

Prof. Dr.-Ing. I. Mangerig, Dr.-Ing. C. Zapfe, Universität der Bundeswehr München

Methoden zum zielgerichteten Einbau der Lager von Kanalbrücken

1. Einführung

Als Schnittstelle zwischen dem Brückenüberbau und den Unterbauten werden im Regelfall Brückenlager zur Weiterleitung der Lasten aus dem Konstruktionseigengewicht und den veränderlichen Beanspruchungen aus Verkehr, Temperatur und Windeinwirkung, sowie zur zwängungsfreien Kompensation relativer Verschiebungen und Verdrehungen angeordnet. Verdrehungen und horizontale Verschiebungen resultieren neben den veränderlichen Einwirkungen aus Verkehr und Wind in ausgeprägtem Maß aus klimatischen Temperatureinwirkungen. Diese sind sowohl von saisonalen Eigenschaften als auch von Einflüssen im Verlauf eines Tages abhängig.

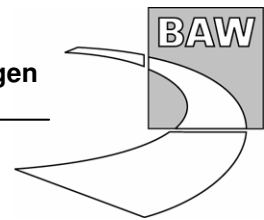
Der Einbau bzw. der Zeitpunkt der Aktivierung eines Brückenlagers ist dabei stets unter Berücksichtigung der Temperaturverteilung vorzunehmen. Den klimatisch bedingten Verformungsgrößen wird durch die Lagervoreinstellung Rechnung getragen, indem das Lager gegenüber der neutralen Position um definierte Größen ausgelenkt wird. Differenzgrößen gegenüber mittleren Bedingungen werden im Regelfall rechnerisch anhand von Temperaturmessungen ermittelt.

Neben den thermischen Verformungseigenschaften kommt bei einer statisch unbestimmten Lagerung auch den temperaturbedingten Zwängungen eine besondere Bedeutung zu, da klimatische Einwirkungen im Tagesverlauf zu Umlagerungen der Auflagerkräfte und der Ausbildung von Zwängungen führen. Dieser Aspekt gewinnt umso mehr an Bedeutung, je mehr Lager in einer Lagerachse angeordnet sind und je geringer deren gegenseitiger Abstand ist, da das Zwängungsmoment bei gleichen Stützweiten nur von der Biegesteifigkeit, nicht aber vom Abstand der Lager abhängig ist. Demnach entstehen gerade bei kleinen Lagerabständen große Querkräfte, die der vertikalen Auflast im neutralen Temperaturzustand überlagert sind. Sollten diese größer sein, als die vertikale Auflast aus ständigen Lasten können theoretisch negative Lagerkräfte mit der möglichen Konsequenz abhebender Lager nicht ausgeschlossen werden. Im Hinblick auf den Lagereinbau und die zuverlässige Einstellung der planmäßigen Lagerkräfte sollte dieser Aspekt berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass der Lagereinbau in einem Zustand mit einem annähernd ausgeglichenen Temperaturfeld erfolgen muss, sofern eine hinreichend sichere Temperaturverteilung nicht bekannt ist.

Als typisches Beispiel für eine Brückenkategorie mit meist zahlreichen Lagern in einer Lagerachse lassen sich Kanalbrücken anführen. Bedingt durch die Bauwerksbreite, die vordergründig durch die erforderliche Breite der Fahrrinne vorgegeben wird, und die hohen abzutragenden Vertikallasten aus der Wasserfüllung resultieren im Regelfall kleine Lagerabstände, bei denen noch wirtschaftliche Lagerabmessungen erzielt werden können.

2. Klimatische Temperatureinwirkungen

Aufgrund meteorologischer Einflüsse bilden sich in Bauwerken, die natürlichen klimatischen Verhältnissen ausgesetzt sind, instationäre und nichtlinear begrenzte Temperaturverteilun-



gen aus. Zu diesen Temperaturverteilungen würden affine Dehnungen entstehen, wären die Ausdehnungsmöglichkeiten der einzelnen Fasern in den Querschnitten voneinander unabhängig. Wegen der Gültigkeit der Bernoulli'schen Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte kann sich jedoch nur eine linear begrenzte Dehnungsverteilung innerhalb des Querschnittes einstellen, was notwendigerweise auf die Existenz von Eigenspannungen führt. Die aus der Integration der linear begrenzten Dehnungen über das Tragwerk resultierenden Verformungen verursachen bei zwängungsfrei gelagerten Tragwerken Verformungen und bei statisch unbestimmten Systemen Zwangsbeanspruchungen.

Bei komplexen Tragstrukturen, die nicht in Normen geregelt sind, müssen die Berechnungsvorgaben zur Modellierung der Temperaturbeanspruchungen erheblich erweitert werden.

Bild 1 gibt einen Überblick über die Reaktionen, die dann durch Ersatztemperaturfelder abzudecken sind. Überträgt man die Zusammenhänge klimatischer Temperaturbeanspruchungen auf Kanalbrücken, so wird deutlich, dass weder die Querschnitts- und Systemkontur, noch die Forderungen nach teilweiser zwängungsfreier Lagerung mit den Vorgaben für Straßenbrücken übereinstimmen. Bei Anwendung der für Straßenbrücken entwickelten Kenngrößen auf Kanalbrücken können deshalb keine zielgerechten Berechnungsergebnisse zur klimatischen Temperaturbeanspruchung erwartet werden.

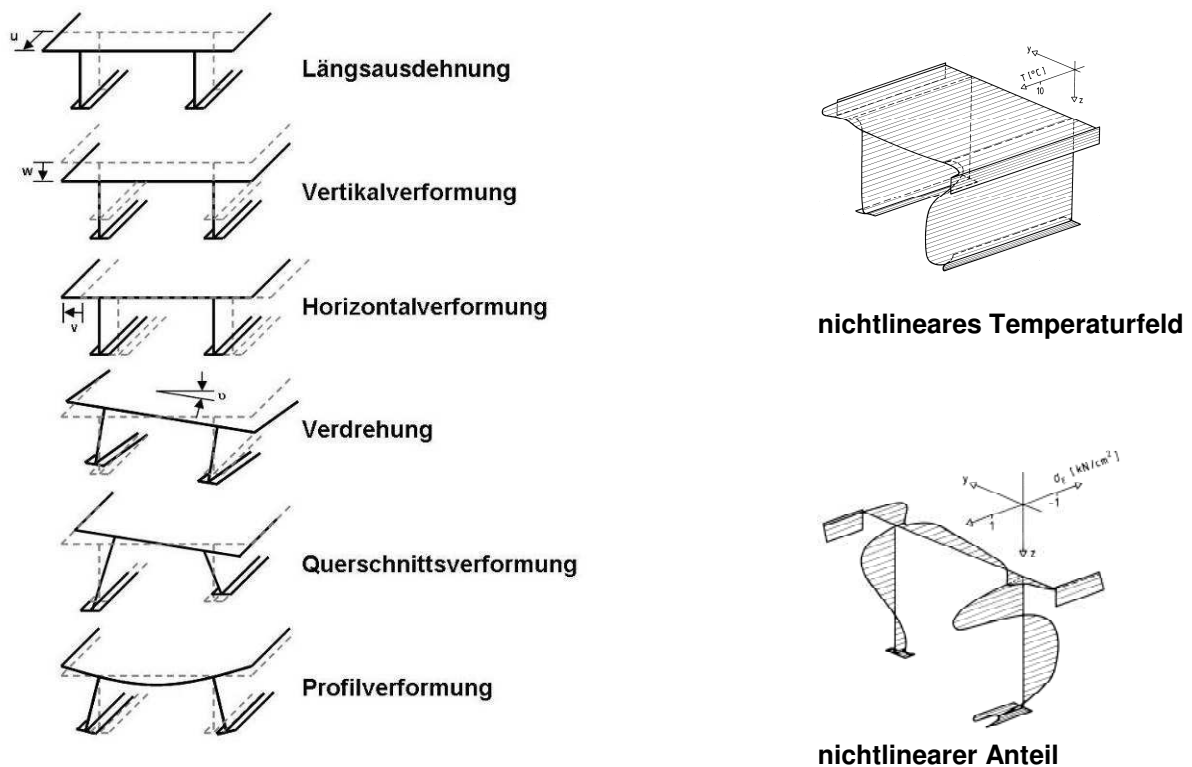
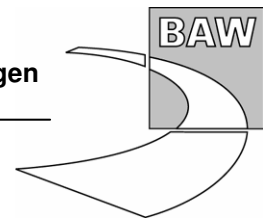


Bild 1 Allgemeine Tragwerksreaktionen infolge klimatischer Temperaturbeanspruchung in Brückenquerschnitten



Entgegen der Annahme einer linear veränderlichen Temperaturverteilung über den Gesamtquerschnitt stellen sich in Brückenquerschnitten instationäre und nichtlineare Temperaturfelder ein. In den von direkter Sonneneinstrahlung beschienenen Querschnittselementen sind wesentlich höhere Temperaturen als in den verschatteten Querschnittselementen zu erwarten. Die Temperaturverteilungen sind von der Tageszeit und von der Jahreszeit abhängig. Permanent wechselnde klimatische Verhältnisse haben instationäre Temperaturverteilungen mit entsprechenden Verformungen zur Folge, so dass beim Lagereinbau keine ideale Konstruktion zu Verfügung steht, sondern die Lagereinstellungen an einem - dem jeweiligen Temperaturzustand entsprechend – verformten Tragwerk vorgenommen wird. Da die verschiedenen Lager selten unter gleichen Temperaturbedingungen eingebaut werden können, ist davon auszugehen, dass dem Tragwerk bei einer abschnittswisen Einlagerung ein zusätzlicher Zwängungszustand überlagert wird.

In Brückentragwerken mit hohen Längs- und Quersteifigkeiten wird sich dieser Zwängungszustand stärker auswirken als in relativ weichen Konstruktionen. Zusätzlich verstärkt wird dieser Effekt durch eine enge Stützung mit mehreren Lagern in Brückenquerrichtung. Die hohen Lasteinwirkungen von Kanalbrücken erfordern eine Auflagerung in relativ engen Abständen bei gleichzeitig hohen Längs- und Querbiegesteifigkeiten. Außerdem sind die Temperaturbeanspruchungen dieser Brückentypen selten umfassend bekannt, so dass eine Planung der Brückeneinlagerung nur unvollkommen möglich ist. Die erreichten Temperaturen werden von den meteorologischen Randwerten wie dem Tagesgang der Sonneneinstrahlung, der Ganglinie der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit bestimmt. Neben diesen Hauptanteilen sind zusätzliche Effekte wie die Luftfeuchtigkeit, die Topologie und die Brückenorientierung zu berücksichtigen. Das Bauwerk steht über die Oberflächen mit der Umgebung in thermischem Kontakt. Über Konvektion und Strahlung werden Wärmeströme ausgetauscht. Bild 2 gibt einen Überblick zu den meteorologischen Randbedingungen.

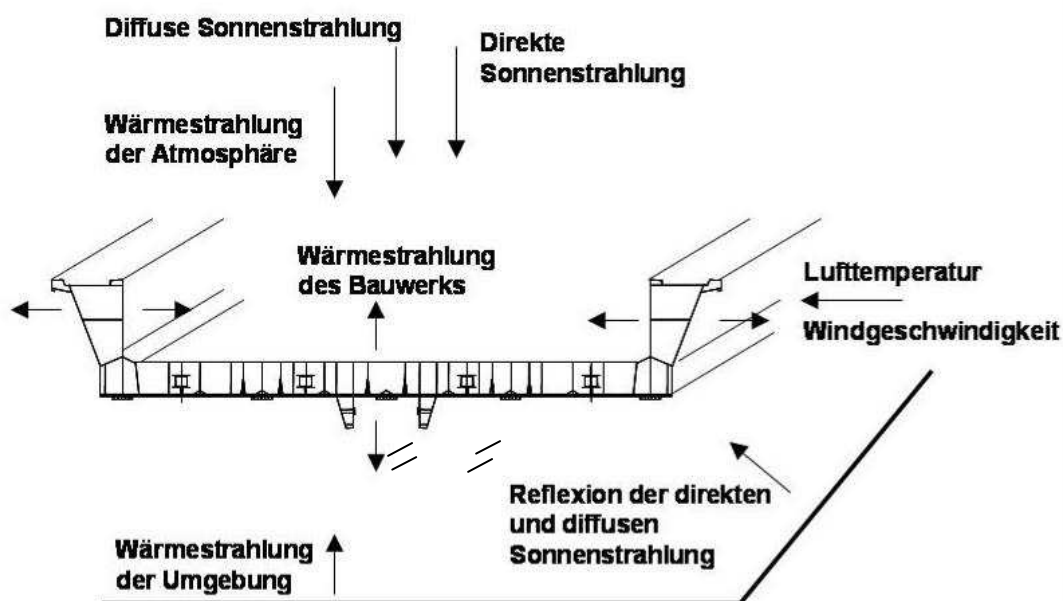


Bild 2 Meteorologische Randbedingungen

Die baupraktische Relevanz der Fragestellung nach einer zuverlässigen Erfassung der Temperaturverteilung ist schematisch in **Bild 3** skizziert. Die vertikalen, aber auch die horizontalen Lagerkräfte sind analog zur instationären Charakteristik der nichtlinearen Temperaturverteilung über den Tagesverlauf veränderlich. Gegenüber der Auflagerkraft unter neutralen Temperaturbedingungen sind über den Tagesverlauf Abweichungen zu beachten, deren Vorzeichen zum einen von der Ausprägung des Temperaturfelds und zum anderen von der Lage im Bauwerk abhängig ist. Bei der Einstellung der Lagerkräfte ist demnach zu beachten, dass bei der Wahl einer unter thermischen Gesichtspunkten ungünstigen Uhrzeit ein Verformungszustand „eingefroren“ wird, der im temperaturneutralen Zustand Differenzkräfte zur Folge hat. Aus Gleichgewichtsgründen kompensieren sich negative und positive Differenzkräfte zu jedem beliebigen Zeitpunkt. Das bedeutet, dass die minimale Auflast aus der maßgebenden Einwirkungskombination ungewollt unterschritten werden kann. Dieser Effekt kann bei Konstellationen, die eine starke Ausprägung der Zwängungen begünstigen, bis hin zu abhebenden Lagerreaktionen führen. Daher sind bei unter der betrachteten Fragestellung empfindlichen Bauwerken die Temperaturentwicklung zu überwachen und die Einbauzeitpunkte sorgfältig festzulegen.

In **Bild 3** sind zur Erläuterung dieses Zusammenhangs drei thermische Konstellationen beim Lagereinbau skizziert. Wenn entsprechend Teilbild a die Lagerkräfte in einem annähernd ausgeglichenen Temperaturfeld eingestellt werden, bewirken die klimatischen Zwängungen in einer Situation, die sich für den Trogboden durch die das Merkmal $T_o > T_u$ charakterisieren lässt, eine Umlagerung der Lagerkräfte von den inneren Lagern zu den äußeren Lagern. Dabei sind negative Lagerreaktionen bei den inneren Lagern möglich.

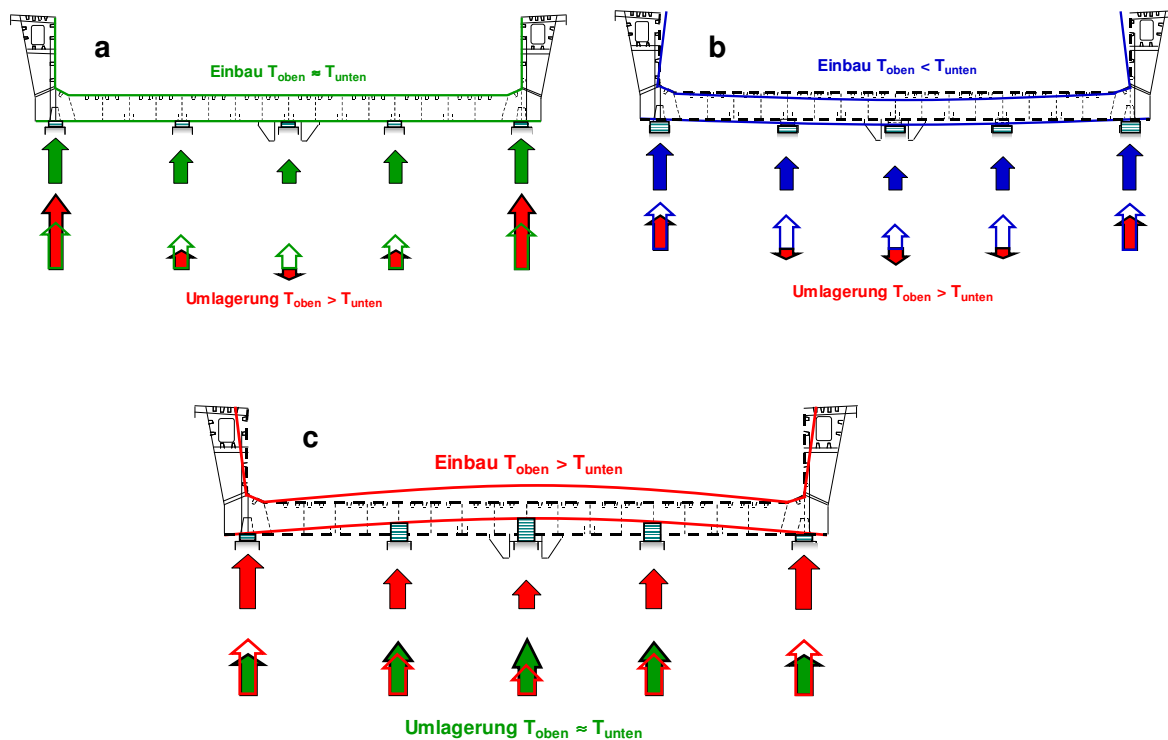
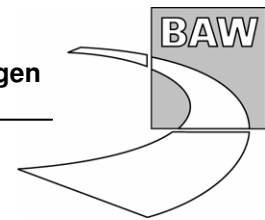


Bild 3 Schematische Darstellung der Lagerkraftverteilung und der klimatisch bedingten Umlagerung der Auflagerkräfte



Erfolgt die Einstellung der Lager in der Konstellation „Oberseite kälter als Unterseite“, sind bereits im ausgeglichenen Temperaturzustand abhebende Lagerreaktionen möglich, und sind im Zustand „Oberseite wärmer als Unterseite“ als wahrscheinlich zu betrachten. Dieser Fall ist bei einem benetzten Trogboden, z.B. durch Niederschlag, oder beim Lagereinbau in den Nachtstunden denkbar.

Wird die Einstellung der Lagerkräfte gemäß Teilbild c in einer Konfiguration mit wärmerer Oberseite vorgenommen ($T_o > T_u$), bewirkt dies bei einem ausgeglichenen Temperaturfeld eine Umlagerung der Kräfte zu den inneren Lagern. Auch wenn aus dieser Erläuterung der Eindruck entstehen könnte, dass es günstig ist, die Lagerkräfte in einem thermisch verformten Zustand einzubringen, ist dazu anzumerken, dass dann eine unbekannte Verteilung der Lagerkräfte entsteht, die kaum zu beherrschen ist. Aus diesen Überlegungen resultiert die Forderung, dass die Temperaturen messtechnisch zu erfassen sind. Sollte eine Kompensation negativer Auflagerkräfte aus klimatischer Einwirkung erforderlich sein, kann dies durch Einbau von Rückverankerungen oder eine gezielte Voreinstellung der Kräfte unter Berücksichtigung der zu erwartenden thermischen Umlagerungen erfolgen.

Beim Lagereinbau an den Kanalbrücken am Wasserstraßenkreuz Magdeburg (Bild 4) wurde der Lagereinbau auf Grundlage einer permanenten Messung der Temperaturen in ausgewählten Querschnitten gesteuert und überwacht.

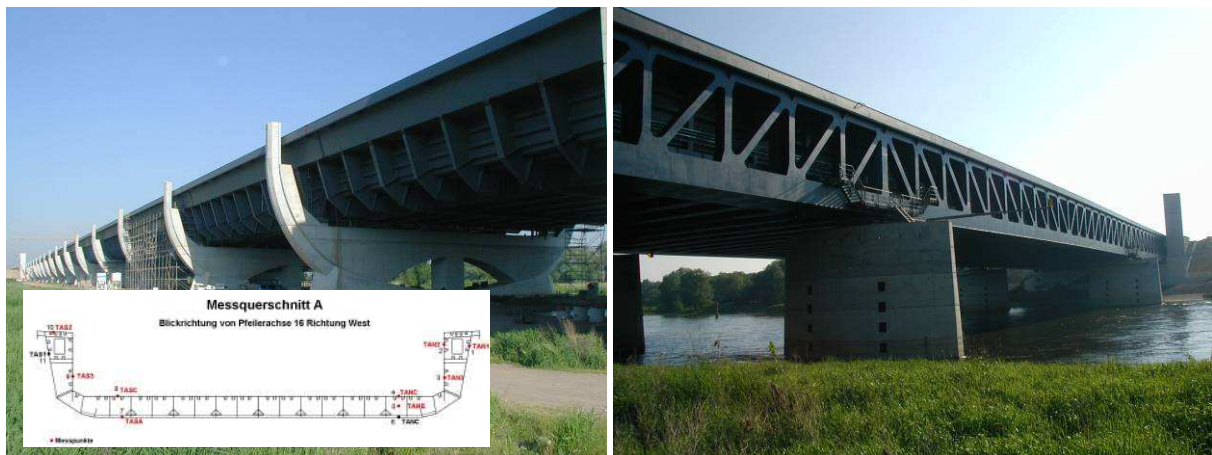


Bild 4 Ansichten der Vorland- und Strombrücke Magdeburg

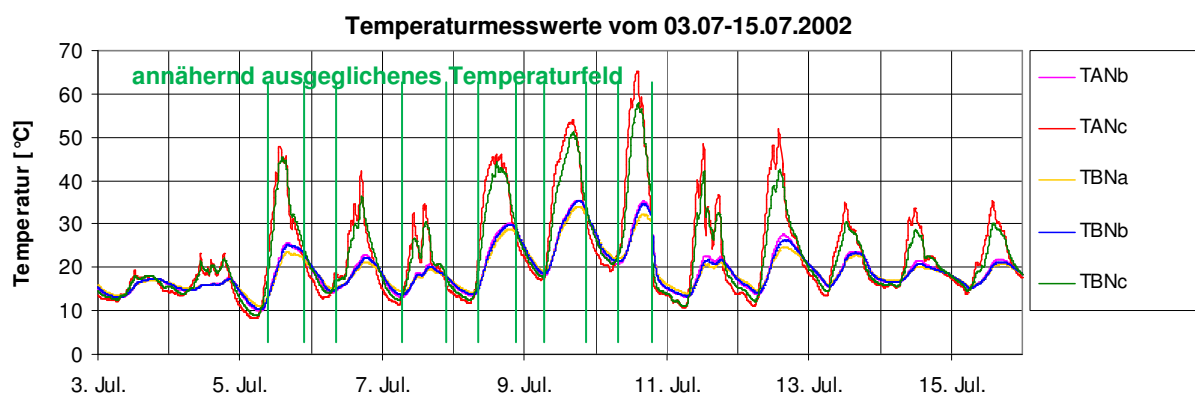
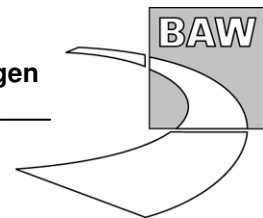


Bild 5 Temperaturmesskurven an der Vorlandbrücke Magdeburg



In **Bild 5** sind exemplarisch Temperaturmesskurven während der Bauphase der Vorlandbrücke aufgetragen. Im Tagesverlauf weisen die direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzten Temperaturmessfühler deutlich höhere Werte, als die Messpunkte in verschatteten Bereichen. In den Nachstunden kehrt sich dieser Effekt, wenn auch in abgeschwächter Ausprägung, um. Daraus resultieren im Tagesverlauf zwei für die Lagerjustierung geeignete Zeitpunkte mit annähernd ausgeglichenem Temperaturfeld. Diese sind in **Bild 5** an ausgewählten Tagen in grüner Signatur eingetragen. Am Beispiel der Vorlandbrücke zeigte sich, dass in den Morgenstunden der Zeitraum mit annähernd neutralem Temperaturfeld sehr kurz ist und die Maximaltemperaturen sonnenbeschienener Flächen danach sehr zügig ansteigen. In den Abendstunden verlief dieser Effekt langsamer und die Temperaturdifferenzen waren in der Folgezeit schwächer ausgeprägt, so dass abends weniger kritische Bedingungen vorliegen.

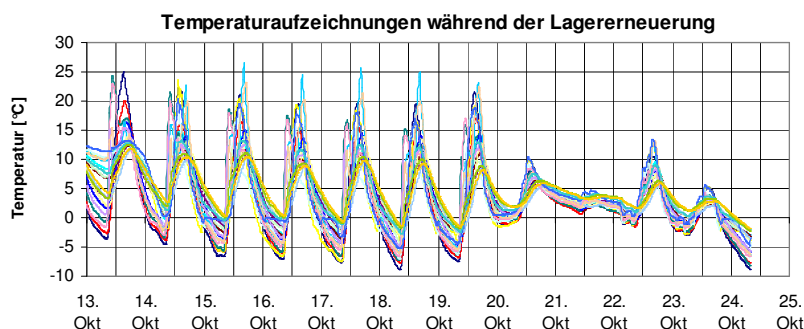
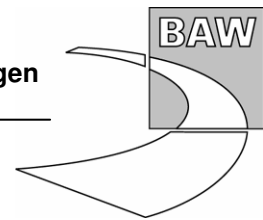


Bild 6 Temperaturmesskurven an der Kanaltrogbrücke Schwarzach (MDK)

In **Bild 6** sind Temperaturmesskurven aufgetragen, die während des Austauschs der Brückenlager an der Kanaltrogbrücke Schwarzach im Oktober 2003 aufgezeichnet wurden. Auch an diesem Beispiel ist der Effekt unterschiedlicher Temperaturen deutlich zu erkennen. Die Temperaturdifferenzen während der Nachtstunden sind ausgeprägter als beim vorherigen Beispiel. Der Vergleich der beiden Abbildungen zeigt, dass das Auftreten zweier kurzer Phasen mit annähernd ausgeglichenem Temperaturfeld im Tagesverlauf als typisches Merkmal betrachtet werden kann. Da diese Phasen relativ kurz sind, ist eine zuverlässige Prognose mit genauer Angabe des Zeitpunkts allgemeingültig nur schwer möglich, so dass Messprogramme als geeignetes Instrument zur Überwachung anzusehen sind.

In diesem Kontext ist anzumerken, dass dieses typische Verhalten nur bei entleerten Brücken festgestellt werden kann. Im befüllten Zustand wird das Temperaturfeld vordergründig aus der Interaktion von Bauwerks- und Wassertemperatur bestimmt. Das bedeutet in der Konsequenz, dass auch über längere Zeiträume kein ausgeglichenes Temperaturfeld auftreten. Aus diesem Grund sollten neben anderen Aspekten Brückenlager im entleerten Zustand eingebaut und justiert werden.



5. Zusammenfassung

Klimatische Temperatureinwirkungen haben an Brücken, bei denen in einer Lagerachse mehrere Lager angeordnet sind, einen ausgeprägten Einfluss auf die Verteilung der Lagerkräfte. Dabei sind über den Tagesverlauf erhebliche Abweichungen von den Lagerkräften unter den Bedingungen eines neutralen Temperaturfeldes zu erwarten. Zur zielsicheren Einstellung der Lagerkräfte beim Lagereinbau müssen diese Effekte durch die Wahl des richtigen Zeitpunkts berücksichtigt werden. Am Beispiel von Kanalbrücken wurden Problemstellungen beim Lagereinbau und der zielgerechten Einstellung der Lagerkräfte aufgezeigt. Gleichzeitig wurde dargestellt, dass die Berechnungsvorgaben zur Berücksichtigung klimatischer Temperaturbeanspruchungen bei Kanalbrücken noch unzureichend sind und zur Planung einer zielgerichteten Einstellung der Lagerkräfte praxisorientierte Lösungsansätze erforderlich sind.

- [1] Ehmann R., Mangerig I.: Kanalbrücken – Besondere bauwerksspezifische Einwirkungen. Stahlbau 70, 2001 Heft 1
- [2] Mangerig I., Zapfe C., Retze U.: Einbau von Brückenlagern unter klimatischen Bedingungen. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau 5/2001, Technische Universität München: Festschrift Albrecht, ISSN 0941-925X
- [3] Mangerig I.: Analysen und Empfehlungen zur Temperaturbeanspruchung stählerner Kanalbrücken. Proceedings zum BAW-Kolloquium: Messwertgestützte Nachweise für Wasserbauwerke, 2001.
- [4] Mangerig I., Ehmann R., Zapfe C.: Messtechnisch begleiteter Lagereinbau an der Vorlandbrücke am Wasserstraßenkreuz Magdeburg. GESA-Symposium Sicherheit und Wirtschaftlichkeit durch Messtechnik, Monitoring und Beanspruchungsanalyse, VDI-Bericht 1757 2003.