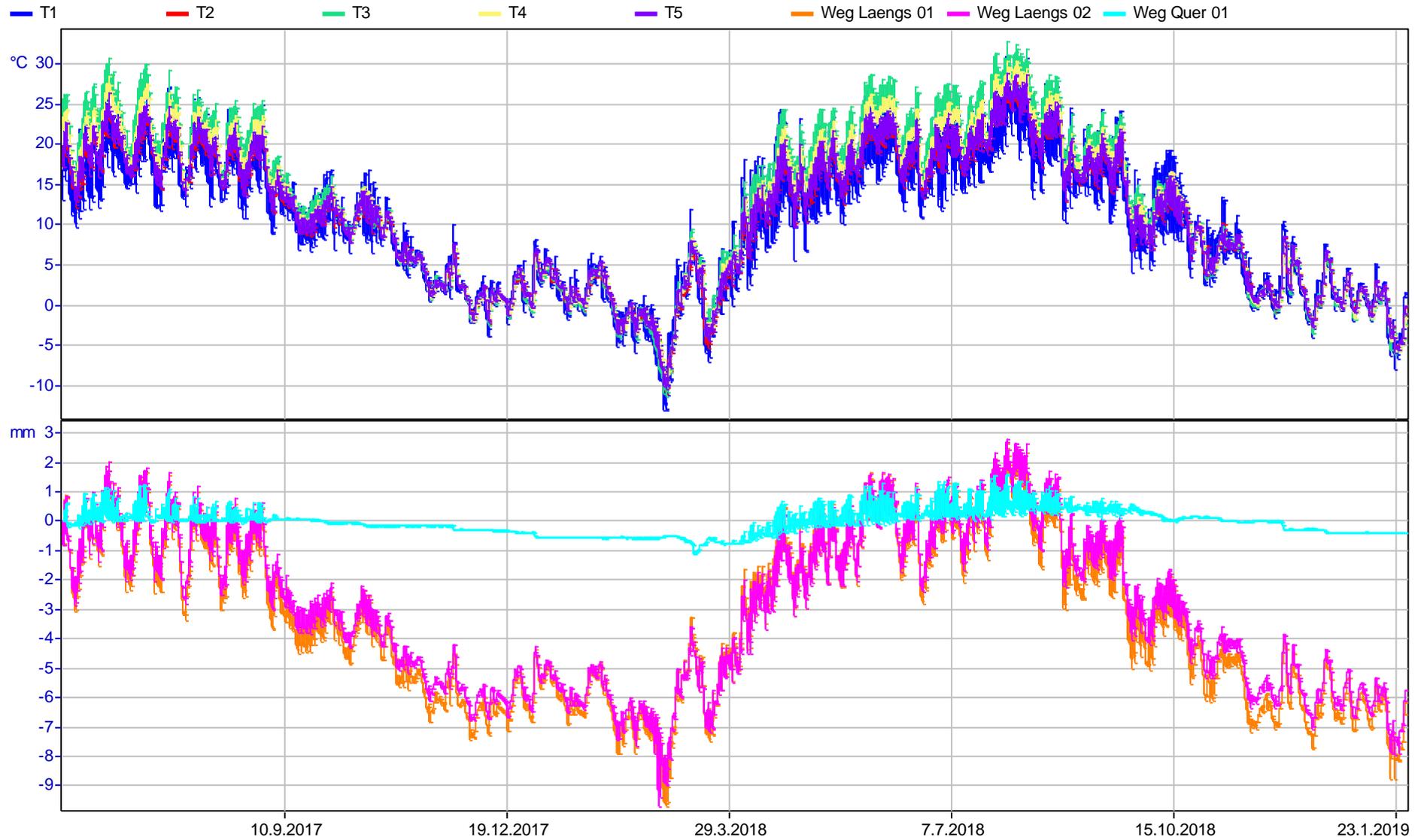


Abbildung 80: Paradieststalbrücke – Temperaturverlauf und Längenänderung – 02.06.2017-27.01.2019

