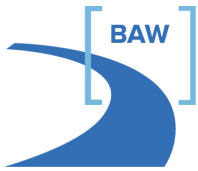


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

BAWEmpfehlung

Temperatureinwirkungen auf stählerne Kanalbrücken

Ausgabe Dezember 2016



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien Herausgeber

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Postfach 21 02 53
76152 Karlsruhe

Tel.: 0721 9726-0
Fax: 0721 9726-4540

info@baw.de
www.baw.de

Verfasser

Professor Dr.-Ing. Ingbert Mangerig, Universität der Bundeswehr München
Dipl.-Ing. Rainer Ehmann, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Übersetzung, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers: © BAW 2016

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einführung	2
1.1	Stählerne Kanalbrücken	2
1.2	Klimatische Einflüsse	4
1.3	Verformungsverhalten und Kräfteumlagerung	6
1.4	Ausschluss abhebender Lagerkräfte	8
2	Temperatureinwirkungen	9
2.1	Allgemeines	9
2.2	Allgemeine Berechnungsverfahren	10
2.3	Ableitung charakteristischer Temperaturverteilungen	15
3	Lineare Ersatztemperaturen	16
3.1	Allgemeines	16
3.2	Ersatztemperaturverteilungen für Kanalbrücken mit Rechteckquerschnitt	18
3.3	Ersatztemperaturverteilungen für Kanalbrücken mit Trapezquerschnitt	23
4	Teilflächenmodell	24
4.1	Kanalbrücken mit Rechteckquerschnitt	24
4.1.1	Definition der Teilflächen	24
4.1.2	Temperaturzuweisung	25
4.1.3	Beanspruchungskombinationen	27
4.1.4	Lagerwege aus Temperatureinwirkung	28
4.1.5	Leerer Trog	28
4.1.6	Befülltes Bauwerk	32
4.2	Kanalbrücken mit Trapezquerschnitt	36
4.2.1	Allgemeines	36
4.2.2	Beanspruchungskombinationen	38
4.2.3	Lagerwege aus Temperatureinwirkung	39
4.2.4	Temperatureinwirkungen auf das leere Bauwerk (Bauzustand, Revision)	39
4.2.5	Temperatureinwirkungen auf das befüllte Bauwerk (Betriebszustand)	41
5	Empfehlungen für Lagereinbau und Lageraustausch	43
5.1	Allgemeines	43
5.2	Kräftemessung und Kräfteregelung bei Hub- und Absenkvorgängen	44
5.3	Temperaturüberwachung	44
5.4	Lagereinbau	46
6	Literatur	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mittlere Trübungsfaktoren der Atmosphäre	11
Tabelle 2:	Anhaltswerte für Konvektionsbeiwerte an Bauteiloberflächen	14
Tabelle 3:	Anhaltswerte für Strahlungskoeffizienten von Bauteiloberflächen	14
Tabelle 4:	LF 1 RE	20
Tabelle 5:	LF 2 RE	20
Tabelle 6:	LF 3 RE	21
Tabelle 7:	LF 4 RE	21
Tabelle 8:	LF 5 RE	22
Tabelle 9:	LF 6 RE	22
Tabelle 10:	Zusammenstellung der Teilflächen	25
Tabelle 11:	Beanspruchungskombinationen	27
Tabelle 12:	LF 1Rv	29
Tabelle 13:	LF 1Rh	30
Tabelle 14:	LF 2R	31
Tabelle 15:	LF 5R	33
Tabelle 16:	LF 6R	34
Tabelle 17:	LF 7R	35
Tabelle 18:	LF 8R	36
Tabelle 19:	Definition gleichartiger Querschnittsbereiche	37
Tabelle 20:	Beanspruchungskombinationen	38

Bildverzeichnis

Bild 1:	Querschnittsformen von Kanalbrücken am Beispiel a) Minden, b) Leinebrücken	2
Bild 2:	Untersicht der Vorlandbrücke der Kanalbrücke Magdeburg (einschiffiger Querschnitt)	3
Bild 3:	Meteorologische Randbedingungen	4
Bild 4:	Ersatztemperaturverteilungen für Straßenbrücken	5
Bild 5:	Sonnenstandsabhängige Verschattung von Kanalbrücken	5
Bild 6:	Tragwerksreaktionen infolge klimatischer Temperatureinwirkungen, dargestellt am Beispiel eines für Straßenbrücken typischen Brückenquerschnitts	6
Bild 7:	Umlagerung der Auflagerkräfte bei Erwärmung des Bodenblechs im Trogboden, Darstellung der Verformung unbeeinflusst durch die innenliegenden Lager	7

Bild 8:	Umlagerung der Auflagerkräfte bei Abkühlung des Troges, Darstellung der Verformung unbeeinflusst durch die innenliegenden Lager	8
Bild 9:	Mathematische Beschreibung der Sonnenbahn	10
Bild 10:	Aufteilung eines Temperaturprofils in 4 Anteile, siehe DIN EN 1991-1-5 (a) Konstanter Temperaturanteil ΔT_N ; (b) linear veränderlicher Temperaturanteil in der x-z-Ebene ΔT_{MZ} ; (c) linear veränderlicher Temperaturanteil in der x-y-Ebene ΔT_{MY} ; (d) nicht-lineare Temperaturverteilung ΔT_E	16
Bild 11:	Idealisierung und Zerlegung von Temperaturfeldern	17
Bild 12:	Prinzipdarstellung zu Ersatztemperaturen bei Rechteckquerschnitten	19
Bild 13:	Prinzipdarstellung zu Ersatztemperaturen bei Trapezquerschnitten	23
Bild 14:	Definition gleichartiger Querschnittsbereiche (Teilflächen)	24
Bild 15:	Verschattungssituation für Trogwandflächen	26
Bild 16:	Verschattungssituation Trogbodenflächen	27
Bild 17:	Definition gleichartiger Querschnittsbereiche (Teilflächen)	37
Bild 18:	LF 1T, sommerliche Tagsituation, maximale Temperaturerhöhung	39
Bild 19:	LF 2T, winterliche Nachtsituation, maximale Bauwerksauskühlung	39
Bild 20:	LF 3T, maximaler horizontaler Temperaturunterschied	40
Bild 21:	LF 4T, positiver Temperaturunterschied	40
Bild 22:	LF 5T, negativer Temperaturunterschied	40
Bild 23:	LF 6T, positive Temperaturunterschiede im Wasserbereich, negative beim Betriebsweg	41
Bild 24:	LF 7T, positive Temperaturunterschiede über gesamten Querschnitt	42
Bild 25:	LF 8T, negative Temperaturunterschiede im Wasserbereich, positive beim Betriebsweg	42
Bild 26:	LF 9T, negative Temperaturunterschiede über gesamten Querschnitt	42
Bild 27:	Schematischer Lageraufbau	43
Bild 28:	Beispiel für die Anordnung von Temperaturfühlern	45
Bild 29:	Beispiel Temperaturlaufzeichnung	46
Bild 30:	Pressenkonfiguration (ggf. erforderliche Sicherungsmaßnahmen sind nicht dargestellt)	47
Bild 31:	Beispiel für den Einbau von Keilplatten an einem Kalottenlager	47
Bild 32:	Beispiel eines neu eingebauten Kalottenlagers	48

Vorbemerkung

Diese Empfehlung behandelt die Temperatureinwirkungen auf stählerne Kanalbrücken und gibt Hinweise für Einbau und Wechsel von Brückenlagern derartiger Bauwerke. Die Temperatureinwirkungen werden dabei nach den Grundsätzen der DIN EN 1990 und DIN EN 1991-1-5 ermittelt.

Die Empfehlung stellt die Erkenntnisse und Erfahrungen der letzten 15 Jahre zu dieser Problematik zusammen und bereitet sie praxisgerecht auf. Im Rahmen von BAW-Forschungsaufträgen wurden zunächst durch die Universität der Bundeswehr, München, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Prof. Dr.-Ing. I. Mangerig, die Temperatureinwirkungen auf stählerne Kanalbrücken wissenschaftlich aufbereitet. Grundlage hierzu waren u. a. Messungen der BAW an der neu errichteten Kanalbrücke Minden über die Weser (Rechteckquerschnitt) und den Kanalbrücken über die Leine (Trapezquerschnitt).

Die Erkenntnisse der FuE-Vorhaben wurden bei der Einlagerung der Leinetalbrücken und der Kanalbrücke Magdeburg über die Elbe umgesetzt. Bei Kanalbrücken des Main-Donau-Kanals konnten weitere Erfahrungen im Zuge von Lagerwechseln gewonnen werden, die ebenfalls in dieser Empfehlung aufgenommen wurden.

Autoren der Empfehlung sind:

- Professor Dr.-Ing. Ingbert Mangerig, Universität der Bundeswehr München
- Dipl.-Ing. Rainer Ehmann, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

1 Einführung

1.1 Stählerne Kanalbrücken

Kanalbrücken sind Kreuzungsbauwerke, die einen Kanal über ein Tal oder andere Verkehrswege überführen. In Deutschland sind nahezu alle in den letzten Jahrzehnten gebauten Kanalbrücken in Stahlbauweise errichtet worden, lediglich kurze Brücken wurden in Betonbauweise hergestellt. Die konstruktive Gestaltung des Brückenquerschnittes wird durch die Breite und Tiefe des Fahrwassers vorgegeben mit der Folge von hohen und breiten, nach oben offenen Trogquerschnitten. Dabei können 2 Querschnittsformen unterschieden werden (Ehmann, Mangerig, 2001):

- der Rechteckquerschnitt (R) mit senkrechten oder nahezu senkrechten Trogwänden und
- der Trapezquerschnitt (T) mit stark geneigten Trogwänden, im Allgemeinen 1:3

Der Trapezquerschnitt findet Anwendung bei Brücken mit geringen Längen.

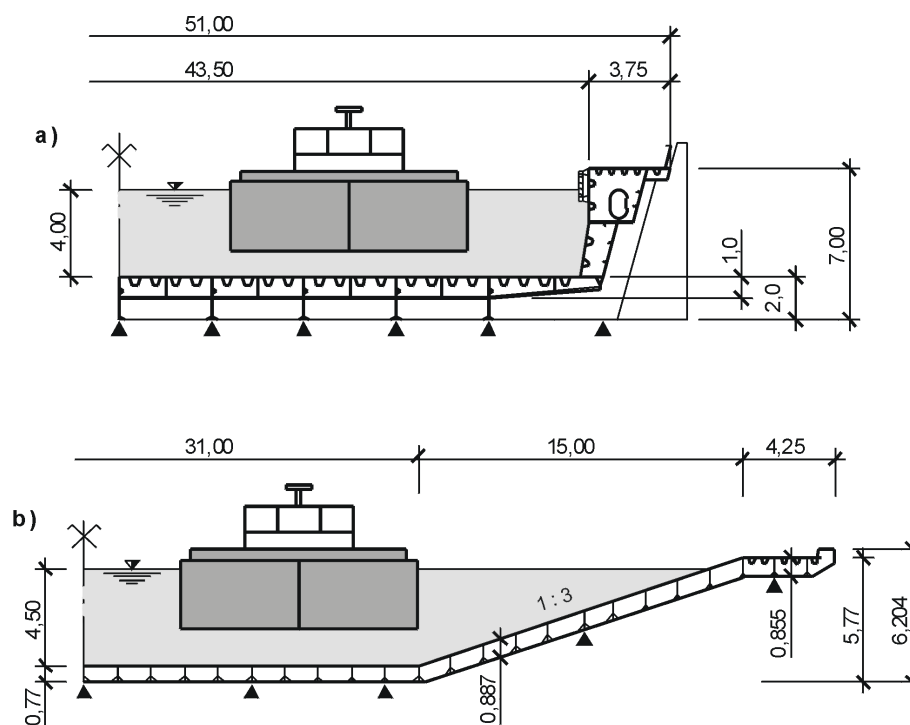


Bild 1: Querschnittsformen von Kanalbrücken am Beispiel a) Minden, b) Leinebrücken

Zusammen mit den beidseitigen Betriebswegen entstehen bei einer Kanalbrücke mit Begegnungsverkehr Querschnittsbreiten von über 50 m beim Rechteckquerschnitt und nahezu 70 m beim Trapezquerschnitt. Damit sind die Breitenabmessungen im Allgemeinen größer als die Stützweiten in Längsrichtung. Da die Geometrie der wasserbenetzten Troginnenseite durch den Kanalquerschnitt vorgegeben ist, entstehen komplexe Falwerke, die beim Typ mit senkrechten Trogwänden zu sehr hohen Steifigkeiten im seitlichen Randbereich des Querschnittes führt.

Eine weitere Besonderheit stählerner Kanalbrücken ist die sehr hohe ständige Wasserlast, die in der Regel über 80% des Gesamtgewichtes aus Konstruktionseigengewicht und Wasserbefüllung ausmacht. In Verbindung mit der großen Querschnittsbreite sind daher in einer Lagerachse meist

mehrere Lager (Kanalbrücke Minden 11 Stück) in relativ kurzen Abständen angeordnet. Ebenfalls als Folge der hohen Wasserlast sind die Spannweiten in Längsrichtung – im Vergleich zu Straßenbrücken – relativ kurz gehalten, um zu wirtschaftlich günstigen Konstruktionen zu gelangen.

Kanalbrücken mit Rechteckquerschnitt und somit senkrechten Trogwänden bestehen aus den seitlichen Hauptträgern, aus Querrahmen, welche an den Lagerachsen zu Auflagerquerträgern werden und Längsträgern unterhalb des Trogbodens sowie zusätzliche Längsrippen. Es entsteht somit ein räumlicher Trägerrost, der schubfest mit Wand- und Bodenscheiben verbunden ist.



Bild 2: Untersicht der Vorlandbrücke der Kanalbrücke Magdeburg (einschiffiger Querschnitt)

Die hohe Steifigkeit des Querschnittes und die statisch unbestimmte Lagerung in Brückenlängs- und -querrichtung führen dazu, dass Kanalbrücken sehr empfindlich auf Zwängungen reagieren. Dies macht sich insbesondere im Zustand des leeren Troges bemerkbar, wenn nur noch etwa 15% der äußeren ständigen Einwirkung vorhanden ist. Der Zustand ohne Wasserfüllung ist nicht nur während der Bauphase vorhanden, sondern in regelmäßig wiederkehrenden Revisionszuständen, die für Inspektionen und Instandsetzungen notwendig werden.

Eine wesentliche Einwirkung, die zu Zwängungen führt, ist dabei die klimatische Temperaturbeanspruchung, die als veränderliche Einwirkung konsequent in allen Bemessungssituationen zu berücksichtigen ist. Die Unterschätzung der Temperaturbelastung hat in der Vergangenheit häufig zu Schäden an den Lagern geführt. Gerade im leeren Zustand mit geringen ständigen Auflasten führen Zwängungen aus klimatischen Temperaturbeanspruchungen zu Umlagerungen, die in der Summe zu abhebenden (Zug-) Auflagerkräften führen mit der Folge, bei in der Regel nicht zugfesten Brückenlagern, dass der Überbau abhebt und die in diesem Zustand eintretenden Überbau- bewegungen Lagerschäden zur Folge haben. Verstärkt werden kann dieser Effekt durch unvermeidbare Fertigungsungenauigkeiten, Toleranzen beim Lagereinbau und Baugrundsetzungen.

Ziel muss es sein, sichere und beherrschbare Betriebszustände zu erreichen, um Schäden am Tragwerk und den Lagern zuverlässig zu vermeiden. Dies gilt selbstverständlich für Neubauplanungen als auch für die Überprüfung bestehender Bauwerke, z. B. im Rahmen von Lagerauswechslungen. Voraussetzung ist eine zutreffende Bestimmung ungünstiger Konstellationen von maßgebenden Temperaturverteilungen. Diese Bestimmung ist Inhalt der vorliegenden Empfehlung.

1.2 Klimatische Einflüsse

Brückenbauwerke sind permanent klimatischen Umgebungsbedingungen ausgesetzt und weisen instationäre und nichtlinear begrenzte Temperaturfelder auf, die Tragwerksverformungen, Zwängungen und Umlagerungen der Auflagerreaktionen verursachen. Nachdem in der Vergangenheit zahlreiche Lagerschäden aus abhebenden Lagerreaktionen bei entleerten Brückentrögen von Kanalbrücken aufgetreten sind, wurden die Temperaturverteilungen infolge klimatischer Einflüsse sowie die zugehörigen Verformungsauswirkungen in Forschungs- und Ausführungsprojekten durch numerische Simulation analysiert und mittels Langzeitmessreihen validiert.

Die zeitabhängigen Bauwerkstemperaturen 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 zwischen dem Bauwerk und der Umgebung ausgetauscht.

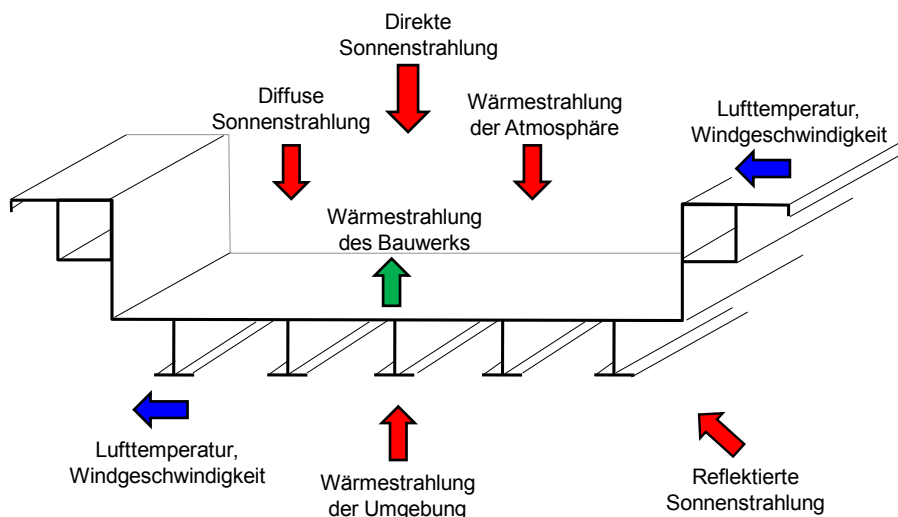


Bild 3: Meteorologische Randbedingungen

Die bei der Berechnung von Straßen- und Wegebrücken anwendbaren linearen Ersatztemperaturfelder (Temperaturschwankungen ΔT_N , Temperaturunterschiede ΔT_M) für meteorologisch bedingte Temperatureinwirkungen gemäß DIN EN 1991-2 in Verbindung mit DIN EN 1991-1-5 können nicht vorbehaltlos auf Querschnittskonturen von Kanalbrücken übertragen werden. Die Ersatztemperaturverteilungen für Straßenbrücken gemäß Bild 4 zeichnen ein stark vereinfachtes Abbild tatsächlicher Temperaturfelder in Brückenbauwerken. Gleichwohl liefern diese Berechnungskenngrößen

für typische Straßenbrückenquerschnitte mit einer zwängungsfreien Lagerung in Querrichtung, zwängungsfreier Lagerung gegen Horizontalverformungen und Verdrehungen sowie einer Querschnitts- und Systemkontur, die sich an den Vorgaben der für Straßenbrücken durchgeführten Forschungsarbeiten orientiert, hinreichend sichere Ergebnisse.