Anhang 4

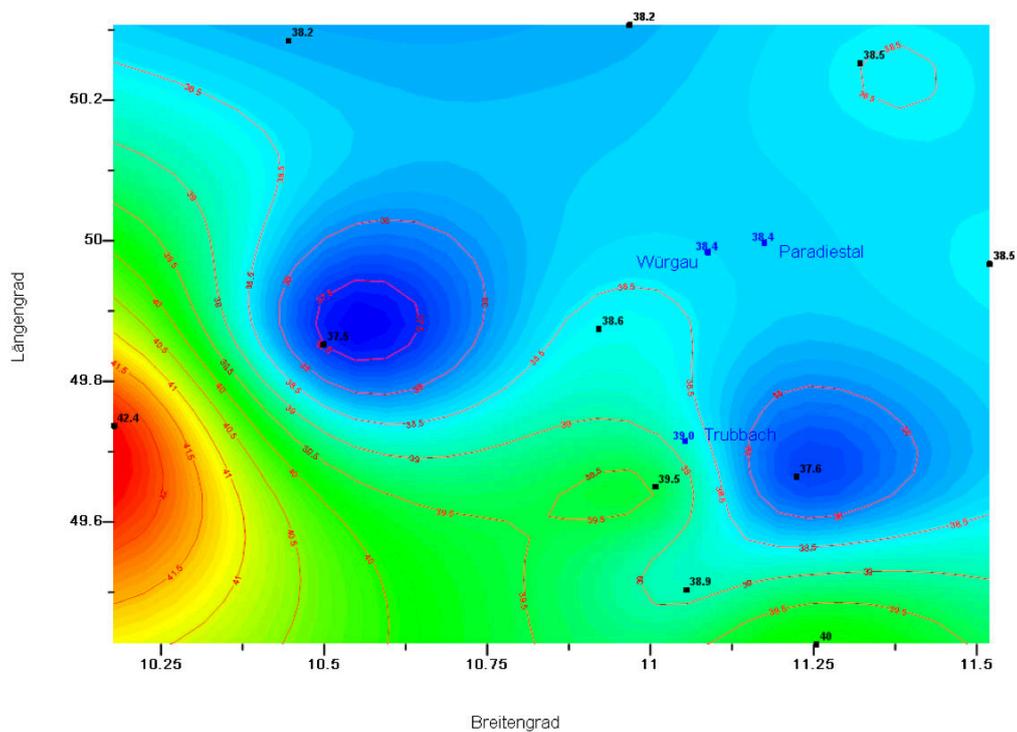
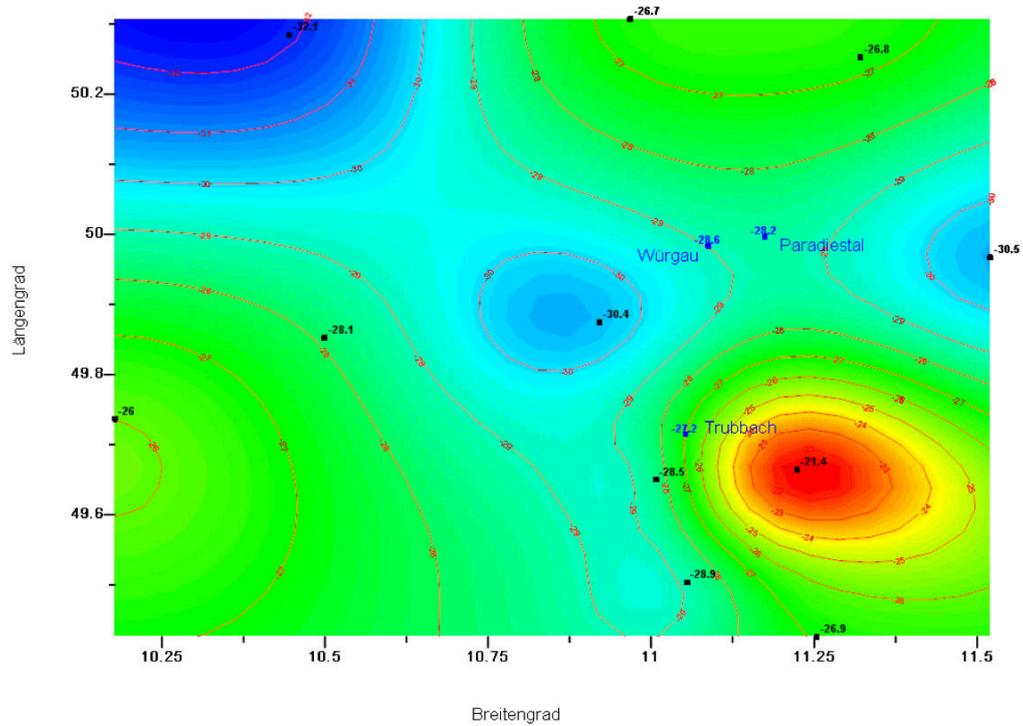
Temperaturdaten aus ausgewählten Wetterstationen in Bayern

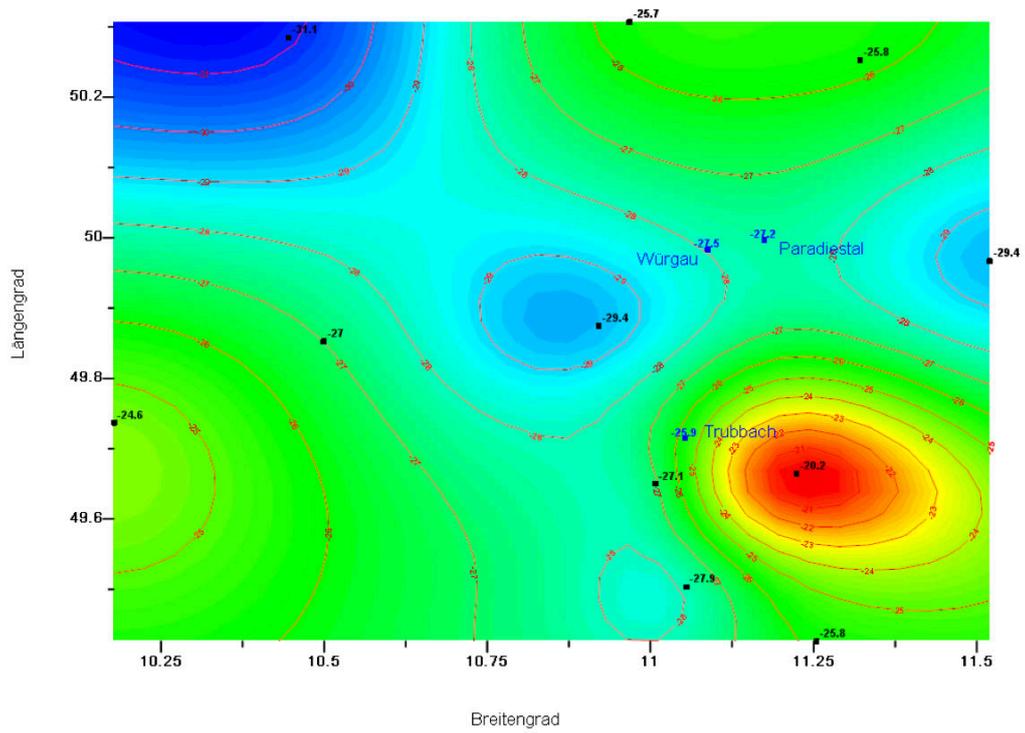
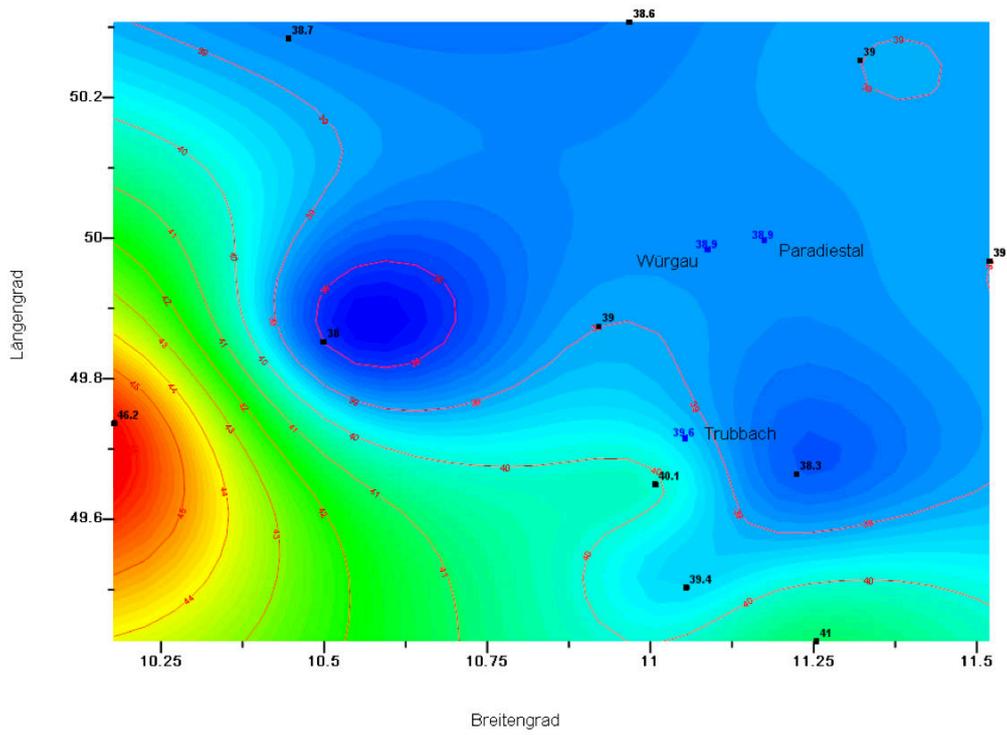
Tab. 30: Liste der Wetterstationen mit Ortsangabe sowie Zeitraum und Anzahl der Jahresextremwerte