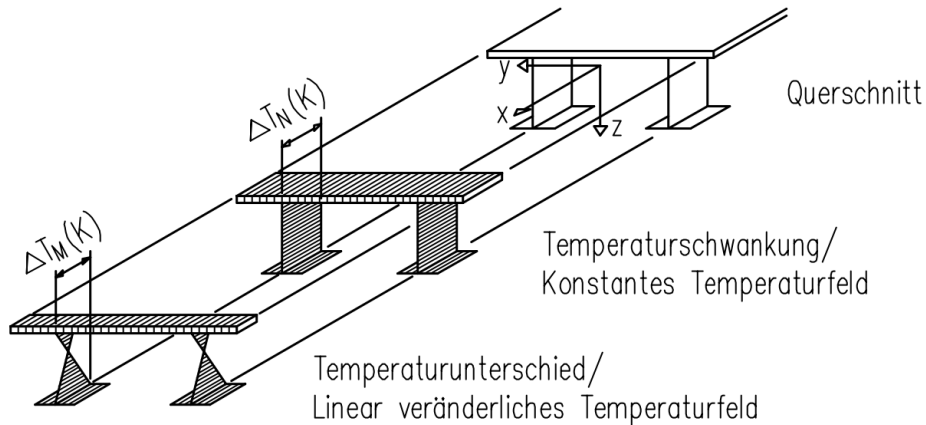


Bild 4: Ersatztemperaturverteilungen für Straßenbrücken

Sind diese Vorgaben bei Brückentragwerken nicht eingehalten, so müssen die Berechnungsvorgaben zur Modellierung der Temperaturbeanspruchungen erheblich erweitert werden. Werden die Zusammenhänge klimatischer Temperaturbeanspruchungen auf Kanalbrücken übertragen, so wird deutlich, dass weder die Querschnitts- und Systemkontur, noch die Forderung nach teilweise zwängungsfreier Lagerung mit den Vorgaben für Straßenbrücken übereinstimmen.

Wesentliche Unterschiede zwischen Kanalbrücken und Straßenbrücken bestehen insbesondere in der tageszeit- bzw. sonnenstandsabhängigen Verschattung von Querschnittsteilen (Bild 5). Während die Zufuhr konvektiver Wärmeanteile i.d.R. eine konstante Erwärmung einzelner Querschnittsteile verursacht und aus den Strahlungsanteilen der Atmosphäre und des Erdbodens nur über die Querschnittshöhe veränderliche Temperaturfelder erzeugt werden, wird bei Betrachtung der direkten Sonneneinstrahlung deutlich, dass die Temperaturverteilungen in Kanalbrückenquerschnitten neben dem ausgeprägten instationären Verhalten sowohl über die Querschnittshöhe als auch über die Querschnittsbreite nichtlinear begrenzt sind.

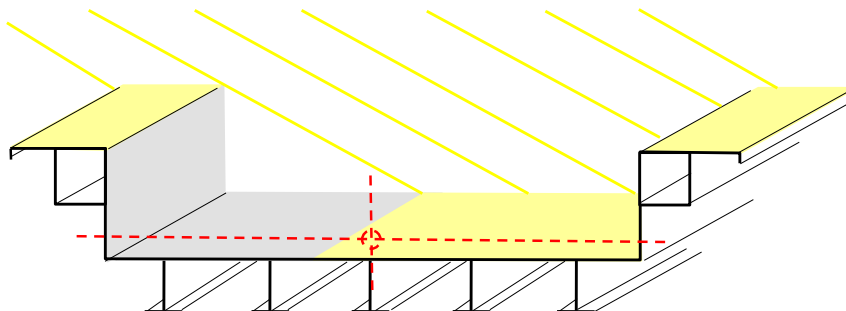


Bild 5: Sonnenstandsabhängige Verschattung von Kanalbrücken

1.3 Verformungsverhalten und Kräfteumlagerung

Zu nichtlinearen Temperaturverteilungen würden affine Verzerrungen entstehen, wären die Ausdehnungsmöglichkeiten der einzelnen Fasern in den Querschnitten voneinander unabhängig. Wegen der für Teilquerschnitte gültigen Bernoulli Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte kann sich jedoch nur eine linear begrenzte Verzerrungsverteilung einstellen, was notwendigerweise zur Existenz von Eigenspannungen führt. Die aus der Integration der linear begrenzten Verzerrungen resultierenden Krümmungen verursachen bei zwängungsfrei gelagerten Tragwerken Verformungen und bei statisch unbestimmten Systemen zusätzlich Zwangsbeanspruchungen in Verbindung mit Kräfteumlagerungen an den Auflagern.

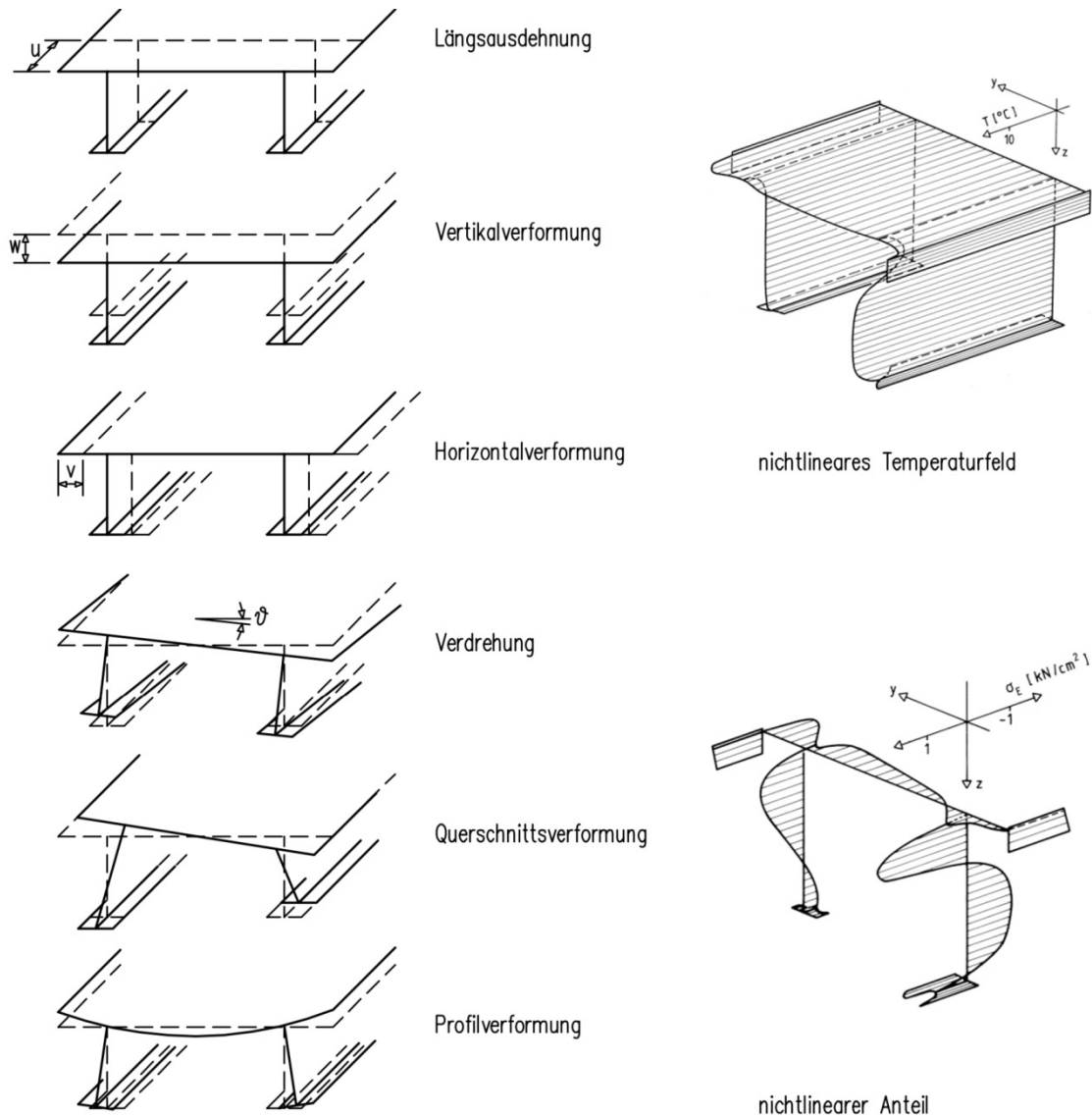


Bild 6: Tragwerksreaktionen infolge klimatischer Temperatureinwirkungen, dargestellt am Beispiel eines für Straßenbrücken typischen Brückenquerschnitts

Im Tagesverlauf werden Bauwerke im Allgemeinen durch Sonneneinstrahlung und ansteigende Lufttemperaturen erwärmt. Hierbei erreicht die Sonneneinstrahlung als vorherrschende Energiequelle bei Kanalbrücken die Oberflächen der Betriebswege, wesentliche Teile des Bodenblechs sowie Teile der Trogwände und der Außenflächen der Torsionskästen, während die Untergurte von Längsträgern und Querträgern in verschatteten Bereichen liegen.

Am Beispiel eines Brückentrogs ohne Wasserfüllung sind in der Querschnittsebene die aus Temperaturänderungen zu erwartenden Verformungen sowie temperaturbedingte Umlagerungen der Auflagerkräfte schematisch in Bild 7 dargestellt. Die eingezeichneten, durch Temperaturänderungen hervorgerufenen Verformungen wurden zur Verdeutlichung unbeeinflusst von Zwängungen angegeben, während die dargestellten Auflagerkraftvektoren als Reaktion auf eine starre Stützung durch die Lager zu verstehen sind. Die Kraftangaben in schwarzer Farbe stehen für die Auflagerreaktionen aus dem Trogeigengewicht. Der Lastfall ungleiche Erwärmung des Trogbodens, mit höheren Temperaturen im Bodenblech, würde die rot markierten Kräfte hervorrufen. Bei einem Brückentrog ohne Wasserfüllung ergeben sich die resultierenden vertikalen Auflagerkräfte damit jeweils aus der Addition der beiden Kraftvektoren. Es wird deutlich, dass im dargestellten Szenario, die aufgrund der hohen Lasten erforderliche Mehrfachstützung der Auflagerquerträger Umlagerungen zu den äußeren Lagern zur Folge hat.

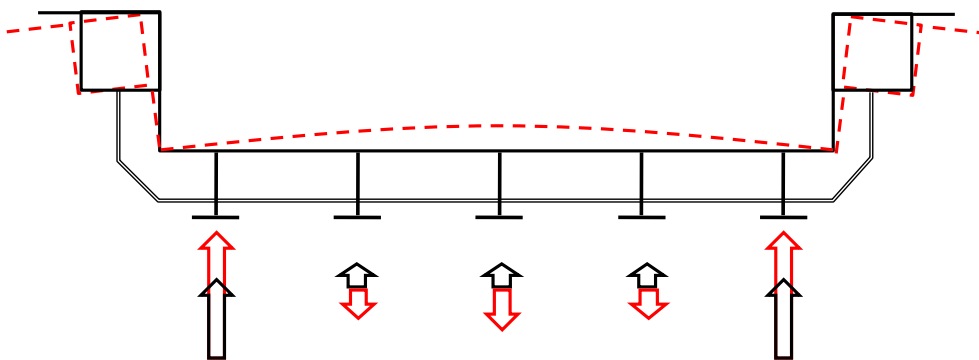


Bild 7: Umlagerung der Auflagerkräfte bei Erwärmung des Bodenblechs im Trogboden, Darstellung der Verformung unbeeinflusst durch die innenliegenden Lager

Die als Folge ungleichförmiger Temperaturverteilungen gemäß Bild 7 auftretende Aufwölbung kann häufig nicht vollständig durch das Eigengewicht der Stahlkonstruktion kompensiert werden. Folglich können an den inneren Stützungen abhebende Lagerreaktionen und anwachsende Auflagerkräfte an den Randlagern auftreten.

Während der Nachtstunden kehren sich die Verhältnisse um. Die firmamentseitigen Querschnittselemente kühlen schneller aus, als die Bauteile, die dem Erdboden zugewandt sind. Vergleichbare Temperaturfelder können ebenfalls während Regenschauern an ansonsten sonnigen Tagen entstehen. Unter den zuvor bereits beschriebenen Bedingungen einer zwängungsfreien Lagerung sind beispielhaft wieder die temperaturbedingten Querschnittsverformungen sowie bei Voraussetzung der Verformungsbehinderung an den Lagern die Umlagerungen der Auflagerkräfte schematisch in Bild 8 dargestellt.

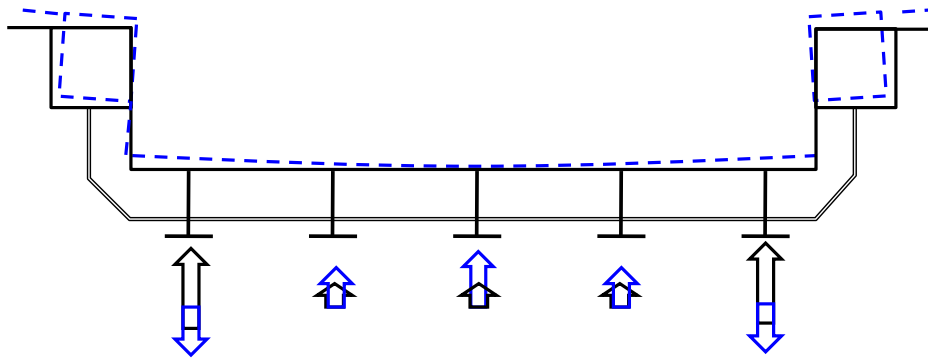


Bild 8: Umlagerung der Auflagerkräfte bei Abkühlung des Troges, Darstellung der Verformung unbeeinflusst durch die innenliegenden Lager

Unter den Bedingungen: Unterseite des Trogbodens wärmer als die Oberseite, reduzieren sich die Auflagerkräfte in den Randbereichen und nehmen bei den innen liegenden Lagern zu. Die Vektoren der vertikalen Auflagerkräfte aus den Eigenlasten sind wieder in schwarzer Farbe dargestellt. Die Signaturen der Auflagerkräfte aus dem Lastfall Temperatur für den Fall geringerer Temperaturen im Bodenblech sind in blauer Farbe angegeben.

In der Abkühlungsphase des Bauwerks kann ebenso wie beim Erwärmungsvorgang nicht zwangsläufig vorausgesetzt werden, dass die Auflagerkräfte aus ständigen Lasten die Wirkungen temperaturbedingter Lagerreaktionen kompensieren. Es entstehen Kräfteumlagerungen aus einer statisch unbestimmten Stützung der Querträger. Dieser Effekt wird bei Durchlaufsystemen in Längsrichtung zusätzlich noch durch die Zwängungen aus statischer Unbestimmtheit verstärkt. Aufgrund der Steifigkeitsverhältnisse überwiegt allerdings im Allgemeinen der Anteil aus der Querträgerstützung.

Die Effekte der Kraftumlagerungen wirken sich bei Brückentragwerken mit Rechteckquerschnitten und den damit meist verbundenen hohen Längs- und Quersteifigkeiten stärker aus, als bei den relativ weichen Trapezquerschnitten. Verstärkt werden die Reaktionen durch enge Stützungen mit mehreren Lagern in Brückenquerrichtung. Da die hohe Wasserlast von Kanalbrücken häufig eine Auflagerung in relativ engen Abständen erzwingt und gleichzeitig die Tragwerksbeanspruchungen Konstruktionselemente mit verhältnismäßig hohen Steifigkeiten erfordern, ist vor dem Hintergrund möglicher abhebender Lagerreaktionen sowohl beim Neubau von Kanalbrücken als auch beim Lageraustausch der realitätsnahen Ermittlungen der Lagerkräfte mit Berücksichtigung zu erwartender Zwängungen besondere Sorgfalt beizumessen.

1.4 Ausschluss abhebender Lagerkräfte

Zur Vermeidung von Lagerschäden ist das Abheben der Auflager zuverlässig auszuschließen. Hierfür stehen mehrere alternative Lösungsansätze zur Verfügung:

- Rückverankerung (zugfeste Auflager, Ankerstangen)
- Kompensierung (überhöhter Lagereinbau, Ballastierung)
- Vermeidung (Minimierung der Auflageranzahl, konstruktive Ausbildung der Querträger)

Die Nachrüstung von zugfesten Lagern oder Rückverankerungen in bestehenden Brücken setzt voraus, dass insbesondere in den Unterbauten die Aufnahme abhebender Lagerkräfte möglich ist

oder notwendige Konstruktionen wirtschaftlich ergänzt werden können. Bei horizontal verschieblichen Auflagern ist der konstruktive Aufwand für Rückverankerungen vergleichsweise hoch, weil die temperaturbedingten Längenänderungen auch im Bereich der Verankerungen zwängungsfrei zu ermöglichen sind. Da geregelte Bauprodukte für die Aufnahme von Zugkräften in Lagern nicht bei allen Lagervarianten vorausgesetzt werden können, ist fallweise eine Zustimmung im Einzelfall zu erwirken.

Wenn es die Querschnittsabmessungen eines Bauwerks zulassen, können durch Einprägung eines Zwängungszustands geringe Eigengewichts-Auflagerlasten zur Vermeidung abhebender Lagerreaktionen kompensiert werden. Der Zwängungszustand kann durch den „überhöhten“ Einbau einzelner Lager erreicht werden. Dabei werden die Auflagerlasten an „zu hoch“ eingebauten Lagern anwachsen und aus Gleichgewichtsgründen an benachbarten Lagern vermindert. Durch die Maßnahme ist in begrenztem Umfang eine Verlagerung von Auflasten zu abhebegefährdeten Auflagern möglich.

Eine Ballastierung zur Erhöhung von Auflasten ist aus wirtschaftlichen Erwägungen nach Möglichkeit zu vermeiden.

Bei Neubauplanungen sollten oben genannte Maßnahmen durch einen geeigneten Tragwerksentwurf möglichst vermieden werden.

Bei den Nachweisen sind die Regelungen zur Lagesicherheit gemäß DIN EN 1990 in Verbindung mit DIN EN 1990/NA zugrunde zu legen. Es gelten die als charakteristische Werte für eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren ausgewiesenen Angaben.

2 Temperatureinwirkungen

2.1 Allgemeines

Bei der Festlegung der maßgebenden Temperaturverteilungen können grundsätzlich allgemeine, auf physikalischen und mechanischen Grundlagen basierende Berechnungsverfahren verwendet werden. Diese erfordern eine Diskretisierung der zu untersuchenden Konstruktionsabschnitte in Einzelelemente und sollten auch nichttragende schattenbildende Ausbauelemente berücksichtigen. Aufgrund des meist aus wasserseitigen Blechtafeln und daran anschließenden Aussteifungselementen bestehenden Aufbaus der Tragkonstruktion von stählernen Kanalbrücken können die maßgebenden Temperaturverteilungen meist aus zweidimensionalen Betrachtungen abgeleitet werden. Die Rand- und Übergangsbedingungen der diskretisierten Struktur sind der Fragestellung entsprechend zu modellieren. Es empfiehlt sich, die Wärmeströme an den Elementrändern zur Atmosphäre getrennt nach Konvektion und Strahlung zu formulieren. Allgemeine Berechnungsverfahren liefern bei zweidimensionaler Betrachtung als Ergebnis für jede einzelne Querschnittsfaser Temperatur-Zeit-Reihen und ermöglichen damit für beliebige Querschnittskonturen die Angabe realitätsnaher Temperaturverteilungen. Aufgrund des zeitveränderlichen Charakters der die klimatischen Einwirkungen beschreibenden Eingangsgrößen sind diese Temperaturverteilungen instationär und in ihrer Kontur nichtlinear begrenzt sowie von der Bauwerksorientierung, der Bauwerksumgebung, der Tageszeit und von der Jahreszeit abhängig. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen können für eine Strukturanalyse unmittelbar als Einwirkung auf die Elemente von Schalenmodellen übertragen werden. Die folgenden Unterabschnitte enthalten Hinweise zu instationären Temperaturfeldberechnungen aus Klimadaten.

Zur Bestimmung repräsentativer (charakteristischer) Werte der Temperatureinwirkungen sind die Temperatur-Zeit-Reihen statistisch auszuwerten. Dies setzt Klimasimulationen mit meteorologischen Messdaten für den Bauwerksstandort über Zeiträume von mehreren Jahren voraus. Mit Hilfe von Extremwertverteilungen z. B. Weibullverteilung können daraus repräsentative Werte verschiedener Wiederkehrperioden ermittelt werden.

2.2 Allgemeine Berechnungsverfahren

Allgemeine Berechnungsverfahren sind sehr gut geeignet für eine objektspezifische Ermittlung der Temperaturfelder, d. h., wenn für ein konkretes Bauwerk mit seiner konstruktiven Ausbildung, Lage und Ausrichtung die Temperatureinwirkungen zu bestimmen sind. Dies erfordert wissenschaftlich basierte Methoden mit entsprechend hohem Aufwand und wird im Allgemeinen auf Einzelfälle beschränkt bleiben, die im Rahmen gutachtlicher Bearbeitungen behandelt werden.

Die allgemeinen Berechnungsverfahren beruhen auf der Ermittlung von Temperaturfeldern aus Klimadaten nach dem Zeitschrittverfahren. Die geographische Lage des Bauwerks sowie die Orientierung in Relation zum Zenit sind bei allgemeinen Berechnungsverfahren zu berücksichtigen (Mangerig, 1986).

Die für die Zeitschrittberechnung verwendeten meteorologischen Messdaten müssen einen Zeitraum überspannen, der zuverlässig eine statistische Auswertung ermöglicht. Hierfür sind Simulationsrechnungen über mehrere Jahre erforderlich.

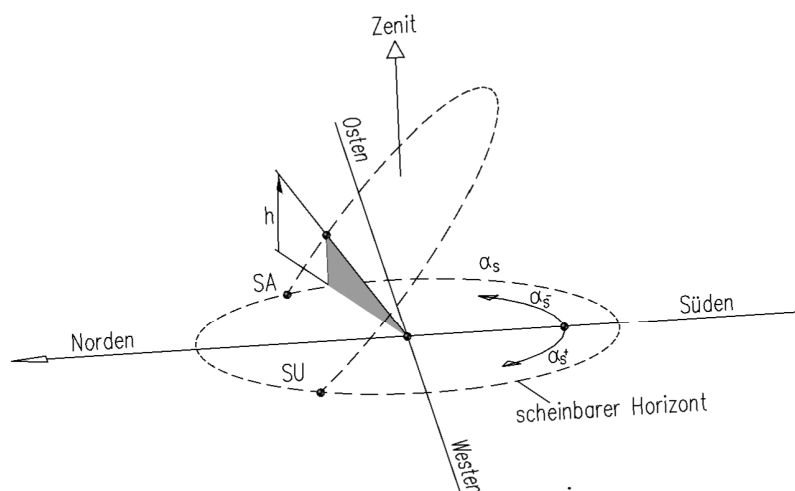


Bild 9: Mathematische Beschreibung der Sonnenbahn

In die rechnerische Simulation instationärer Temperaturfelder gehen neben meteorologischen Randbedingungen zusätzlich nachfolgend genannte Faktoren ein:

- geographische Breite – Lage des betrachteten Bauwerks auf der Erdoberfläche
- Deklination der Sonne – Neigung der Erdrotationsachse zur Umlaufebene der Sonne
- Trübung der Atmosphäre – Maß zur Angabe der Strahlungseigenschaften der Atmosphäre

Die wesentlichen Beziehungen zur Beschreibung der Sonnenbahn sind in Bild 9 wiedergegeben. Im dreidimensionalen Raum kann die wechselnde Position der Sonne im Tages- und Jahresverlauf durch einen Sonnenhöhenwinkel h und den Azimutwinkel α_s beschrieben werden. Der Sonnenhöhenwinkel gibt die Höhe über der Horizontalebene an und kann abhängig von der geographischen Breite φ , der Sonnendeklination δ und der Tagesstunde τ in einer trigonometrischen Funktion $h = h(\varphi, \delta, \tau)$ ausgedrückt werden.

Anhaltswerte für die Trübung der Atmosphäre sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Mittlere Trübungsfaktoren der Atmosphäre

Trübungsfaktoren	Winter	Sommer	Mittel
Industriegebiet	4,0	5,4	4,8
Großstadt	3,1	4,3	3,7
Land	2,1	3,5	2,8

Der Wärmeaustausch von Querschnittselementen untereinander und mit der Umgebung erfolgt durch:

- Konvektion zwischen Festkörperoberflächen und umgebender Luft
- Wärmestrahlung zwischen Festkörperoberflächen und Festkörperoberflächen
- Wärmestrahlung zwischen Festkörperoberflächen und der Atmosphäre
- Wärmeleitung zwischen aneinandergrenzenden Festkörpern

Bei der Temperaturfeldberechnung sollte der Netto-Wärmestrom h_{net} unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung nach Gleichung (1) ermittelt werden:

$$h_{\text{net}} = h_{\text{net,c}} + h_{\text{net,r}} \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (1)$$

Dabei ist

- $h_{\text{net,c}}$: konvektiver Wärmestrom
- $h_{\text{net,r}}$: radiativer Wärmestrom

Der konvektive Anteil des Netto-Wärmestroms sollte mit Gleichung (2) beschrieben werden:

$$h_{\text{net,c}} = \alpha_c \cdot (T_{\text{Luft}} - T_{\text{Bauteil}}) \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (2)$$

Dabei ist

- α_c : Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion [W/m²K]
- T_{Luft} : Lufttemperatur in der Bauwerksumgebung [°C]
- T_{Bauteil} : Oberflächentemperatur des Bauteils [°C]

Der Netto-Wärmestrom durch Strahlung wird nach Gleichung (3) bestimmt:

$$h_{\text{net,r}} = \Sigma \varphi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left((T_{\text{Umgebung}} + 273)^4 - (T_{\text{Bauteil}} + 273)^4 \right) \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (3)$$

mit:

- φ : Konfigurationsfaktor für Positions- und Abschattungseffekte
- ε : Strahlungskoeffizient
- σ : Stephan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$
- T_{Umgebung} : Temperatur von Strahlern in der Bauwerksumgebung [°C]
- T_{Bauteil} : Oberflächentemperatur des Bauteils [°C]

Temperaturfeldberechnungen erfolgen auf Grundlage der Fourier'schen Differentialgleichung des instationären Wärmeleitprozesses in festen Körpern gemäß Gleichung (4):

$$\frac{\lambda(T)}{c(T) \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\partial T^2}{\partial^2 y} + \frac{\partial T^2}{\partial^2 z} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}; \quad T = f(y, z, t) \quad (4)$$

mit:

- ρ : Dichte
- λ : Wärmeleitfähigkeit
- c : spezifische Wärmekapazität
- T : Elementtemperatur
- t : Zeit

Direkte meteorologische Einflussfaktoren zur numerischen Beschreibung der thermischen Belastung von Bauwerken sind:

- Sonneneinstrahlung (Wärmestrahlung)
- atmosphärische Gegenstrahlung
- Lufttemperatur (Konvektion)
- Windgeschwindigkeit (Konvektion)

Bei der Tragwerksberechnung mittels Schalenmodellierung können die Elementtemperaturen unmittelbar aus den Temperaturfeldern übernommen werden. Bei der Tragwerksanalyse unter Zuhilfenahme von räumlichen Stabwerkmodellen sind aus den Temperaturfeldern äquivalente Ersatztemperaturfelder für Temperaturschwankungen ΔT_N und Temperaturunterschiede ΔT_M abzuleiten, vergl. Abschnitt 3.

Thermische Materialkenngrößen:

Kenngrößen von Baustahl:

Die thermischen Materialkenngrößen von Baustahl für die Bandbreite der durch klimatische Einwirkungen verursachten Temperaturen dürfen als temperaturunabhängig angesehen werden. Als Berechnungswerte sollten die Kenngrößen für Raumtemperaturen verwendet werden:

Dichte:	$\rho = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
spezifische Wärmekapazität:	$c = 480,0 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda = 48 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

Kenngößen von Normalbeton:

Thermische Materialkenngößen von Betonwerkstoffen weisen in Abhängigkeit von den Zuschlägen eine Streubreite auf. Im relevanten Temperaturbereich dürfen diese Werte als temperaturunabhängig betrachtet werden. Als Anhaltswerte für Abschätzungen der Wärmeströme dürfen nachfolgend benannte Angaben verwendet werden:

Dichte:	$\rho = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
spezifische Wärmekapazität:	$c = 950 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda = 1,6 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

Kenngößen von Asphaltbelägen:

Asphaltbeläge auf Betriebswegen sind bei der Berechnung von Temperaturfeldern zu berücksichtigen. Thermische Materialkenngößen von Asphaltmischungen weisen in Abhängigkeit von den Zuschlägen sowie den Mischungsverhältnissen eine Streubreite auf. Im relevanten Temperaturbereich dürfen diese Werte als temperaturunabhängig betrachtet werden. Als Anhaltswerte für Abschätzungen der Wärmeströme dürfen nachfolgend benannte Angaben verwendet werden:

Dichte:	$\rho = 2250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
spezifische Wärmekapazität:	$c = 920,0 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda = 1,1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

Wärmeübergangseigenschaften an Bauteiloberflächen:

Der konvektive Wärmeübergang an Bauteiloberflächen setzt sich aus freier Konvektion und erzwungener Konvektion infolge thermischen Auftriebs zusammen. Anhaltswerte für Gesamtkonvektionsbeiwerte in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Bauteilneigung sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Anhaltswerte für Konvektionsbeiwerte an Bauteiloberflächen

Orientierung Oberfläche	Gesamtkonvektionsbeiwert α_c als Mittelwert			
	v = 0 m/s	v = 1 m/s	v = 2 m/s	v = 5 m/s
Decke nach oben	6,0	8,5	11,5	24,0
Decke nach unten	1,5	6,0	9,0	22,0
Freie Außenwand	4,5	7,5	10,5	23,0
Als Mittelwert	5,6	10,6	13,6	25,6

Emissionseigenschaften an Bauteiloberflächen:

Die Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile sowie die Bauteilneigung beeinflussen den radiativen Wärmeaustausch. Anhaltswerte für die Strahlungskoeffizienten in Abhängigkeit von den Oberflächeneigenschaften der Bauteile sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Anhaltswerte für Strahlungskoeffizienten von Bauteiloberflächen

Baustoff		Langwellige Strahlung	Kurzwellige Strahlung
		ϵ_L	ϵ_K
Schwarzer Körper		1,00	1,00
Aluminium	Roh	0,07-0,09	0,30-0,35
	Poliert	0,29	0,20-0,25
Stahl	Roh mit Walz- oder Gusshaut	0,76-0,83	
	Frisch abgeschmiegelt	0,25-0,46	0,37-0,60
	Angerostet	0,61	0,65-0,80
	Ganz rot verrostet	0,71-0,85	0,80-0,90
	Weiß angestrichen	0,90-0,95	0,12-0,16
	Verzinkt	0,23-0,28	0,92
Beton	Ungefärbt		0,65
	Weiß gestrichen	0,88-0,95	0,35
	Stark verschmutzt		0,50-0,90
Asphalt	Normal	0,88	0,88-0,90

2.3 Ableitung charakteristischer Temperaturverteilungen

Für gängige Formen stählerner Kanalbrücken werden in den nachfolgenden Abschnitten analog zu Straßen- und Eisenbahnbrücken charakteristische Temperaturverteilungen zur Bemessung angegeben. Dabei werden im Gegensatz zu Straßen- und Eisenbahnbrücken bei Kanalbrücken auf Grund der spezifischen Konstruktionsprinzipien zwei Ansätze unterschieden:

- lineare Ersatztemperaturverteilungen oder
- realitätsnähere Temperaturfelder für Teilflächen des Bauwerks.

Da Angaben zu Bauwerkstemperaturen u.a. auch von der geografischen Lage abhängig sind, gelten die Kenngrößen für Bauwerke in Deutschland, können aber auf Konstruktionen in Regionen mit vergleichbaren klimatischen Verhältnissen übertragen werden.

Für die Tragwerksbemessung werden gemäß geltendem Normungsstand die Belastungsgrößen mit unterschiedlichen Wiederkehrperioden angegeben. Als charakteristischer Beanspruchungswert veränderlicher Einwirkungen sind zur Ermittlung von Temperaturbeanspruchungen die Einwirkungen mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren festgelegt. Diese, als „selten“ bezeichnete Beanspruchung ist bei der Bemessung nicht-umkehrbarer Auswirkungen auf das Tragwerk maßgebend.

Die geltenden Regelwerke unterscheiden bei Einwirkungen aus klimatischen Einwirkungen folgende Kombinationen mit den zugehörigen Wiederkehrperioden:

- Charakteristische (seltene) Kombination: Wiederkehrperiode 50 Jahre. Diese Einwirkungen werden in der Regel für die Bemessung von Kanalbrücken berücksichtigt.
- Nicht häufige Kombination: Wiederkehrperiode 1 Jahr. Dieser Betriebszustand kann auch für Bauzustände und Revision angesetzt werden.
- Häufige Kombination: Wiederkehrperiode 2 Wochen
- Quasi-ständige Kombination: Wiederkehrperiode 6 Tage.

Folgende Bauwerkssituationen sind grundsätzlich zu unterscheiden:

- Leerer (ungefüllter) Trog im Bau- bzw. Revisionszustand
- Mit Wasser gefüllter Trog (Betriebszustand).

Verfahren 1: Lineare Ersatztemperaturverteilungen

Diese Ersatztemperaturverteilungen nach Abschnitt 3 sind in jenen Fällen anzuwenden, bei denen Kanalbrücken im Rahmen einer Vorbemessung als räumliches Stabwerk modelliert werden. Als Ersatz für tatsächliche Wärmewirkungen sind in der Querschnittsebene der einzelnen Stabelemente linear begrenzte Temperaturanteile - konstante Werte für Temperaturschwankungen und linear veränderliche Verteilungen für Temperaturunterschiede - als Temperaturdifferenzen in [Kelvin] gemäß Bild 10 im Abschnitt 3 anzusetzen. Nichtlineare Temperaturanteile, die Eigenspannungen, aber weder Verformungen noch Zwangskräfte hervorrufen, werden bei dieser Betrachtung vernachlässigt. Eine Voraussetzung, die für übliche Querschnittsformen gerechtfertigt ist.

Die Temperaturansätze sind analog den in DIN EN 1991-1-5 für Straßen- und Eisenbahnbrücken enthaltenen Vorgaben zu verstehen, allerdings aufgrund des spezifischen Konstruktionsaufbaus von Kanalbrücken in unterschiedlicher Größe auf sämtliche Haupttragelemente anzuwenden. Auch bei einer deutlicheren Orientierung an einzelnen Konstruktionselementen stellen die Ersatz-

temperaturverteilungen auf Grund der idealisierenden Beschreibung des Erwärmungszustandes zwangsläufig eine Näherung dar. Auch ist zu berücksichtigen, dass in wenigen Lastfällen zusammengefasste Ersatztemperaturverteilungen aufgrund der komplexeren Konstruktion von Kanalbrücken nicht zur gleichen Genauigkeit wie bei Straßen- und Eisenbahnbrücken führen kann.

Mit Blick auf eine realitätsnahe Abbildung der Beanspruchungen aus klimatischen Einwirkungen kann die Modellierung von Kanalbrücken als Stabwerk auf Grund des damit verbundenen Ansatzes linearer Ersatztemperaturverteilungen nur zu einer Vorbemessung herangezogen werden.

Verfahren 2: Teilflächenmodell

Bei einer Modellierung des Tragsystems mit Flächenelementen in einer räumlich angelegten Struktur nach der Finite-Element-Methode sind für Temperatureinwirkungen die Angaben des Teilflächenmodells nach Abschnitt 4 zu verwenden, welches die Beanspruchungen aus klimatischen Temperatureinwirkungen realitätsgetreuer erfasst als nach dem Verfahren 1 mit Ersatztemperaturverteilungen. Bei dieser Vorgehensweise werden gleichartig beanspruchten Teilflächen konkrete Temperaturfelder in [°C] zugewiesen. Aus Gründen der Praktikabilität können auch bei diesem Verfahren nicht alle möglichen Temperaturfeldkonstellationen nachgestellt werden, sondern es werden nur extreme, bemessungsrelevante Situationen angegeben. Der komplexe Aufbau von stählernen Kanalbrücken macht es erforderlich, dass im Gegensatz zu Straßen- und Eisenbahnbrücken mehrere Temperatur-Lastfälle zu untersuchen sind.

3 Lineare Ersatztemperaturen

3.1 Allgemeines

Als Ersatz für die tatsächlich auftretenden Temperaturverteilungen wird den Berechnungen eine in der Querschnittsebene konstante Temperaturverteilung und eine über die Querschnittshöhe und -breite linear veränderliche Temperaturverteilung zugrunde gelegt (Roik, Mangerig, 1987a; Roik et al., 1987; Roik, Mangerig, 1988). Die konstante Temperaturverteilung, auch als Temperaturschwankung ΔT_N bezeichnet, steht stellvertretend für die Auswirkungen klimatischer Temperatureinflüsse in Bauteillängsrichtung. Die linear veränderlichen Temperaturunterschiede ΔT_{MY} bzw. ΔT_{MZ} repräsentieren die Beanspruchungen in der Vertikal- und Horizontalebene.

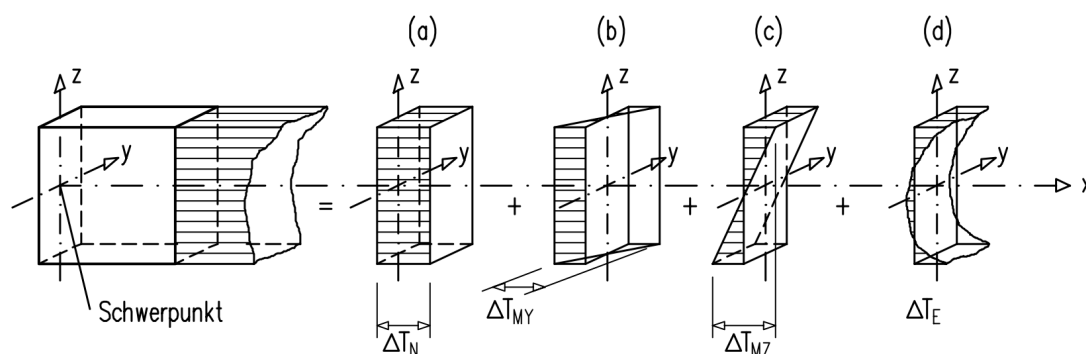


Bild 10: Aufteilung eines Temperaturprofils in 4 Anteile, siehe DIN EN 1991-1-5
 (a) Konstanter Temperaturanteil ΔT_N ;
 (b) linear veränderlicher Temperaturanteil in der x-z-Ebene ΔT_{MZ} ;
 (c) linear veränderlicher Temperaturanteil in der x-y-Ebene ΔT_{MY} ;
 (d) nicht-lineare Temperaturverteilung ΔT_E

Da mehrere Querschnittsbereiche wie Trogboden, Trogwand sowie der Betriebswegbereich zu berücksichtigen sind, ist eine segmentierte Beschreibung der Temperaturfelder erforderlich.

Bei Kanalbrücken erweist es sich als sinnvoll, den Querschnitt als zusammengesetzte Struktur zu betrachten, deren Hauptkomponenten aufgrund ihrer Disposition charakteristische Temperaturbeanspruchungen aufweisen. Diese Darstellungsweise ist vorteilhaft für eine flexible Anwendung auf die unterschiedlichen Querschnittsformen von Kanalbrücken.

Die beim Bau von Kanalbrücken zu berücksichtigenden Ersatztemperaturverteilungen wurden unter Beachtung der in Bild 10 abgebildeten Vorgaben der DIN EN 1991-1-5 entwickelt. In nachfolgender Abbildung Bild 11 sind die Grundlagen der Vorgehensweise auszugsweise dargestellt. Die Ersatztemperaturverteilungen wurden jeweils aus den Ergebnissen numerischer Temperaturfeldsimulationen abgeleitet. Den Analysen lagen zweidimensionale Temperaturfeldmodelle zugrunde. Die im Ergebnis instationären und nichtlinear begrenzten Temperaturfelder wurden soweit reduziert, bis eine praxisgerechte, an den der Vorgehensweise bei Straßen- und Eisenbahnbrücken orientierte Handhabung möglich wurde. Die Eigenspannungen hervorrufenden nichtlinearen Resttemperaturanteile wurden analog zur Vorgehensweise bei Straßen- und Eisenbahnbrücken vernachlässigt.

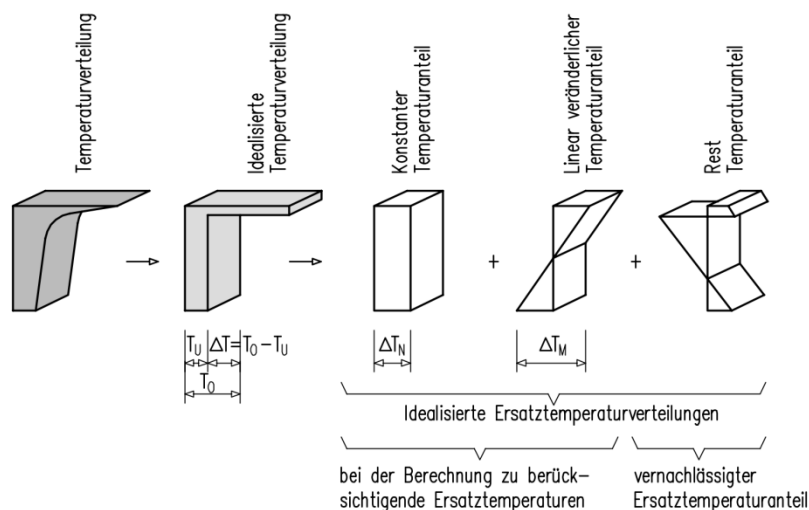


Bild 11: Idealisierung und Zerlegung von Temperaturfeldern

Der Nulldurchgang des linear veränderlichen Temperaturanteils ΔT_M liegt im Schwerpunkt des Ersatzstabes des räumlichen Stabwerksmodells.

Bei den folgenden Lastfallbezeichnungen steht

- R bzw. T für Rechteck- bzw. Trapezquerschnitt
- E für die lineare Ersatztemperaturverteilung.

3.2 Ersatztemperaturverteilungen für Kanalbrücken mit Rechteckquerschnitt

Das vereinfachte Bemessungskonzept ist gültig für Kanalbrücken mit Rechteckquerschnitt und nahezu senkrechten Trogwänden und folgendem prinzipiellen Aufbau:

Trogboden:

- Das Tragsystem des Kanalbrücken-Trogbodens besteht aus Längs- und Querträgern gleicher oder unterschiedlicher Bauhöhe (1000 bis 2500 mm).
- Der Trogboden ist nach unten offen ausgeführt.
- An den unteren Steg-Enden sind Untergurte und gegebenenfalls Flügelbleche angeordnet.
- Die oberen Steg-Enden befinden sich in einer Ebene, auf der sich das durchgehende Deckblech befindet.
- In Längs- oder Querrichtung kann das Deckblech durch Rippen unterstützt sein.

Trogwand:

- Die Trogwand ist mit oder ohne Torsionskasten mit annähernd senkrechten Wandflächen ausgeführt.
- Die Trogbreite entspricht mindestens dem 3-fachen Wert der Trogwandhöhe.

Aufgrund des Tagesgangs der Sonne sind die Tragelemente von Kanalbrücken ungleichmäßigen Temperaturverteilungen ausgesetzt, was zur Asymmetrie im Trogboden und Trogwänden führt. Zusätzlich ist zwischen dem befüllten Betriebszustand des Tragwerks und dem leeren Tragwerk im Bauzustand bzw. bei Reparaturarbeiten zu unterscheiden. Um den Aufwand bei der Modellierung der Temperaturlastfälle in Grenzen zu halten, wurde deshalb eine vereinfachte Modellierung entwickelt, deren Grundlagen in Bild 12 dargestellt sind. Abgebildet ist jeweils der leere Trog. Die Fallunterscheidung in Fall // und Fall \ / ist notwendig, da abhängig vom Sonnenstand in den Trogwänden gleichgerichtete aber auch entgegengesetzt orientierte Temperaturunterschiede auftreten können. Sonnenbeschienene Flächen sind mit roter Signatur markiert. Beim Verfahren mit linearen Ersatztemperaturen bleiben teilverschattete Bereiche des Trogbodens unberücksichtigt.

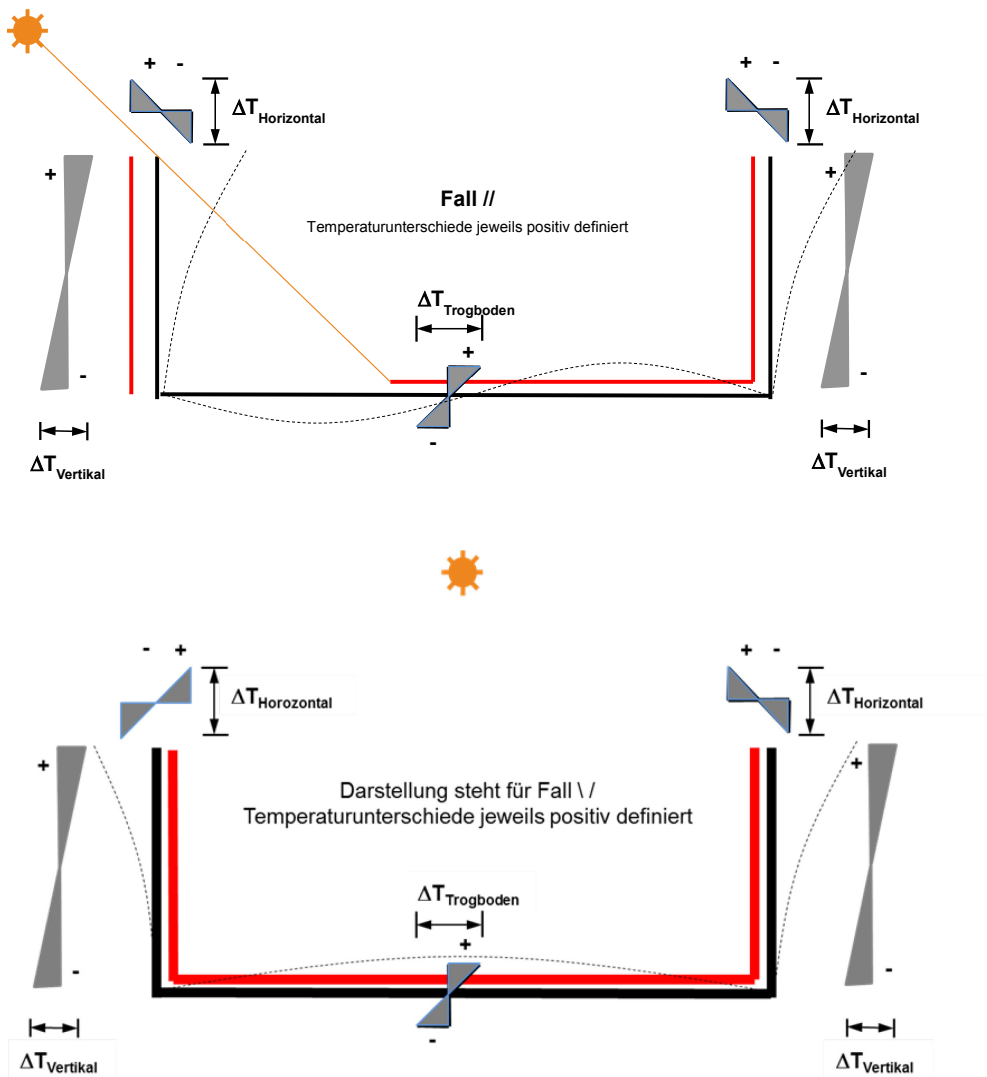


Bild 12: Prinzipdarstellung zu Ersatztemperaturen bei Rechteckquerschnitten

Zur Berücksichtigung von horizontalen (Grundriss-) Verkrümmungen bzw. den daraus entstehenden Zwängungen, kann ein linearer Temperaturunterschied über die gesamte Querschnittsbreite von $\Delta T_H = \pm 5 \text{ K}$ angesetzt werden.

LF 1 RE: Leeres Bauwerk – Sommer, Tagsituation

Die Werte der Tabelle 4 repräsentieren den unter dem Einfluss der Sonneneinstrahlung erwärmten Zustand im Sommer. Die Spalte Gesamtbauwerk enthält die maximale mittlere Bauwerkstemperatur T_N , die für die Berechnung der Längenänderung des Brückenüberbaus zu verwenden ist. In den weiteren Spalten sind die linearen Temperaturunterschiede des Trogbodens und der Trogwände angegeben. Die Kennzeichnung (//) gibt entsprechend den Prinzipdarstellungen in Bild 12 an, dass Temperaturunterschiede in den Trogwänden gleichgerichtet angesetzt werden müssen, d.h. die Trogkronen bewegen sich - zwängungsfreie Verhältnisse vorausgesetzt - beide in die gleiche Richtung.

Tabelle 4: LF 1 RE

Wiederkehrperiode	Gesamtbauwerk	Trogboden	Trogwand	
	T_N	$\Delta T_{\text{vertikal}}$ Oberseite wärmer	$\Delta T_{\text{horizontal}}$ ¹⁾	$\Delta T_{\text{vertikal}}$ Oberseite wärmer
Charakteristischer Wert: 50 Jahre	60 °C	45 K	45 K	20 K
Nicht häufig 1 Jahr	57 °C	40 K	40 K	20 K
Häufig 2 Wochen	52 °C	38 K	38 K	20 K
Quasi-ständig 6 Tage	47 °C	35 K	35 K	20 K

¹⁾ antimetrisch anzusetzen, entweder (//) oder (\ /)

LF 2 RE: Leeres Bauwerk – Winter, Nachtsituation

Temperaturangaben für den abgekühlten nächtlichen Zustand sind in Tabelle 5 zusammengestellt

Tabelle 5: LF 2 RE

Wiederkehrperiode	Gesamtbauwerk	Trogboden	Trogwand	
	T_N	ΔT Oberseite kälter	$\Delta T_{\text{horizontal}}$	$\Delta T_{\text{vertikal}}$
Charakteristischer Wert: 50 Jahre	-30 °C	-12 K	-	-
Nicht häufig 1 Jahr	-15 °C	-10 K	-	-
Häufig 2 Wochen	-8 °C	-6 K	-	-
Quasi-ständig 6 Tage	-4 °C	-5 K	-	-

LF 3 RE: befülltes Bauwerk – Sommer, Tagsituation, Luft wärmer als Wasser

Mit den Angaben in der Tabelle 6 ist der Fall der befüllten Kanalbrücke unter sommerlichen Bedingungen, wenn die Lufttemperatur höher als die Wassertemperatur ist, zu untersuchen. Die Kennzeichnung (\ /) gibt an, dass Temperaturunterschiede in den Trogwänden gegengleich angesetzt werden müssen, d.h. die Trogkronen bewegen sich – zwängungsfreie Verhältnisse vorausgesetzt – jeweils entgegen der Wasserseite nach außen.

Tabelle 6: LF 3 RE

Wiederkehrperiode	Trogboden	Trogwand	
	ΔT Oberseite kälter	$\Delta T_{\text{horizontal}}$	$\Delta T_{\text{vertikal}}$ Oberseite wärmer
Charakteristischer Wert : 50 Jahre	-12 K	40 K (\ /)	20 K
Nicht häufig 1 Jahr	-8 K	35 K (\ /)	20 K
Häufig 2 Wochen	-6 K	30 K (\ /)	20 K
Quasi-ständig 6 Tage	-4 K	30 K (\ /)	20 K

LF 4 RE: befülltes Bauwerk – Sommer, Tagsituation, Wasser wärmer als Luft

Tabelle 7: LF 4 RE

Wiederkehrperiode	Trogboden	Trogwand	
	ΔT Oberseite wärmer	$\Delta T_{\text{horizontal}}$	$\Delta T_{\text{vertikal}}$
Charakteristischer Wert : 50 Jahre	15 K	30 K (\ /)	-
Nicht häufig 1 Jahr	12 K	25 K (\ /)	-
Häufig 2 Wochen	11 K	20 K (\ /)	-
Quasi-ständig 6 Tage	10 K	20 K (\ /)	-

LF 5 RE: Befülltes Bauwerk – Winter, Nachtsituation, Luft wärmer als Wasser

Entsprechend der zuvor beschriebenen Vorgehensweise enthalten die Tabellen 8 und 9 die Werte zur Beschreibung der Einwirkung aus klimatischen Einwirkungen für winterliche Verhältnisse.

Tabelle 8: LF 5 RE

Wiederkehrperiode	Trogboden	Trogwand	
	ΔT Oberseite kühler	$\Delta T_{\text{horizontal}}$	$\Delta T_{\text{vertikal}}$ Oberseite wärmer
Charakteristischer Wert: 50 Jahre	-12 K	40K (\ /)	20 K
Nicht häufig 1 Jahr	-9 K	35 K (\ /)	20 K
Häufig 2 Wochen	-6 K	30 K (\ /)	20 K
Quasi-ständig 6 Tage	-4 K	30 K (\ /)	20 K

LF 6 RE: Befülltes Bauwerk – Winter, Nachtsituation, Wasser wärmer als Luft

Tabelle 9: LF 6 RE

Wiederkehrperiode	Trogboden	Trogwand	
	ΔT Oberseite wärmer	$\Delta T_{\text{horizontal}}$	$\Delta T_{\text{vertikal}}$
Charakteristischer Wert: 50 Jahre	19 K	-15 K (\ /)	-
Nicht häufig 1 Jahr	12 K	-15 K (\ /)	-
Häufig 2 Wochen	9 K	-15 K (\ /)	-
Quasi-ständig 6 Tage	5 K	-15 K (\ /)	-

3.3 Ersatztemperaturverteilungen für Kanalbrücken mit Trapezquerschnitt

Die Ersatztemperaturverteilungen von Trapezquerschnitten können näherungsweise von Kanalbrücken mit Rechteckquerschnitt abgeleitet werden. Da Trapezquerschnitte über schwach geneigte Seitenwände (Schrägen unter 1:3) verfügen, können näherungsweise die Temperaturunterschiede des Trogbodens der Rechteckquerschnitte auf die gesamte Breite des Trapezquerschnittes entsprechend Bild 13 angesetzt werden. Beim befüllten Trog ist für den nicht wasserbenetzten Betriebsweg immer der Wert des leeren Troges anzusetzen, wobei natürlich die zugehörige Jahreszeit – Sommer oder Winter – zu beachten ist.

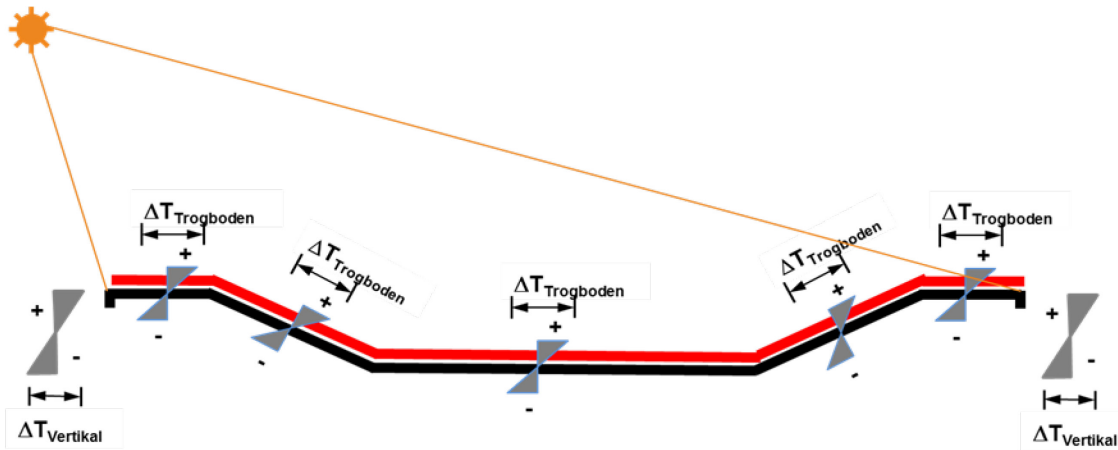


Bild 13: Prinzipdarstellung zu Ersatztemperaturen bei Trapezquerschnitten

Die für das Gesamtbauwerk geltenden konstanten Temperaturanteile T_N sind analog den für Kanalbrücken mit Rechteckquerschnitt geltenden Werten anzusetzen, vgl. LF 1 RE und LF 2 RE in den Tabellen 4 und 5. Diese Angaben werden i.d.R. lediglich zur Bestimmung der Lagerwege aus Temperatur benötigt.

Zur Berücksichtigung von horizontalen (Grundriss-) Verkrümmungen bzw. den daraus entstehenden Zwängungen, kann ein linearer Temperaturunterschied über die gesamte Querschnittsbreite von $\Delta T_H = \pm 5 \text{ K}$ angesetzt werden.

4 Teilflächenmodell

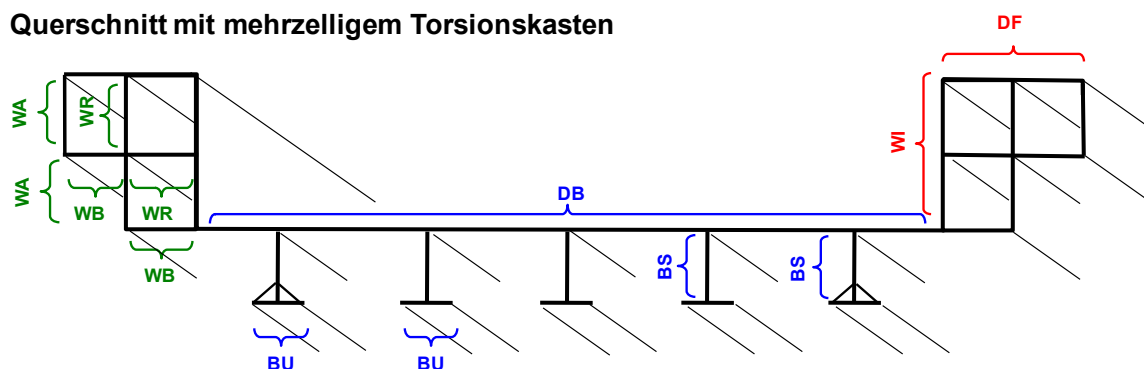
4.1 Kanalbrücken mit Rechteckquerschnitt

4.1.1 Definition der Teilflächen

Der Grundgedanke des für Kanalbrücken entworfenen Teilflächen-Temperatur-Modelles besteht darin, Querschnittsbereiche mit annähernd gleichem Temperaturverhalten zusammenzufassen und bei der Definition der Temperaturlastfälle diesen Konstruktionselementen identische Temperaturen zuzuweisen. Darauf aufbauend wurden verallgemeinerte Lastfälle formuliert, die unterschiedliche Einwirkungssituationen repräsentieren.

Das zu beurteilende Bauwerk ist gemäß Bild 14 in Teilquerschnitte aufzuteilen, welche unter gleichartigen Randbedingungen ein nahezu deckungsgleiches Temperaturverhalten aufweisen. Entsprechend der zu beurteilenden Einwirkungssituation werden den Teilquerschnitten konkrete Temperaturen zugewiesen. Die Temperaturen sind in Längsrichtung der Bauteile als konstant vorauszusetzen. Mit der beschriebenen Vorgehensweise können für Kanalbrücken idealisierte Temperaturfelder aufgestellt werden. Das Verfahren liefert abmessungsunabhängige Temperaturverteilungen und ist somit auf nahezu beliebige Tragwerksformen von Kanalbrücken anwendbar.

Querschnitt mit mehrzelligem Torsionskasten



Querschnitt mit einzelligem Torsionskasten

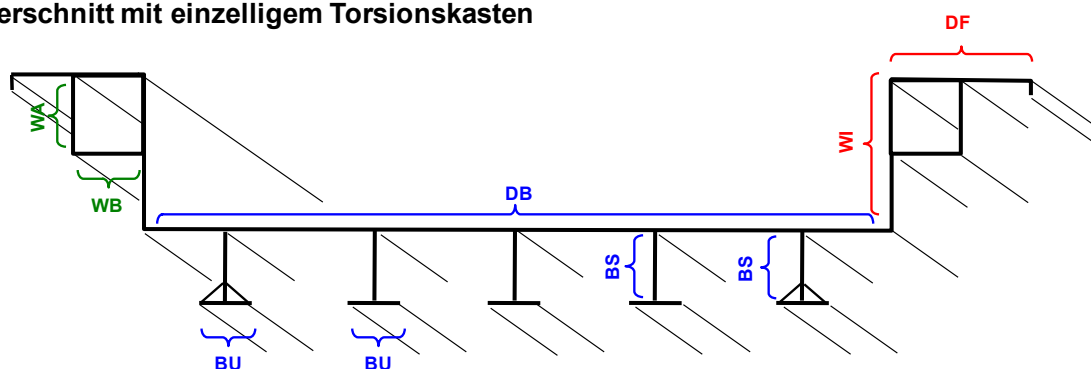


Bild 14: Definition gleichartiger Querschnittsbereiche (Teilflächen)

Das Verfahren kann auch bei seitlich offenen Querschnitten – ohne Torsionskasten – angewendet werden.

Situationsbedingt können innerhalb der Teilflächen Unterteilungen erforderlich werden. So ist bei leerem Trog das Trogbodenblech tagsüber nur teilweise sonnenbeschienen. Abhängig von der Brückenausrichtung werden Teile des Trogbodens von den Trogwänden verschattet. Im Betriebszustand „Befüllte Kanalbrücke“ befinden sich Teile der Troginnenwandfläche oberhalb des Wasserspiegels und Teile unterhalb der Wasseroberfläche. Diese Modifikationen sind fallweise zu beachten.

Tabelle 10: Zusammenstellung der Teilflächen

Bezeichnung		Beschreibung
Trogwand mit und ohne seitlichem Hohlkasten	DF	Deckblech Fahrbahn (Betriebsweg) mit unterschiedlichen Asphaltdicken
	WI	Wandfläche innen, wasserseitig. Bei Tragwerken ohne Hohlkasten ist dies i.A. die einzige senkrechte Wandfläche, ausgesteift durch Längsrippen und Querrahmen
Trogwand mit Hohlkasten	WA	Wand außen, nicht wasserbenetzt
	WB	Wandhohlkastenboden, zum Untergrund hin gerichtet
	WR	Innenflächen Hohlkasten, gleiche Temperatur wie WA verschattet
Trogboden	DB	Deckblech Boden des Troges
	BU	Boden Untergurt
	BS	Bodenlängsträgersteg, gleiche Temperatur wie BU

4.1.2 Temperaturzuweisung

Beim Teilflächenmodell werden den einzelnen Teilflächen über deren Blechdicke konstante Temperaturen in [°C] zugewiesen. An zwei aneinander treffenden Teilflächen oder beim Zusammentreffen unterschiedlicher Temperaturen innerhalb einer Teilfläche (z.B. sonnenbeschienen – verschattet) kommt es bei diesem Modell zu Temperatursprüngen, die physikalisch so nicht auftreten können, sondern ein entsprechender Wärmefluss führt zu einem stetigen, nichtlinearen Temperaturverlauf. Näherungsweise kann dies durch eine lineare Angleichung auf etwa beidseitig 1 m Länge erfolgen. Die Auswirkungen auf die interessierenden Verformungen und Zwängungen bei Vernachlässigung dieses Effektes dürften im Allgemeinen marginal sein.

Im Betriebszustand „Leere Kanalbrücke“ sind anhängig von der Orientierung für Teilflächen des Bauwerks zusätzliche Schatteneinflüsse zu berücksichtigen. Dies betrifft den mit DB bezeichneten Deckblechbereich des Trogbodens und die mit WA gekennzeichneten Außenbereiche der Trogwände. Auf dem Trogboden wird die Schattenspur von den Trogwänden vorgegeben und die Verschattung der Außenbereiche der Trogwände wird von der Länge der auskragenden Betriebs-

wege bestimmt. Nachfolgende Prinzipskizzen geben Anhaltswerte für die Festlegung der verschatteten Bereiche.

a) Horizontale Deckblechfläche des Betriebsweges (Flächenbereich „DF“)

Im Allgemeinen ist der Betriebsweg während der hellen Tagesstunden stets von der Sonne beschienen, eine Unterscheidung in besonnte und verschattete Bereiche somit nicht erforderlich. Die ergänzend zur Primärbetrachtung bei der Festlegung der Temperaturen im Deckblech der Betriebswegkonstruktion durchzuführende Betrachtung betrifft die Stärke des Belags. Maßgebende Deckblechtemperaturen sind nachfolgenden Tabellen zu entnehmen. Mit genügender Genauigkeit können Zwischenwerte durch lineare Interpolation ermittelt werden.

b) Vertikale Trogwandflächen (Flächenbereich „WA“ und WI“)

Der Tagesgang der Sonne verursacht in den vertikalen Trogwänden von Kanalbrücken wechselseitig Schatteneinflüsse. Lediglich bei Übereinstimmung von Sonnenazimut und Brückenachse sind die beiden senkrechten Begrenzungswände gleichmäßig von der Sonne beschienen. Einseitig besonnten Trogwandflächen sind gleichzeitig teilverschattete Bereiche des Trogbodens zugeordnet. Aufgrund des geringen Wärmespeichervermögens der dünnwandigen Bauelemente von Kanalbrücken und der gleichzeitig hohen Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Werkstoffs Stahl reagieren die Bauelemente relativ schnell auf Sonneneinstrahlung bzw. Schatteneinfluss. Daraus entwickeln sich unsymmetrische Temperaturfelder, die im Fall besonnener und verschatteter Trogwandflächen Extremwerte der horizontalen Verkrümmung des Brückentrogs zur Folge haben. Bilden Querschnittskonturen auf den mit „WA“ bezeichneten Trogwandaußenflächen Schattenkanten, oder verhindert seitliche Bebauung die direkte Sonnenstrahlung, sind diese Einflüsse zu berücksichtigen oder im ungünstigsten Fall die „teilbesonnte“ Trogwandaußenfläche „WA“ als über die gesamte Höhe im Schatten liegend anzusehen.

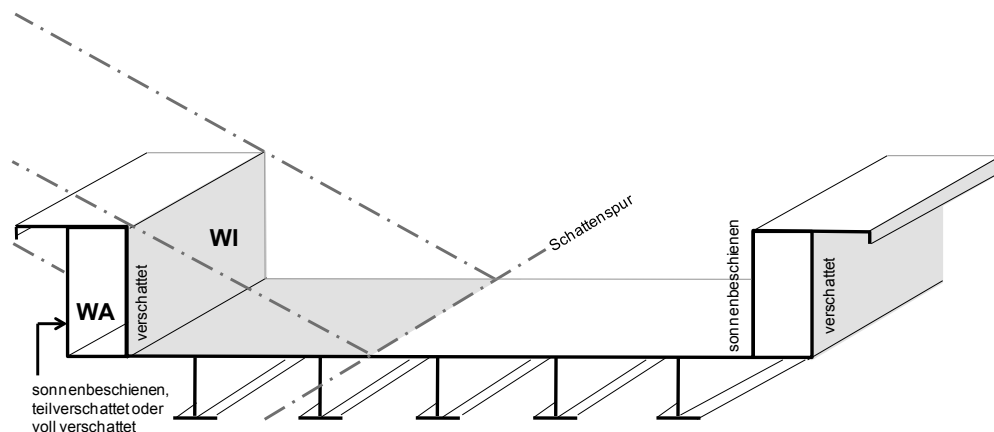


Bild 15: Verschattungssituation für Trogwandflächen

c) Trogbodendeckblech (Flächenbereich „DB“)

Bis auf den Fall quer zur Brückenlängsachse einfallender Sonnenstrahlung ist der Trogboden grundsätzlich teilverschattet. Diese verschatteten Bereiche haben gegenüber den besonnten Teilflächen prinzipiell geringere Temperaturen. Auf den Einfluss verschatteter und besonnener Teilflächen des Trogbodendeckblechs bei der Betrachtung der horizontalen Verkrümmung des Gesamttragwerks wurde bereits im Abschnitt „Vertikale Trogwandflächen“ hingewiesen. Für die Berechnung der Beanspruchungen kann der Anteil des Trogbodens mit einer Verschattungsbreite

entsprechend der 1,5-fachen Trogwandhöhe, höchstens jedoch der halben Trogbodenbreite berücksichtigt werden, siehe Bild 16.

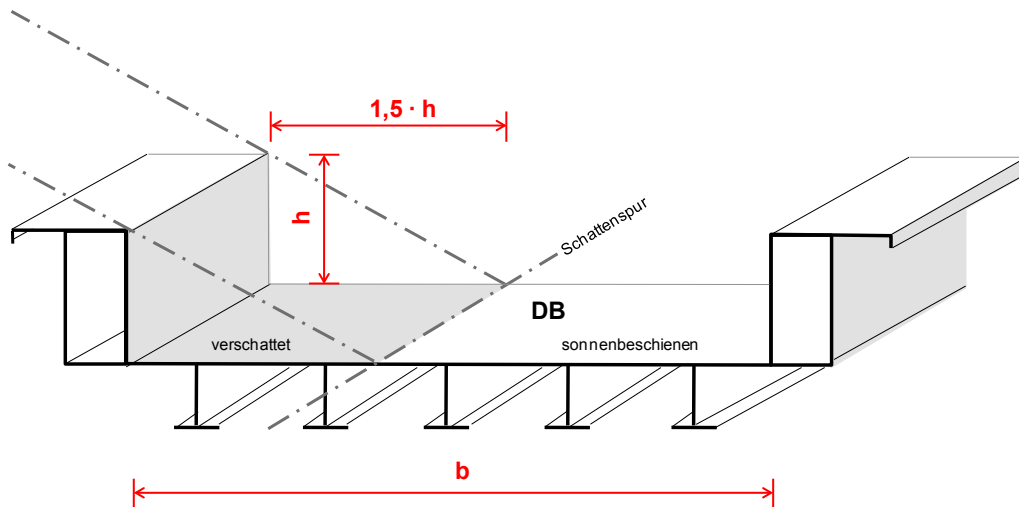


Bild 16: Verschattungssituation Trogbodenflächen

Im Falle einer Nord – Süd – Ausrichtung einer Kanalbrücke ist wegen des geringen Wärmespeichervermögens des Trogbodens und der hohen Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes Stahl von einem über die gesamte Trogbodenbreite gleichmäßig durch Sonneneinstrahlung erwärmten Deckblech auszugehen.

4.1.3 Beanspruchungskombinationen

Der ständige Wechsel klimatischer Einwirkungen ruft in Kanalbrücken zeitlich veränderliche, nicht-linear begrenzte Temperaturverteilungen hervor. Zur praxisgerechten Handhabung dieser komplexen und für stählerne Kanalbrücken teilweise bemessungsrelevanten Einwirkungen sind aus der Vielzahl möglicher Lastzustände die nachfolgend in Tabelle 11 aufgeführten Beanspruchungskombinationen als bemessungsrelevant anzusehen. Diese spiegeln neben den saisonalen und tageszeitlichen Einwirkungsszenarien auch die Randbedingungen aus den Betriebszuständen leerer und befüllter Trog einer stählernen Kanalbrücke wider.

Tabelle 11: Beanspruchungskombinationen

Befüllungszustand	Jahreszeit	Randbedingungen	Lastfall
Leer Bauzustand Revision	Sommer	Tag	1Rv 1Rh
		Nacht	2R
	Winter	Tag	3R
		Nacht	4R
Befülltes Bauwerk Betriebszustand	Sommer	Luft-T > Wasser-T ¹⁾	5R
		Wasser-T > Luft-T	6R
	Winter	Luft-T > Wasser-T	7R
		Wasser-T > Luft-T	8R

1) T = Temperatur

4.1.4 Lagerwege aus Temperatureinwirkung

Für die Ermittlung der Lagerwege aus Temperatur wird der leere Trog maßgebend. Der ungünstigste Wert ist zugrunde zu legen:

- a) nur Temperaturschwankung (konstantes Temperaturfeld) ohne Temperaturunterschiede von

$$T_N = + 60^\circ\text{C bis } T_N = - 30^\circ\text{C} .$$

- b) Oder unter Berücksichtigung von Verkrümmungen anstatt dem konstanten Temperaturfeld von + 60°C die Temperaturfelder der nachfolgenden Lastfälle LF 1Rv oder LF 1Rh.

Es ist zu beachten, dass im befüllten Zustand die Lagerwege aus Temperatur (Lastfälle 5R bis 8R) deutlich geringer werden, dass aber die Wasserlast zu Trägerverkrümmungen in der vertikalen Ebene führt, mit der Folge horizontaler Verschiebungen in den Lagern.

4.1.5 Leerer Trog

LF 1R leerer Trog – Sommer, Tagsituation

Die Teilflächentemperaturen für sommerliche Verhältnisse sind aus Simulationen für strahlungsreiche Sonnentage, entsprechend hoher Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit sowie geringen Windgeschwindigkeiten abgeleitet. Kennzeichnend für die Beanspruchungskombination sind hohe Blechtemperaturen im Trogboden und den Trogwänden. Im Gesamttragwerk bauen sich sowohl vertikale als auch horizontale Temperaturunterschiede auf. Für die Teilquerschnitte Längsträger, Querträger und Trogwandträger können aus dieser Kombination die Krümmungen aus Temperatur um die Hauptbiegeachse bestimmt werden. Abhängig von den Verschattungseinflüssen auf dem Trogboden und den Trogwänden ist eine Unterscheidung in die Kombinationen 1Rv und 1Rh vorzunehmen.

LF 1Rv – vertikaler Temperaturunterschied

Dieser Zustand kann sich bei Nord-Süd ausgerichteten Brücken einstellen, wenn die Sonne den Trog ohne Schattenbildung erwärmen kann.

Tabelle 12: LF 1Rv

Querschnitts-Bereich	Elementtemperaturen			Bemerkung
	T _k in °C	T _{R=1J} in °C	T _{R=14d} in °C	
DB	70	60	50	
BU	30	25	22	
WI	73	63	53	sonnenbeschienen
	43	38	33	verschattet (Vorbau, Leitwerk)
WA	73	63	53	sonnenbeschienen
	43	38	33	verschattet
DF	70	60	50	ohne Fahrbahnbelag
	65	55	45	Fahrbahnbelagdicke a = 2 cm
	62	52	42	Fahrbahnbelagdicke a = 4 cm
	50	42	32	Fahrbahnbelagdicke a = 10 cm
WB	30	25	22	

LF 1Rh – horizontaler Temperaturunterschied

Dieser Zustand kann sich bei Ost-West ausgerichteten Brücken einstellen, wenn Teil-Verschattungen wie in den Bildern 15 und 16 auftreten.

Tabelle 13: LF 1Rh

Querschnitts-Bereich	Elementtemperaturen			Bemerkung
	T_k in °C	$T_{R=1J}$ in °C	$T_{R=14d}$ in °C	
DB	70	60	50	sonnenbeschienen
	30	25	22	verschattet
BU	30	25	22	
WI	73	63	53	sonnenbeschienen
	43	38	33	verschattet durch Vorbau Leitwerk
	30	25	22	verschattet (vgl. Bild 15)
WA	73	63	53	sonnenbeschienen
	30	25	22	verschattet (vgl. Bild 15)
DF	70	60	50	ohne Fahrbahnbelag
	65	55	45	Fahrbahnbelagdicke $a = 2$ cm
	62	52	42	Fahrbahnbelagdicke $a = 4$ cm
	50	42	32	Fahrbahnbelagdicke $a = 10$ cm
WB	30	25	22	

LF 2R leerer Trog – Sommer, Nachtsituation

Die Beanspruchungssituation 2R steht für Temperaturverteilungen einer nächtlichen Auskühlung des Bauwerks. Firmamentseitig orientierte Bauteile des Brückentragwerks kühlen auf Temperaturen unterhalb der Lufttemperatur ab, wohingegen bodenseitig gerichtete Konstruktionselemente aufgrund zugeführter Wärmestrahlung i.d.R. höhere Temperaturen als die Lufttemperatur haben. Es stellen sich durchgängig Temperaturunterschiede „unten wärmer als oben“ ein. Eine Horizontalkrümmung tritt nicht auf.

Tabelle 14: LF 2R

Querschnitts-Bereich	Elementtemperaturen			Bemerkung
	T_k in °C	$T_{R=1J}$ in °C	$T_{R=14d}$ in °C	
DB	8	14	18	
BU	18	22	24	
WI	8	14	18	
WA	8	14	18	
DF	8	14	18	ohne Fahrbahnbelag
				Fahrbahnbelagdicke a = 2 cm
				Fahrbahnbelagdicke a = 4 cm
				Fahrbahnbelagdicke a = 10cm
WB	18	22	24	

LF 3R leerer Trog – Winter, Tagsituation

Die Betrachtung eines winterlichen Schönwettertages braucht nicht gesondert untersucht zu werden, da sich aufgrund flach einfallender Sonnenstrahlung im Trogbodendeckblech geringere Temperaturen einstellen als in den Lastfällen 1Rv und 1Rh berücksichtigt. Auch die zeitgleich zu erwartenden Temperaturen in den Stegen und Untergurten der Längs- und Querträger des Trogbodens führen nicht zu größeren Verkrümmungen als in den zuvor genannten Lastfällen bereits berücksichtigt. In den senkrechten Trogwänden sind bei winterlichen Verhältnissen zwar hohe Strahlungsintensitäten zu erwarten, aufgrund verkürzter Sonnenscheindauer sind aber keine sommerlichen Zuständen vergleichbare Temperaturen möglich. Für temperaturbedingte Krümmungen in den Aussteifungen der Trogwände gelten die Aussagen zum Trogboden analog. Lediglich zwischen den sonnenzugewandten vertikalen und horizontalen Flächen kann sich ein zu berücksichtigender Temperaturunterschied einstellen.

LF 4R leerer Trog - Winter, Nachtsituation

Die Beanspruchungskombination 4R repräsentiert Temperaturverteilungen einer nächtlichen Auskühlung des Bauwerkes bei winterlichen Verhältnissen. Es kann näherungsweise von einem konstanten Temperaturfeld von $T_N = -30^\circ\text{C}$ gemäß Abschnitt 4.1.4 ausgegangen werden.

4.1.6 Befülltes Bauwerk

Im befüllten Zustand werden die Temperaturfelder in Kanalbrücken signifikant durch die Wassertemperatur beeinflusst. Die Temperaturen sind in starkem Maße vom Unterschied zwischen Luft- und Wassertemperatur abhängig.

LF 5R befüllter Trog - Sommer, Luft wärmer als Wasser

Nicht vom Wasser benetzte Konstruktionselemente erwärmen sich entsprechend den thermischen Einflüssen aus Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windverhältnissen und Strahlung in der Brückenumgebung teilweise signifikant gegenüber der Wassertemperatur. Dadurch nehmen bei intensiver Sonnenstrahlung die Temperaturdifferenzen in einzelnen Tragwerkselementen von stählernen Kanalbrücken entsprechend große Werte an.

Tabelle 15: LF 5R

Querschnitts- Bereich	Elementtemperaturen			Bemerkung
	T _k in °C	T _{R=1J} in °C	T _{R=14d} in °C	
DB	28	25	22	unter Wasser
BU	30	25	22	
WI	28	25	22	unter Wasser
	73	63	53	über Wasser, sonnenbeschienen
	43	38	33	über Wasser, verschattet
WA	73	63	53	sonnenbeschienen
	43	38	33	verschattet
DF	70	60	50	ohne Fahrbahnbelag
	65	55	45	Fahrbahnbelagdicke a = 2 cm
	62	52	42	Fahrbahnbelagdicke a = 4 cm
	50	42	32	Fahrbahnbelagdicke a = 10cm
WB	30	25	22	

LF 6R befüllter Trog - Sommer, Wasser wärmer als Luft

Kühlt in den Nachtstunden die Luft unter die Wassertemperatur ab, sind die Außenseiten von Kanalbrücken kälter als die wasserbenetzte Innenseiten. Die Temperaturerteilungen des Bauwerks in kühlen Sommernächten mit relativ hohen Wassertemperaturen werden durch die Beanspruchungskombination 6R wiedergegeben.

Tabelle 16: LF 6R

Querschnitts-Bereich	Elementtemperaturen			Bemerkung
	T_k in °C	$T_{R=1J}$ in °C	$T_{R=14d}$ in °C	
DB	15	18	20	unter Wasser
BU	0	5	10	
WI	15	18	20	unter Wasser
	7	10	13	über Wasser
WA	0	5	10	
DF	0	5	10	ohne Fahrbahnbelag
				Fahrbahnbelagdicke a = 2 cm
				Fahrbahnbelagdicke a = 4 cm
				Fahrbahnbelagdicke a = 10cm
WB	0	5	10	

LF 7R befüllter Trog - Winter, Luft wärmer als Wasser

Mit der Beanspruchungskombination 7R soll eine Situation untersucht werden, die in den Monaten November bis Februar auftreten kann, bei der die Lufttemperatur tagsüber Werte bis 20 °C annehmen kann. Erfolgt diese Erwärmung über einen kurzen Zeitraum von ein oder zwei Tagen bei gleichzeitig geringer Wassertemperatur sind nicht unerhebliche Temperaturdifferenzen die Folge. Diese Temperaturdifferenzen betreffen den Trogboden da zwischen dem Deckblech und den Stegen und Untergurten der Längs- und Querträger Temperaturdifferenzen bis 12K auftreten. Gleichzeitig erwärmen sich die außenseitigen Trogwände durch Sonnenstrahlung, so dass die außenliegenden Flächen der Kanalbrücke gegenüber der vom Wasser beeinflussten Innenseite ebenfalls deutlich wärmer sind. Die Betriebswege erwärmen sich aufgrund des niedrigen Sonnenstandes weniger stark als senkrechte, zur Sonne gewandte Trogwandflächen.

Tabelle 17: LF 7R

Querschnitts-Bereich	Elementtemperaturen			Bemerkung
	T _k in °C	T _{R=1J} in °C	T _{R=14d} in °C	
DB	10	8	5	unter Wasser
BU	20	15	10	
WI	10	8	5	unter Wasser
	40	30	25	über Wasser, sonnenbeschienen
	30	20	15	über Wasser, verschattet
WA	50	40	30	sonnenbeschienen
	30	20	15	verschattet
DF	40	30	25	ohne Fahrbahnbelag
	35	25	20	Fahrbahnbelagdicke a = 2 cm
	30	20	15	Fahrbahnbelagdicke a = 4 cm
	20	15	10	Fahrbahnbelagdicke a = 10cm
WB	30	20	15	

LF 8R befüllter Trog - Winter, Wasser wärmer als Luft

Die Beanspruchungskombination 8R spiegelt – analog zum Sommerlastfall 6R – die Temperaturverhältnisse im Bauwerk wieder, wenn die Lufttemperatur unter die Wassertemperatur abkühlt. Im Unterschied zur Temperaturkonstellation 6R wird jedoch von einer maximalen Auskühlung des Bauwerkes ausgegangen. Die angesetzte Temperatur der vom Wasser bzw. Eis benetzten Flächen entspricht mit -5°C nicht dem Temperaturminimum. Mit den vorgegebenen Angaben der Beanspruchungskombination gemäß folgender Tabelle 18 werden jedoch die in den Tragelementen des Bauwerkes zu erwartenden Temperaturdifferenzen eingegrenzt.

Tabelle 18: LF 8R

Querschnitts-Bereich	Elementtemperaturen			Bemerkung
	T_k in $^{\circ}\text{C}$	$T_{R=1J}$ in $^{\circ}\text{C}$	$T_{R=14d}$ in $^{\circ}\text{C}$	
DB	-5	0	5	unter Wasser
BS	-30	-15	-10	
WI	-5	-0	5	unter Wasser
	-30	-15	-10	über Wasser
WA	-30	-15	-10	
DF	-30	-15	-10	ohne Fahrbahnbelag
				Fahrbahnbelagdicke a = 2 cm
				Fahrbahnbelagdicke a = 4 cm
				Fahrbahnbelagdicke a = 10cm
WB	-30	-15	-10	

4.2 Kanalbrücken mit Trapezquerschnitt**4.2.1 Allgemeines**

Analog zu Kanalbrücken mit senkrechten Seitenwänden erfordert die Anwendung des Teilflächenmodells eine Untergliederung des Bauwerkes in mehrere Teilelemente. Dabei werden thermisch gleichartig reagierende Querschnittsbereiche zusammengefasst, denen konkrete Temperaturfelder in $[^{\circ}\text{C}]$ zugewiesen werden. Die folgenden Angaben wurden aus Messungen und Simulationen an Querschnitten mit geschlossener Unterseite (mehrzelliger Hohlkasten) abgeleitet, sie gelten gleichermaßen näherungsweise auch für unten offene Querschnitte. Die Trogschräge weist entsprechend dem Regelprofil für Kanäle einheitlich eine Neigung von 1:3 auf.

Das Bauwerk wird entsprechend Bild 17 schematisch in fünf Flächenbereiche aufgeteilt, welche unter gleichartigen Randbedingungen ein nahezu einheitliches Temperaturverhalten aufweisen. Dadurch ergibt sich ein idealisiertes, abmessungsunabhängiges Temperaturfeld. Der Untergurtbereich BU ist immer verschattet und erhält in allen Situationen einheitlich die gleiche Temperatur. Die Stege zwischen Deckblech und Untergurt erhalten näherungsweise die Temperatur des Untergurtes.

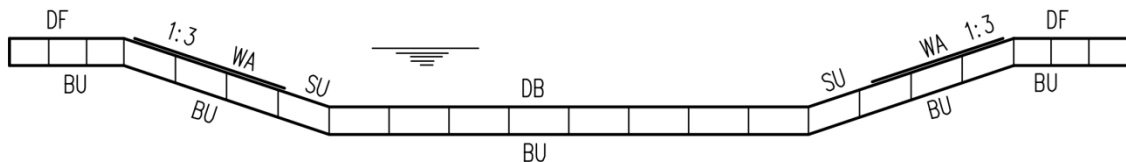


Bild 17: Definition gleichartiger Querschnittsbereiche (Teilflächen)

Folgende Querschnittsbereiche werden unterschieden, wobei je nach betrachteter Situation weiter untergliedert wird nach sonnenbeschienen und verschattet sowie wasserbenetzt.

Tabelle 19: Definition gleichartiger Querschnittsbereiche

Bezeichnung	Beschreibung
DF	Deckblech Fahrbahn (Betriebsweg) mit ggfls. unterschiedlichen Asphaltstärken
DB	Deckblech Boden des Troges
WA	Schräge im Bereich des Wellenaufschlag- und Anprallschutzes , bei Befüllung größten Teils unter Wasser
SU	Schräge unterhalb des Wellenaufschlag- und Anprallschutzes
BU	Boden Untergurt eines Hohlkastens oder eines offenen Querschnittes

Die geneigte Trogwand besteht im unteren Bereich SU (im Allgemeinen etwa > 3,0m in der Schräge) aus dem normalen Deckblech analog DB. Im oberen Bereich WA der Schräge ist auf dem Deckblech eine flächige Schutzschicht angeordnet. Im Fall der Leineflutbrücke am MLK, an welcher die Untersuchungen durchgeführt wurden, ist diese rund 13 cm bis 15 cm dicke Schutzschicht wie folgt aufgebaut:

- Im oberen Teil von WA, vom Betriebsweg bis etwa 1 m (lotrecht gemessen) unter dem Wasserspiegel besteht sie aus in Mörtel verlegten Schüttsteinen als Schutz gegen Wellenschlag, Auftrag bis 15 cm.
- Darunter als Anfahrerschutz gegen Schiffe besteht die Schutzschicht aus einer zusätzlichen 12 mm dicken Blechverstärkung und darüber aufgebrachtem Beton mit 12 cm Stärke.

Für stählerne Kanalbrücken mit Trapezquerschnitt werden nur die seltenen (charakteristischen) Temperaturwerte mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren dargestellt. Temperaturansätze für davon abweichende Wiederkehrperioden können aus den Angaben für Kanalbrücken mit Rechteckquerschnitt abgeleitet werden.

4.2.2 Beanspruchungskombinationen

In der folgenden Tabelle 20 werden die maßgebenden Beanspruchungskombinationen gelistet, unterschieden zwischen leerem und befüllten Trog.

Für stählerne Kanalbrücken mit Trapezquerschnitt werden nur die seltenen (charakteristischen) Temperaturwerte mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren dargestellt.

Tabelle 20: Beanspruchungskombinationen

Befüllungs-zustand	Jahreszeit	Tageszeit	Randbedingungen	Lastfall
Leer Bauzustand Revision	Sommer	Tag	maximale Erwärmung in [°C]	1T
	Winter	Nacht	max. Bauwerksauskühlung in [°C]	2T
	Sommer	Tag	horizontaler Temperaturunter-schied	3T
	Sommer	Tag	maximaler positiver vertikaler Temperaturunterschied ΔT	4T
	Sommer/Herbst	Nacht	maximaler negativer vertikaler Temperaturunterschied ΔT	5T
Befülltes Bauwerk Betriebszustand	Sommer/Herbst	Nacht	wasserbenetzt: positives ΔT Betriebsweg: negatives ΔT	6T
	Sommer	Tag	positive Temperaturunterschiede ΔT über gesamten Querschnitt	7T
	Sommer	Tag	wasserbenetzt: negatives ΔT Betriebsweg: positives ΔT	8T
	Frühjahr	Nacht	negative Temperaturunterschiede ΔT über gesamten Querschnitt	9T

4.2.3 Lagerwege aus Temperatureinwirkung

Für die Ermittlung der Lagerwege aus Temperatur wird der leere Trog maßgebend. Folgende Temperaturschwankung (konstantes Temperaturfeld) ohne Temperaturunterschiede ist anzusetzen: von $T_N = + 60^\circ\text{C}$ bis $T_N = - 30^\circ\text{C}$.

4.2.4 Temperatureinwirkungen auf das leere Bauwerk (Bauzustand, Revision)

Die ersten beiden Lastfälle 1T und 2T (Bilder 18 und 19) sind extreme Situationen mit tatsächlich möglichen Temperaturfeldern in $[\text{C}]$. Bei den 3 Lastfällen 3T bis 5T (Bilder 20 bis 22) werden die ungünstigsten Temperaturgradienten in horizontaler und vertikaler Richtung betrachtet. Die konstante Basistemperatur T_N wird entsprechend der zugehörigen klimatischen Situation sinnvoll angenommen. Die bei 3T bis 5T ausgewiesenen Temperaturfelder in $[\text{C}]$ sind somit nicht als Absolutwerte zu verstehen. Entscheidend sind die damit definierten Temperaturunterschiede zwischen den Teilflächen, die zu Verformungen und/oder Zwangsschnittgrößen führen.

LF 1T: leerer Trog unter maximaler Bauwerkserwärmung

Die maximale Bauwerkserwärmung wird unter hochsommerlichen Verhältnissen am Nachmittag auftreten. Die nach oben weisenden Deckbleche sind alle sonnenbeschienen, der Untergurt liegt im Schatten, so dass gleichzeitig ein vertikaler Temperaturunterschied entsteht. Das Temperaturfeld ist symmetrisch, es entsteht kein horizontaler Temperaturunterschied.

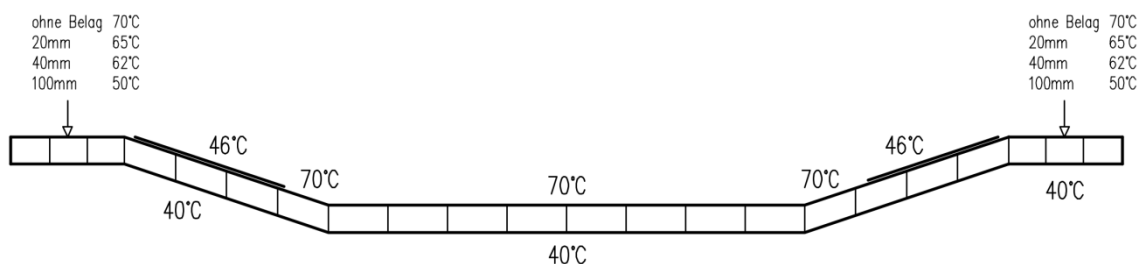


Bild 18: LF 1T, sommerliche Tagsituation, maximale Temperaturerhöhung

LF 2T: leerer Trog unter maximaler Bauwerksauskühlung

In windstillen, wolkenlosen Winternächten mit extrem niedrigen Lufttemperaturen kühlt auch das Kanalbrückenbauwerk sehr stark aus. Dabei unterkühlen nach oben gerichtete Stahlbleche stärker als die Steg- und Untergurtbereiche der Längs- und Querträger. Das Temperaturfeld ist symmetrisch, es entsteht kein horizontaler Temperaturunterschied.

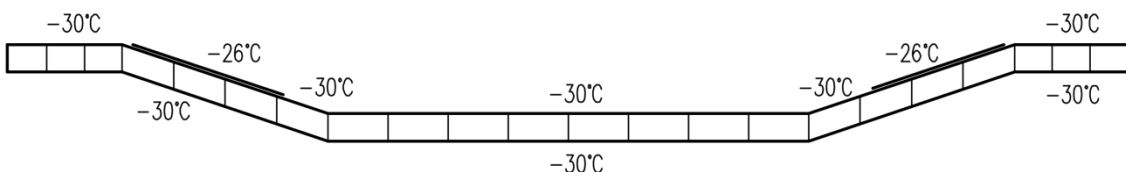


Bild 19: LF 2T, winterliche Nachtsituation, maximale Bauwerksauskühlung

LF 3T: leerer Trog, horizontaler Temperaturunterschied

Aus der Trogwandneigung und der damit verbundenen unterschiedlichen Erwärmung gegenüberliegender Trogwandseiten entsteht bei sommerlichen Verhältnissen im Bauwerk ein horizontaler Temperaturunterschied, der bei einer West-Ost ausgerichteten Kanalachse maximal werden kann. Dieser führt zu einer Querverkrümmung der Kanalbrücke. Wegen der geringen Neigung der Trogwände entsteht auf der Oberseite kein Schatten. Die verschattete Unterseite der Konstruktion weist ein gleichmäßiges Temperaturfeld auf.

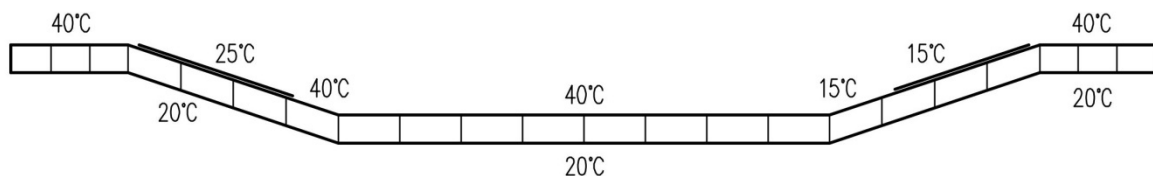


Bild 20: LF 3T, maximaler horizontaler Temperaturunterschied

LF 4T: leerer Trog, maximaler vertikaler Temperaturunterschied positiv (Oberseite wärmer)

In sommerlichen Phasen mit täglicher starker Erwärmung durch direkte Sonneneinstrahlung und großer nächtlicher Auskühlung bei klarem Himmel, können sich maximale vertikale Temperaturunterschiede einstellen, die tagsüber positiv (Oberseite wärmer, siehe Bild 21) und nachts negativ (Bild 22) werden. Letztere Situation tritt vornehmlich im Herbst auf.

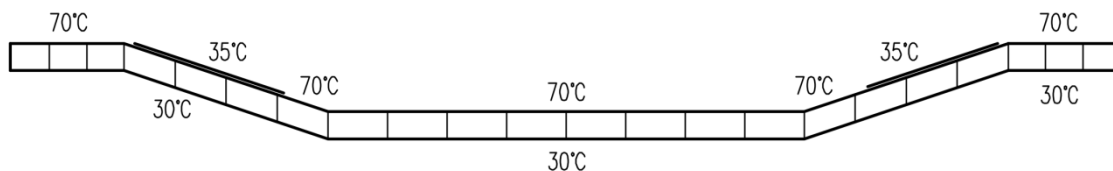


Bild 21: LF 4T, positiver Temperaturunterschied

LF 5T: leerer Trog, maximaler vertikaler Temperaturunterschied negativ (Oberseite kühler)

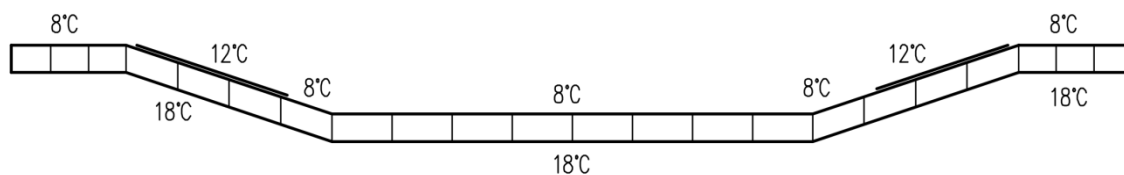


Bild 22: LF 5T, negativer Temperaturunterschied

4.2.5 Temperatureinwirkungen auf das befüllte Bauwerk (Betriebszustand)

Durch die Befüllung erhalten alle wasserbenetzten Flächen DB, SU und WA_{Wasser} näherungsweise dieselbe Temperatur wie das Kanalwasser. Die Wassertemperatur kann über den Tag hinweg als konstant angesehen werden und entspricht näherungsweise der mittleren Lufttemperatur der vorangegangenen Tage. Auf Grund der horizontalen Ausrichtung wird sich die Fahrbahn (Betriebsweg) DF stärker aufheizen oder tiefer auskühlen als die nicht wasserbenetzte Schräge WA oberhalb des Wasserspiegels. Zur Vereinfachung und auf der ungünstigen Seite liegend erhält diese Teilfläche die gleiche Temperatur wie das Deckblech DF.

Auf Grund dieser Annahmen entstehen beim wasserbefüllten Trapezquerschnitt keine horizontalen Temperaturunterschiede, sondern nur vertikale. Wie bei den Lastfällen 3T bis 5T des leeren Troges wird die konstante Basistemperatur T_N entsprechend der zugehörigen klimatischen Situation sinnvoll angenommen. Die ausgewiesenen Temperaturfelder in [°C] sind somit nicht als Absolutwerte zu verstehen, entscheidend sind die vertikalen Temperaturunterschiede.

LF 6T: positiver Unterschied bei wasserbenetzten Flächen, negativer Unterschied im Betriebsweg

Bei kühler Wetterlage im Herbst kann das Kanalwasser erheblich wärmer sein als der ausgekühlte Untergurtbereich. Bei gleichzeitig nächtlicher Auskühlung bei klarem Himmel ist der Betriebsweg kühler als der Untergurt.

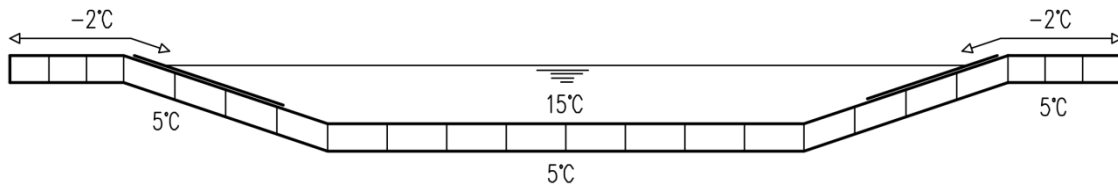


Bild 23: LF 6T, positive Temperaturunterschiede im Wasserbereich, negative beim Betriebsweg

LF 7T: positive Temperaturunterschiede über gesamten Querschnitt

In einer hochsommerlichen Erwärmungssituation tritt im Betriebswegbereich ein positiver vertikaler Temperaturunterschied auf. Bei gleichzeitig sehr warmem Kanalwasser liegen auch die Deckblechtemperaturen im Kanaltrog über denen der Untergurte.

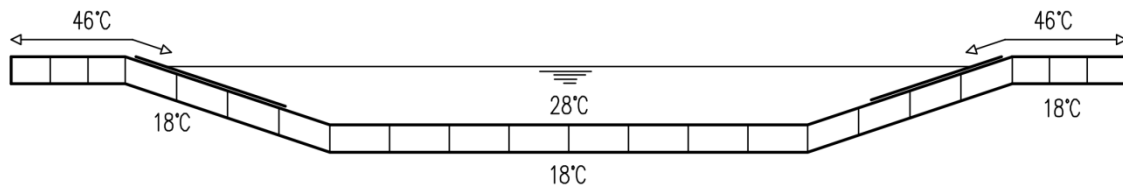


Bild 24: LF 7T, positive Temperaturunterschiede über gesamten Querschnitt

LF 8T: negativer Unterschied bei wasserbenetzten Flächen, positiver Unterschied im Betriebsweg

In einer hochsommerlichen Erwärmungssituation tritt im Betriebswegbereich ein positiver vertikaler Temperaturunterschied auf. Geht dieser starken Erwärmung eine kühlere Wetterphase voraus, so ist auch die Kanalwassertemperatur entsprechend niedrig. Dementsprechend liegen im Kanaltrug die Deckblechtemperaturen unter denen der Untergurte.

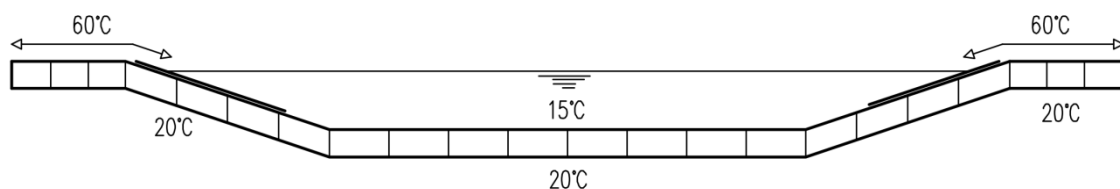


Bild 25: LF 8T, negative Temperaturunterschiede im Wasserbereich, positive beim Betriebsweg

LF 9T: negative Temperaturunterschiede über gesamten Querschnitt

Bei nächtlicher Auskühlung tritt im Betriebswegbereich ein negativer vertikaler Temperaturunterschied auf. Wenn aus vorangegangener kalter Wetterlage das Kanalwasser kälter als die Untergurte ist, wird im wasserbenetzten Trogbereich über die Trägerhöhe ein negativer Temperaturunterschied auftreten.

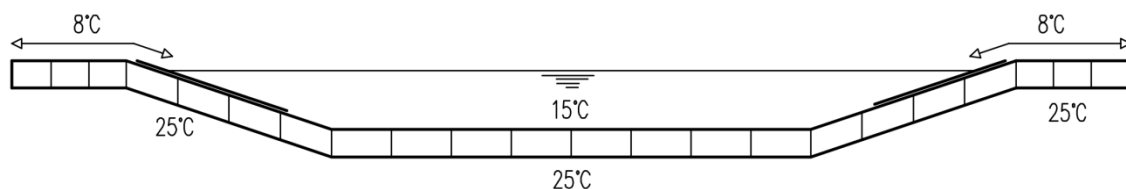


Bild 26: LF 9T, negative Temperaturunterschiede über gesamten Querschnitt

5 Empfehlungen für Lagereinbau und Lageraustausch

5.1 Allgemeines

Als Lager für Kanalbrücken kommen geregelte Bauprodukte der Normenreihe DIN EN 1337 in Betracht wie z.B. Elastomerlager, Topflager und Kalottenlager. Ein statisch bestimmtes bzw. zwängungsarmes Lagerungssystem ist im Entwurf anzustreben. Es kann günstig sein, entkoppelt vom Vertikallager eine gesonderte Festhaltekonstruktion für Horizontalkräfte vorzusehen, um beim Lagertausch keine provisorische Festhaltekonstruktion entwickeln zu müssen.

Bei Lagern mit horizontalen Gleitflächen wird empfohlen, den Kippteil oben und den Gleitteil unten anzuordnen. Dadurch werden bei großen Verdrehungen Zwängungen vermieden. Die daraus resultierende Ausmitte der Lagerkraft infolge der Lagerverschiebung ist bei der Bemessung der Unterbauten zu beachten.

An den Lagereinbau und Lageraustausch an Kanalbrücken sind hohe Anforderungen an die Ausführungsgenauigkeit zu stellen. Schon geringe Abweichungen von der Soll-Höhenlage und -neigung des Überbaus über einem Auflager führen zu erheblichen Abweichungen der tatsächlichen Auflagerkraft von der projektierten Größe. Lagefehler beim Lagereinbau kommen als Ursache für Lagerschäden durch unplanmäßige abhebende Reaktionskräfte ebenso in Betracht, wie unzureichend berücksichtigte thermische Verformungen. Mit unzutreffend eingestellten Lagerkräften sind gleichzeitig von den Sollwerten abweichende Tragwerksbeanspruchungen verbunden.

Weitere Ursachen für Abweichungen der Auflagerkräfte von den Soll-Werten können Fertigungstoleranzen oder unplanmäßige Verformungen des Überbaus sowie der Unterbauten und des Baugrunds sein. Um den Lagereinbau mit ausreichender Genauigkeit zu gewährleisten, kommen daher geodätische Verfahren für die Einmessung nur unterstützend in Betracht. Vielmehr ist der Überbau mittels hydraulischer Pressen kraftgeregelt durch Einstellung vorab ermittelter Pressenkräfte auf die Soll-Lage einzurichten. Der Ausgleich aller unplanmäßigen Verformungseinflüsse erfolgt durch exakt aufgemessene Keilfutterbleche. Hieraus ergibt sich ein Lageraufbau gemäß Bild 27.

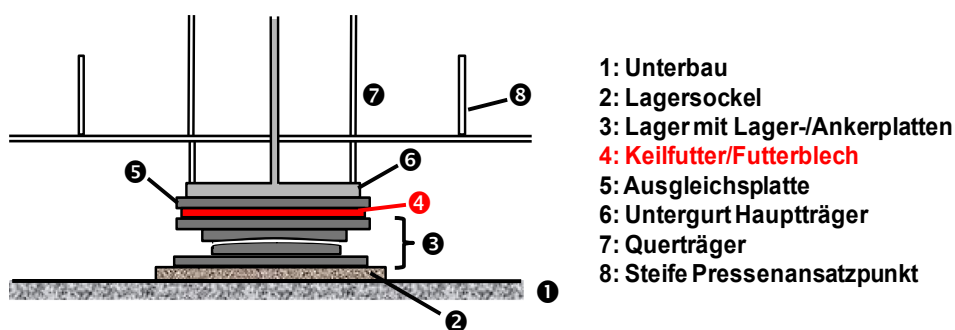


Bild 27: Schematischer Lageraufbau

Bei der Ermittlung der einzustellenden Soll-Pressenkräfte müssen erwartete Temperatureinflüsse berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, ein verformungsneutrales Temperaturfeld zugrunde zu legen. Das setzt voraus, dass durch eine entsprechende messtechnische Überwachung über einen ausreichend langen Zeitraum (mindestens drei Tage) der Zeitpunkt ausgeglichener Temperaturfelder zuverlässig bestimmt werden kann.

Veränderungen der Höhenlage eines Brückenüberbaus an der Einbauposition eines einzelnen Lagers führen stets zu Kräfteänderungen an den benachbarten Auflagern. Das Anheben an einer Lagerposition führt zu einem signifikanten Anstieg der Pressenkräfte bei gleichzeitiger Entlastung der daneben befindlichen Lager. Eine vollkommene Entlastung dieser benachbarten Lager tritt bei typischen Kanalbrückenkonstruktionen bereits bei Hubmaßen auf, die einem Bruchteil des für einen Lageraustausch erforderlichen Hubmaßes von 10mm entsprechen.

Bei Kanalbrücken mit typischen Lagerabständen in Querrichtung ist ein Anheben über einzelnen Lagern im Regelfall nicht vorgesehen bzw. ohne Verstärkungsmaßnahmen an den Pressenansatzpunkten/Pressenstellflächen nicht möglich. Zur Vermeidung abhebender Lagerreaktionen an benachbarten Auflagern muss der Überbau an allen Lagerpositionen in einer Querachse annähernd synchron angehoben und ebenfalls annähernd synchron abgesenkt werden.

5.2 Kräftemessung und Kräfteregelung bei Hub- und Absenkvorgängen

Für das synchrone Anheben und Absenken ist an allen Pressen bzw. Pressenpaaren eine Kräfte- bzw. Drucküberwachung erforderlich. Hub-/Absenkvorgänge können mittels wiederholten Sequenzen aus schrittweisem Ansteuern von Einzelpressen/gekoppelten Pressenpaaren in einer vorab festzulegenden Schrittfolge vorgenommen werden.

Bei der Festlegung der maximalen Kräfteänderung eines Hub-/Absenkschritts sind die Umlagerungskräfte an benachbarten Pressenansatzpunkten zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für Absenkvorgänge, wenn Umlagerungskräfte infolge vollständigen Ablassens von Einzelpressen in den Nachweisen der benachbarten Pressenansatzpunkte und Pressenstellflächen nicht berücksichtigt sind.

5.3 Temperaturüberwachung

Permanent wechselnde klimatische Verhältnisse haben instationäre Temperaturverteilungen mit entsprechenden Verformungen zur Folge, die beim Lagereinbau und der Lagereinstellung sowie erforderlichenfalls beim Anspannen von Rückverankerungen zu berücksichtigen sind.

Eine Voraussage der Temperaturverteilungen während der Ausführung von geplanten Lagereinbauarbeiten ist nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Daher sollten die Aufmaße von Futterplatten bzw. Keilfuttern sowie ggf. das Anspannen von Rückverankerungen an Zeitpunkten mit annähernd verformungsneutralen Temperaturfeldern vorgesehen werden, d.h. zu einem Zeitpunkt bei welchem über den gesamten Querschnitt nahezu gleiche Temperaturen vorliegen.

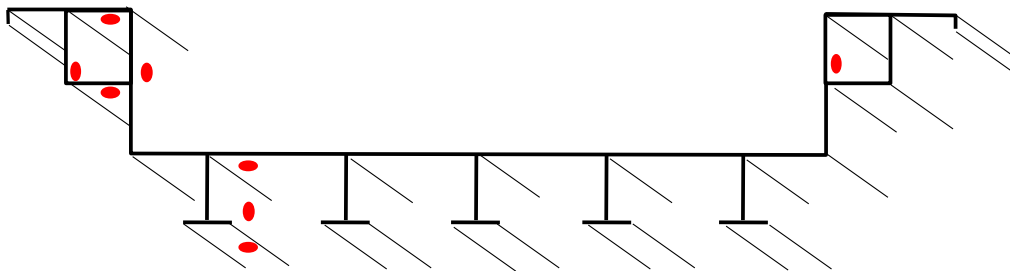
Für die Bestimmung geeigneter Zeitpunkte ist die messtechnische Überwachung der Temperaturverteilung im Bauwerk mittels eines Temperaturmesssystems erforderlich. Ein solches System besteht aus Temperaturfühlern, die an verschiedenen Stellen am Tragwerk angeordnet werden, um Temperaturdaten kontinuierlich zu erfassen. Die benötigte Anzahl von Messstellen hängt von verschiedenen Gesichtspunkten ab:

- Bauwerksabmessungen
- Orientierung des Bauwerkes
- Erforderliche Genauigkeit/Zulässige Abweichungen von ausgeglichenen Temperaturfeld
- Erforderliche Ausfallsicherheit (Redundanz)

An einem Brückenbauwerk sollten mindestens zwei Messquerschnitte angeordnet werden, um die Messwerte kontrollieren zu können und im Falle des Ausfalls einzelner Messfühler Verzögerungen im Bauablauf zu vermeiden.

Die Anzahl der Messstellen innerhalb eines Messquerschnitts muss ausreichen, um Abweichungen von einem ausgeglichenen Temperaturfeld zuverlässig zu erkennen. Ein Beispiel für die Platzierung von Thermoelementen in zwei Messquerschnitten ist in Bild 28 dargestellt.

Messquerschnitt 1 (Beispiel)



Messquerschnitt 2 (Beispiel)

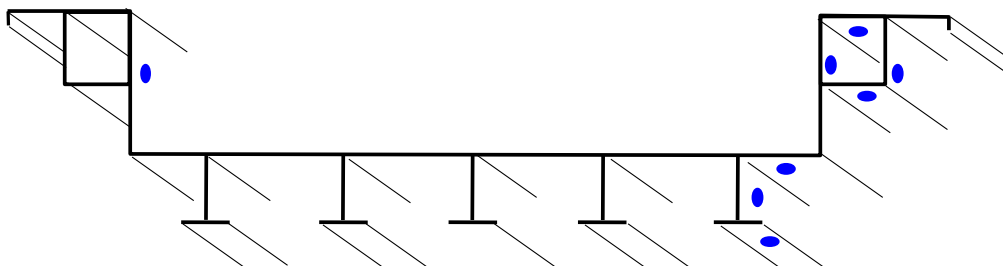


Bild 28: Beispiel für die Anordnung von Temperaturfühlern

Die Lage der Messquerschnitte in Brückenlängsrichtung kann beliebig gewählt werden, wenn Beeinflussungen durch künstliche Wärmequellen aus dem Baubetrieb sowie nicht konstruktionsbedingt verursachte Einflüsse vermieden werden, wie Verschattungseinflüsse durch angrenzende Bebauung oder angrenzenden Bewuchs.

Die Gefahr von Beschädigungen an Messfühlern durch den laufenden Baubetrieb ist durch eine geeignete Platzierung der Messquerschnitte auszuschließen. Zugleich ist anzustreben, dass die Installationen für Prüf- und Instandsetzungsarbeiten zugänglich sind.

Thermoelemente oder gleichwertige Messsensoren müssen fest mit den Bauteiloberflächen verbunden werden (z.B. Verklebung, Magnete). Thermoelemente am Trogbodenblech und an den Wandblechen dürfen an den luftseitigen Bauteiloberflächen appliziert werden.

Temperaturmesswerte müssen kontinuierlich aufgezeichnet werden, um geeignete Zeitpunkte und Zeitdauern für Aufmaßarbeiten vorhersagen und Messwerte dokumentieren zu können.

Ein Beispiel für Temperaturdatenaufzeichnungen an einer Kanalbrücke über die Zeitdauer von 4 Tagen ab dem Zeitpunkt der Trogleerung ist in Bild 29 dargestellt. Anhand der Schnitt- bzw. Berührungspunkte der Messkurven ist erkennbar, dass annähernd ausgeglichene verformungsneutrale Temperaturfelder intervallartig auftreten, in der Regel in den frühen Morgenstunden kurz nach Sonnenaufgang, abhängig von der Konstruktion auch kurz nach Sonnenuntergang.

Die Tageszeit und die Dauer dieser Zustände sind jahreszeit- und witterungsabhängig und werden von der Bauwerksausrichtung und den Oberflächeneigenschaften beeinflusst. Um eine Vorhersage des ungefähren Zeitpunkts sowie der Dauer, in der Temperaturunterschiede innerhalb eines tolerierbaren Intervalls liegen, zu ermöglichen, muss die Temperaturdatenaufzeichnung mehrere Tage vor Beginn der Lagereinbauarbeiten begonnen werden.

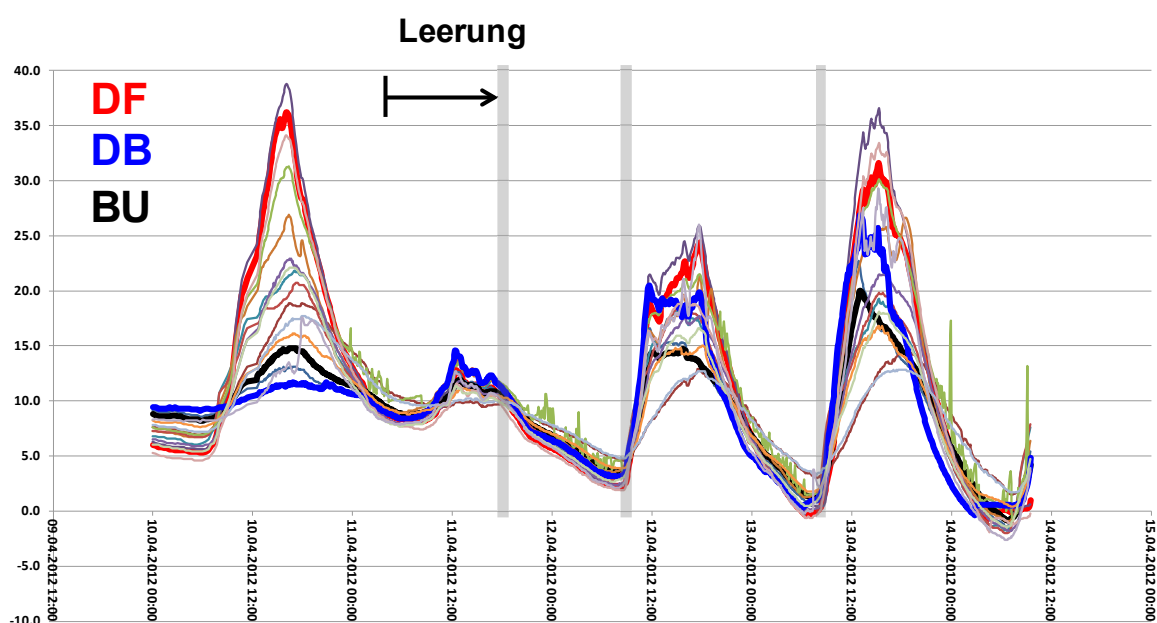


Bild 29: Beispiel Temperaturaufzeichnung

Es hat sich bewährt, die Spaltmaße für Keilplatten im Zustand ausgeglichener Temperaturen aufzunehmen und danach fertigen zu lassen. Da die Keilplatten bei dieser Fertigungsmethode den ausgeglichen Temperaturzustand repräsentieren, kann deren Einbau dann zu jedem beliebigen Zeitpunkt erfolgen. Mit diesem Vorgehen erfolgt der „Lagereinbau“ bei einer definierten und bekannten Temperaturverteilung.

5.4 Lagereinbau

Das Anheben des Überbaus ist im Allgemeinen nur an allen Lagern einer Querachse gleichzeitig möglich. Mehrere Querträgerachsen können zum Zweck des Lagerausbaus auch gleichzeitig angehoben werden.

Das Anheben des Überbaus sollte mittels hydraulisch gekoppelter Pressenpaare erfolgen, damit die Lage der Resultierenden der Pressenkräfte annähernd mit der Lage der Auflagerkraft übereinstimmt. Es müssen geeichte Pressen verwendet werden.

Die Pressen müssen mit Kalottenaufsätzen ausgestattet sein und für die Pressen Gleitebenen an der Unterseite vorgesehen werden.

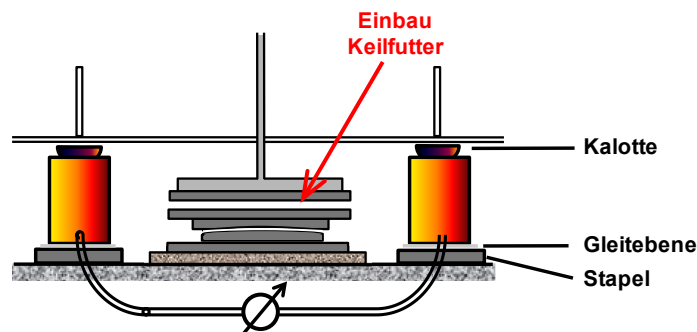
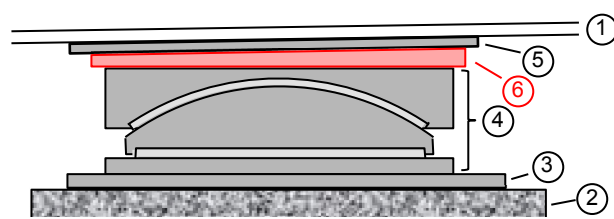


Bild 30: Pressenkonfiguration (ggf. erforderliche Sicherungsmaßnahmen sind nicht dargestellt)

Zwischen dem Anheben des Überbaus und dem Absetzen auf den Auflagern vergehen beim Lageraustausch im Allgemeinen mehrere Tage. In diesem Zeitraum ist der Überbau klimatischen Einflüssen ausgesetzt, die zu Umlagerungen der Reaktionskräfte an den Pressenstandpunkten bzw. Hilfsunterstützungen führen. Daher ist bereits beim Anheben des Überbaus ein Ausrichten im Zustand eines annähernd verformungsneutralen Temperaturfelds auf vorab hierfür berechnete Pressenkräfte zu empfehlen.

Vor dem achsweisen Versetzen der Lager sollte der Überbau in den entsprechenden Achsen auf die geplante Höhenlage abgelassen werden. Danach ist eine Einstellung der Soll-Werte der Pressenkräfte bei annähernd ausgeglichenem Temperaturfeld erforderlich.

Der Lagereinbau erfordert eine Passgenauigkeit mit einer Toleranz von $\pm 1/10$ mm um eine ausreichende Übereinstimmung der Lagerkräfte mit den voreingestellten Pressenkräften beim Lagereinbau zu erreichen. Den Anforderungen an die Passgenauigkeit sollte durch Einsatz von Keilfuttern (vergl. Bild 31, Pos. 6) genügt werden. Dadurch werden gleichzeitig Fertigungstoleranzen beim Herstellen der Lagerversockel sowie Maßtoleranzen im Überbau ausgeglichen.



Pos. 1: Überbau

Pos. 2: Verguss

Pos. 3: Ankerplatte

Pos. 4: Lager

Pos. 5: Ausgleichplatte

Pos. 6: Futterplatte / Keilfutter

Bild 31: Beispiel für den Einbau von Keilplatten an einem Kalottenlager

Unebenheiten des Überbaus im Bereich der Kontaktfläche zum Lager müssen ausgeglichen werden. Für diesen Zweck sollten erforderlichenfalls Ausgleichsbleche (vergl. Bild 31, Pos. 5) unterhalb des Überbaus angeordnet werden.

Das Versetzen der Lager ist mit absolut horizontaler Gleitebene vorzunehmen. Die Höhenlage sollte dahingehend angepasst werden, dass der verbleibende Spalt für das spätere Einfügen von

Keilfuttern in der Größe lieferbarer Futterbleche verbleibt. Fertigungsbedingte Minimal- und Maximalwerte der Blechdicken nach Angabe des Lieferanten sind zu beachten.

Nach dem Erhärten des Vergusses der Lagersockel sollten die voreingestellten Pressenkräfte bei annähernd ausgeglichenem Temperaturfeld überprüft und erforderlichenfalls korrigiert werden. In diesem Zustand ist der Spalt zwischen dem Lageroberteil und dem Überbau mit der geforderten Genauigkeit auszumessen. Für alle Lager müssen passgenaue Keilfutter angefertigt und lagerichtig eingesetzt werden.

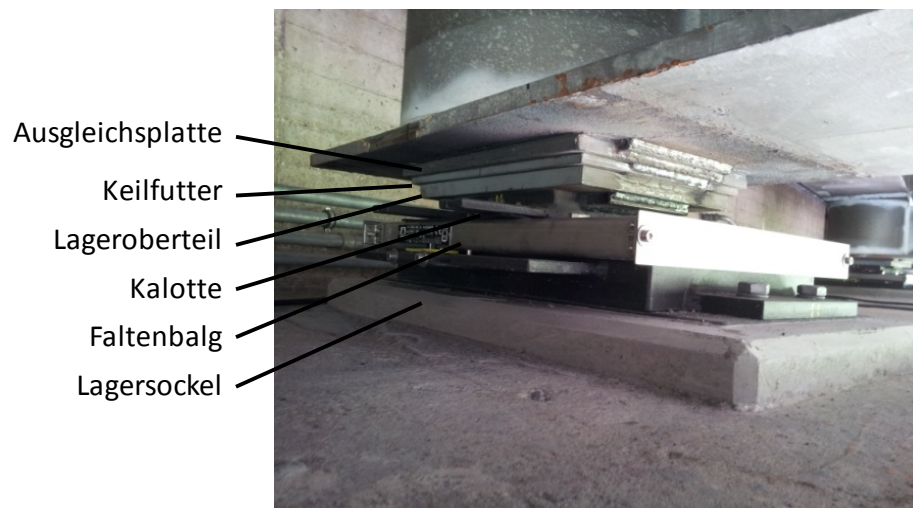


Bild 32: Beispiel eines neu eingebauten Kalottenlagers

Zum Einsetzen der Futterbleche muss der Überbau kurzzeitig an allen Lagerpunkten einer Achse geringfügig angehoben werden. Nach dem Einbau der Keilfutter werden die Pressen an allen Lagerpunkten einer Achse gleichzeitig abgelassen.

Soweit vorgespannte Rückverankerungen vorgesehen sind, darf das Anspannen der Ankerglieder auf die vorgesehenen Vorspannkräfte nur im Zustand annähernd verformungsneutraler Temperaturfelder erfolgen. Ein Lösen und Nachspannen von Rückverankerungen darf wiederum nur bei ausgeglichenen Temperaturverteilungen erfolgen.

Zeitfenster mit ausgeglichenen Temperaturfeldern liegen im Tagesverlauf nur mit vergleichsweise kurzer Dauer vor. Einstell- und Aufmaßverfahren müssen hierauf ausgerichtet werden. Kräfteinstellungen an einem Lagerpunkt verursachen stets Kräfteänderungen an den benachbarten Lagern. Das Ausrichten des Überbaus an einer Lagerachse auf vorab berechnete Werte erfordert daher ein ständiges Kontrollieren und Nachjustieren. Das Ausrichten an mehr als 20 Lagerpunkten in einem Zeitfenster mit ausgeglichenem Temperaturfeld ist daher nicht zu empfehlen. Erforderlichenfalls sollte der Lagereinbau auf mehrere aufeinander folgende Lagereinbauphasen aufgeteilt werden.

Beim Lagereinbau in mehreren nacheinander auszuführenden Einbauphasen kann es vorteilhaft sein, die Lager auf den Widerlagern zum Schluss einzubauen, da sich die entlastende Wirkung infolge des Anhebens benachbarter Lagerachsen an den Widerlagern am stärksten bemerkbar macht.

6 Literatur

- Mangerig, I.(1986) : Klimatische Temperaturbeanspruchung von Stahl- und Stahlverbundbrücken, Technisch – wissenschaftliche Mitteilung Nr. 86-4 des Institutes für konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr – Universität Bochum.
- Roik K., Mangerig I. (1987): Auswirkungen klimatischer Temperaturbeanspruchungen. Veröffentlichung im Tagungsband des International Symposium „Composite Steel Concrete Structures“, Bratislava, CSSR
- Roik K., Bergmann R., Mangerig I.(1987): Influence of climatic temperature on composite bridges, Veröffentlichung zur „Engineering Foundation Conference on composite Constructions“, Hennecker, USA .
- Roik K., Mangerig I (1988): Lastannahmen für Temperaturunterschiede bei Trog- und Deckbrücken mit kurzem Kragarm in Stahl und Verbundbauweise für die Neufassung der DIN 1072, Forschungsarbeit im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, (FE. 15.127).
- Mangerig I., Ehmann R (1999): Messtechnisch begleitete Grundsatzuntersuchungen zur klimatischen Temperatureinwirkung auf Kanalbrücken. GESA-Symposium: Anspruch und Tendenzen in der Experimentellen Strukturmechanik.
- Mangerig I., Zapfe C (2000): Auswirkungen klimatischer Temperaturbeanspruchungen auf den Einbau von Brückenlagern, Beitrag zum DAST-Forschungskolloquium am 16.05.2000 in Damstadt, München.
- Ehmann R., Mangerig I.(2001): Kanalbrücken – Besondere bauwerksspezifische Einwirkungen. Stahlbau 70, 2001 Heft 1.
- Mangerig I., Zapfe C., Retze U.(2001): Einbau von Brückenlagern unter klimatischen Bedingungen. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau 5/2001, Technische Universität München: Festschrift Albrecht, ISSN 0941-925X.
- Mangerig I.(2001): Analysen und Empfehlungen zur Temperaturbeanspruchung stählerner Kanalbrücken. Proceedings zum BAW-Kolloquium 2001: Messwertgestützte Nachweise für Wasserbauwerke.
- Mangerig, I., Lichte, U.(2000) : Klimatische Temperaturbeanspruchungen der Kanalbrücke Minden, Bericht zum BAW-Forschungsvorhaben, München (unveröffentlicht).
- Mangerig, I., Lichte, U.(2003) : Klimatische Temperaturbeanspruchung von Kanalbrücken mit geneigten Trogwänden am Beispiel der Leineflutbrücke, Bericht zum BAW-Forschungsvorhaben, München (unveröffentlicht).
- Mangerig I., Ehmann R., Zapfe C (2003): Messtechnisch begleiteter Lagereinbau an der Vorlandbrücke am Wasserstraßenkreuz Magdeburg. GESA-Symposium Sicherheit und Wirtschaftlichkeit durch Messtechnik, Monitoring und Beanspruchungsanalyse, VDI-Bericht 1757.