Station	Ort	Breiten-grad	Längen-grad	Beginn	Ende	Anzahl	$T_{\max,98\%,c}$	$\Delta T_{\max,98\%}$	$T_{\max,98\%,g}$	$T_{\min,98\%,c}$	$\Delta T_{\min,98\%}$	$T_{\min,98\%,g}$
284	Bamberg (Sternwarte)	10,880	49,880	1879	1958	80	38,5	1,9	38,1	-30,6	4,5	-29,8
3666	Nürnberg-Buchenbühl	11,107	49,5008	1947	1974	28	39,9	3,7	39,0	-30,0	7,2	-28,2
2780	Kulmbach	11,4494	50,1003	1960	1982	23	37,4	3,2	36,3	-30,0	7,1	-27,4
5434	Weismain	11,2364	50,0858	1951	1992	42	38,2	2,7	37,6	-29,8	5,2	-28,5
3565	Neustadt/Aisch	10,6001	49,5728	1947	2002	56	43,0	4,2	39,6	-29,6	4,9	-28,7
4621	Schweinfurt-Gartenstadt	10,216	50,0575	1958	2003	46	38,9	2,3	38,3	-25,4	4,6	-24,3
1689	Gößweinstein	11,3061	49,7656	1937	2004	68	40,0	3,2	37,7	-30,1	4,2	-29,0
2268	Hofheim	10,5156	50,1352	1949	2006	57	39,1	2,4	38,5	-29,0	4,7	-28,1
5185	Uttenreuth	11,0704	49,5933	1971	2006	36	43,8	5,1	40,4	-29,5	6,0	-28,1
4752	Sonneberg-Neufang	11,1828	50,3746	1951	2008	58	38,2	3,4	35,9	-24,2	3,8	-23,6
282	Bamberg	10,9206	49,8742	1960	2018	59	39,0	2,0	38,6	-30,4	5,0	-29,4
320	Heinersreuth-Vollhof	11,5197	49,9667	1947	2018	72	39,0	2,0	38,5	-30,5	4,3	-29,4
867	Lautertal-Oberlauter	10,968	50,3067	1947	2018	72	38,6	2,0	38,2	-26,7	3,7	-25,7
1107	Ebrach	10,499	49,852	1963	2018	56	38,0	2,0	37,5	-28,1	4,4	-27,0
1279	Möhrendorf-Kleinseebach	11,0074	49,6497	1949	2018	69	40,1	2,3	39,5	-28,5	4,5	-27,1
1721	Gräfenberg-Kasberg	11,2239	49,664	1991	2018	28	38,3	3,2	37,6	-21,4	4,4	-20,2
2600	Kitzingen	10,1781	49,7363	1982	2018	37	46,2	5,3	42,4	-26,0	5,9	-24,6
2680	Königshofen, Bad	10,4456	50,284	1951	2018	68	38,7	2,0	38,2	-32,1	5,0	-31,1
2750	Kronach	11,3209	50,2523	1949	2018	69	39,0	2,1	38,5	-26,8	3,6	-25,8
3667	Nürnberg-Netzstahl	11,2538	49,4258	1975	2018	44	41,0	3,3	40,0	-26,9	4,6	-25,8
3668	Nürnberg	11,0549	49,503	1955	2018	64	39,4	2,1	38,9	-28,9	4,6	-27,9

Tab. 31: Auswertung der Wetterdaten je Brücke

Brücke	Breiten- grad	Längen- grad	$T_{\max,98\%,c}$ [°C]	$T_{\max,98\%,g}$ [°C]	$T_{\min,98\%,c}$ [°C]	$T_{\min,98\%,g}$ [°C]
Würgau	11,087593	49,983136	38,9	38,4	-28,6	-27,5
Trubbach	11,052781	49,714536	39,6	39,0	-27,2	-25,9
Paradiestal	11,174292	49,996341	38,9	38,4	-28,2	-27,2





Statistische Verteilungen:

