

Michael Pötzl
Jürgen Maisel

Entwurfsparameter für fugenlose Betonbrücken mit gekrümmtem Grundriß

Die gekrümmte Grundrißform läßt sich optimal mit der fugenlosen Bauweise kombinieren. Denn Zwängungen aus Temperaturschwankungen und Betonschwinden lassen sich durch horizontales „Atmen“ des Überbaus auf niedrigem Niveau halten. Damit können aufwendige technologische und konstruktive Maßnahmen zur Beherrschung der Rißbildung vermieden und Kosten gesenkt werden. Zudem eröffnen sich neue Gestaltungsmöglichkeiten. Im folgenden Beitrag wird gezeigt, daß zum Entwerfen gekrümmter Betonbrücken bereits wenige Parameter ausreichen.

Parameters for designing jointless concrete bridges with curved geometry in plan

The curved geometry in plan shall be advantageously combined with the jointless construction method. Constraints due to temperature and shrinkage can be considerably reduced by horizontal "relaxation" (movement) of the superstructure. In this way complicated concrete technology and constructive measures on site can be avoided to decrease cracking and reduce costs. Additionally it offers an improved aesthetic. The following contribution shows, that few parameters are sufficient for designing curved concrete bridges without bearings and joints.

1 Einleitung

Der Bogen und die Bogenbrücke können als archetypisch für den Brückenbau bezeichnet werden. Entstanden aus dem Dilemma, daß das früher verwendete Natursteinmauerwerk quasi keine Zugfestigkeit aufweist, kann der gekrümmte Grundriß ebenso intelligent zur Reduzierung der Zwangsbeanspruchungen fugenloser Konstruktionen genutzt werden. Dichte Besiedelung, topographische Randbedingungen und die Forderung nach einer flüssigen Trassierung von Straßen erfordern mittlerweile immer

Krümmung verhindert hohe Zwängungen durch seitliches Ausweichen („Atmen“)

häufiger im Grundriß gekrümmte Brücken. Fugenlose Konstruktionen haben den Vorteil, daß sie sich Zwängungen aus Temperaturschwankungen und Betonschwinden durch horizontales Ausweichen mehr oder weniger stark entziehen können. Sie verfügen damit über eine „geometrische Nachgiebigkeit“, denn Längenänderungen des Überbaus stellen sich nicht mehr als singuläre Größen an beiden Widerlagern, sondern verteilt über die gesamte Länge ein [1]. Gegenüber vergleichbaren geraden

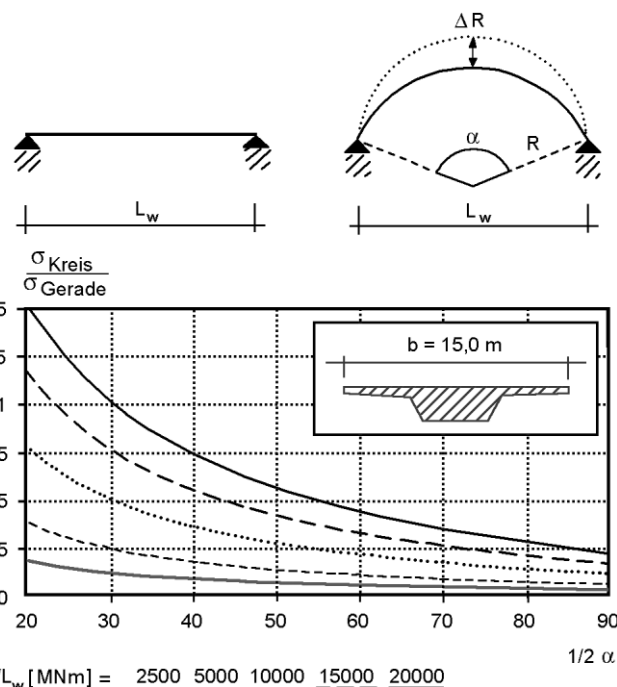


Bild 1. Maximale Normalspannungen gerader und gekrümmter Brücken [2]

Fig. 1. Maximum normal stresses of straight and curved bridges [2]

Brücken mit starren Widerlagern treten daher deutlich geringere Zwangsbeanspruchungen auf (Bild 1).

Die 526 m lange und mit einem Öffnungswinkel von $\alpha = 60^\circ$ gekrümmte, fugenlose Sunniberg-Brücke bei Klosters (CH) ist eindrucksvoller Beleg für die Symbiose aus günstigem Tragverhalten und hoher Gestaltqualität (Bild 2).

2 Verformungsverhalten

Wesentlich für das Verformungsverhalten ist neben dem Öffnungswinkel α auch die Steifigkeit von Stützen und Widerlager. Anhand einer typischen Straßenbrücke sollen diese drei Einflußparameter nachfolgend näher betrachtet werden. Grundlage sind rechnerische Untersuchungen im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens „Fugenlose Betonbrücken“ [3], [4]. Außer Betracht bleibt hier der bereits angedeutete günstige Einfluß eines Bogens im Aufriß, der sich beispielsweise aus einem gevouteten Überbau mit „gekrümmter“ Schwerachse ergibt.



Bild 2. Sunniberg-Brücke bei Klosters (Schweiz)
Fig. 2. Sunniberg-Bridge near Klosters (Switzerland)

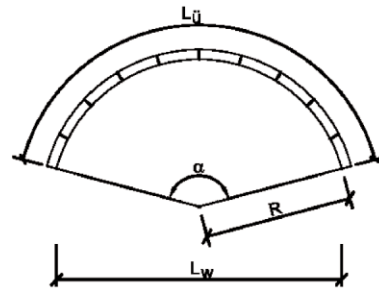


Bild 3. Grundrißgeometrie des statischen Systems und Bezeichnungen
Fig. 3. Geometry of static system and notations

Typ	Widerlager	Stützen
B1	frei drehbar	Stahlstützen Ø 457/10 mm
B2	frei drehbar	Betonrundstützen Ø 150 cm
B3	frei drehbar	Betonstützenscheiben 90/350 cm
B4	c=3.000 MN/rad (weiche Feder)	Stahlstützen Ø 457/10 mm
B5	c=10.000 MN/rad (steife Feder)	Stahlstützen Ø 457/10 mm
B6	voll eingespannt	Stahlstützen Ø 457/10 mm

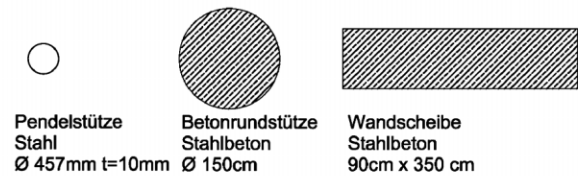


Bild 4. Systemvarianten
Fig. 4. Types of static systems

Ausgehend von einer für Bundesstraßen üblichen Entwurfsgeschwindigkeit von 80 km/h ist ein Mindestradius $R = 250$ m einzuhalten. Für einen gewählten Widerlagerabstand von $L_W = 400$ m ergibt sich daraus eine mit dem Öffnungswinkel α variable Brückenlänge L_U zwischen 400 m und 444 m (Bild 3). Die Schlankheit des Überbaus wird mit $1/20$ der Feldweite für alle Öffnungswinkel konstant gehalten, so daß die Querschnittshöhe des Überbaus variabel ist. Der fugenlose Überbau, ein zweistegiger und 11,0 m breiter Plattenbalkenquerschnitt aus Beton C 45/55 wird in zehn Felder, das heißt acht gleich lange Innenfelder und zwei auf 80% verkürzte Randfelder unterteilt. Beide Endauflager sind unverschieblich, ihre horizontale Rotationsfähigkeit wird über lineare Drehfedern abgebildet. Als Stützen werden die in Bild 4 dargestellten Querschnitte betrachtet. Sie repräsentieren die ganze Bandbreite der möglichen Horizontalstei-

figkeiten, von der weichen Stahlstütze aus Hohlprofilen bis zur steifen Stützenscheibe aus Beton. Mit Ausnahme der breiten Betonstützenscheiben werden jeweils Stützenpaare betrachtet. Die Lastannahmen einschließlich der Verkehrlastmodelle und indirekten Einwirkungen sowie die Einwirkungskombinationen entsprechen DIN-Fachbericht 101. Die erforderliche Längsvorspannung wurde für die Anforderungsklasse D ermittelt, da korrosionsgeschützte Spannglieder ohne Verbund verwendet werden. Die FE-Berechnungen erfolgten mit linear-elastischen Werkstoffgesetzen.

Besonders großen Einfluß auf die Horizontalverformungen des Überbaus haben die Stützen (Bild 5). Sind diese horizontal steif (Typ B2, B3), bleibt die Überbauverformung klein. Dies betrifft insbesondere die Wandschei-

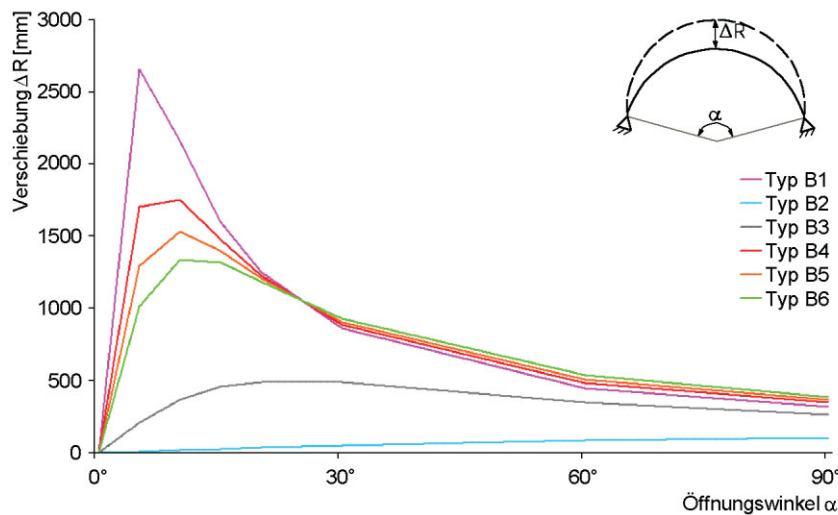


Bild 5. Maximale Horizontalverschiebung des Überbaus
Fig. 5. Maximum horizontal deformation of the superstructure

ben, die die Verformungsfähigkeit des Überbaus über die gesamte Brückenlänge stark einschränken. Ganz anders verhalten sich dagegen nachgiebige Stützen (Typ B1, B4, B5, B6), die erwartungsgemäß sehr große Verschiebungen ermöglichen und für die hier zugrunde gelegten Systemabmessungen bei Öffnungswinkeln α zwischen 10° und 15° mit ihren maximalen Werten auftreten. Bei stärker gekrümmtem Grundriß ($\alpha > 25^\circ$) unterscheiden sich die Horizontalverschiebungen nicht mehr wesentlich. Die hier errechneten Verschiebungsgrößen bis zu 2500 mm zeigen aber, daß sich schwach gekrümmte Grundrisse allenfalls für Talbrücken mit hohen Pfeilern eignen, damit die Zwängungen in den Pfeilern beherrschbar bleiben (Bild 2).

3 Auswirkungen der Zwängungen

3.1 Beanspruchung der Stützen und Widerlager

Stützen fugenloser Brücken werden nicht nur aus Windlasten, sondern auch aus der Rahmenwirkung und den eingprägten horizontalen Kopfverschiebungen infolge Temperatur und Betonschwinden beansprucht (Bild 6). Steife Wandscheiben hindern den Überbau am seitlichen Ausweichen und führen zu einem stetigen Anstieg der Biegemomente. Schlanke Stützen leisten weniger Verformungswiderstand und pendeln sich mit der Beanspruchung für

Öffnungswinkel $\alpha > 30^\circ$ auf ein annähernd gleichbleibendes Niveau ein.

Große Grundrißkrümmung erfordert filigrane weil nachgiebige Stützen

Es wird deutlich, daß sich Brücken mit stark gekrümmtem Grundriß und nachgiebigen Stützen besonders für die fugenlose Bauweise eignen. Zwängungen werden zwar „zu Lasten“ großer horizontaler Stützenkopfverschiebungen reduziert, können aber bei ausreichender risseverteiler Längsbewehrung auch von Betonstützen problemlos aufgenommen werden [2]. Die erforderliche horizontale Nachgiebigkeit kann durch konzeptionelle Überlegungen gezielt erhöht werden:

- Pfahlgründung ⇒ einreihige Pfahlanordnung
 ⇒ elastische Einspannung
- Flächengründung ⇒ klaffende Fuge
 ⇒ elastische Einspannung
- Stützen ⇒ paarweise Anordnung
 ⇒ geringe Quersteifigkeit
- Stützenform ⇒ variable Querschnittshöhe
 ⇒ große Querschnittskrümmung κ
- Werkstoff ⇒ Hochleistungsbeton, Stahl
 ⇒ kleine Querschnitte

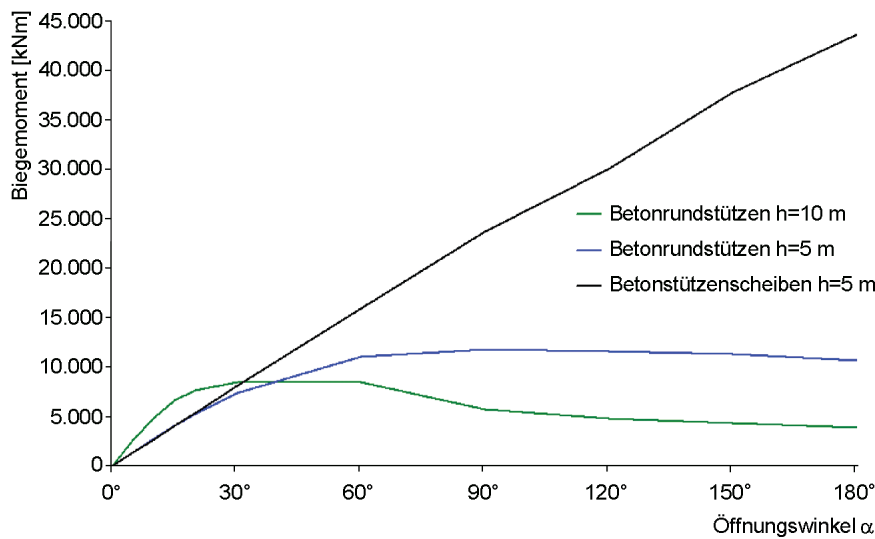


Bild 6. Maximale Momente in den Stützen

Fig. 6. Maximum bending moments of the columns

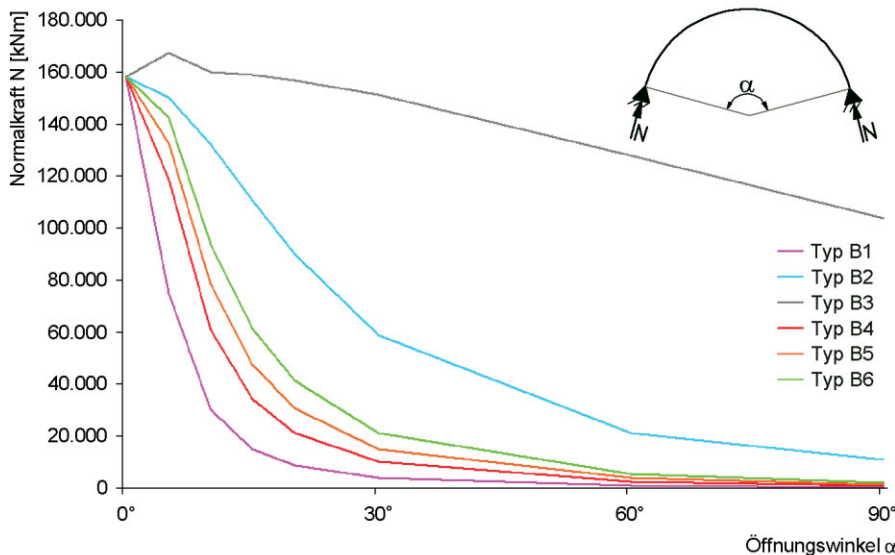


Bild 7. Längskräfte auf das Widerlager
Fig. 7. Longitudinal forces applied to the abutment

Die Widerlager fugenloser Brücken werden im Gegensatz zu denen konventioneller Brücken zusätzlich durch Längskräfte und Quermomente aus den in Abschnitt 2 beschriebenen Zwängungen beansprucht. Erwartungsgemäß erzeugen weiche Stützen (Typ B1, B6) die geringsten Längskräfte in den Widerlagern, da die Überbauverschiebungen eben kaum behindert werden. Auffällig ist auch hier, daß die Beanspruchung bei steifen Stützen (Typ B3) nur mäßig vom Öffnungswinkel abhängt (Bild 7). Die Quermomente im Überbau hängen stark von der Rotationsfähigkeit der Widerlager ab. Diese exakt zu erfassen, ist aufgrund der streuenden Bodenparameter und der komplexen Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Widerlager sehr schwierig und sollte deshalb durch eine Grenzwertbetrachtung erfaßt werden. Messungen zeigen aber, daß sich auch noch so steife Widerlager geringfügig verformen und damit zu einem signifikanten Abbau der Zwängungen beitragen können [5].

3.2 Normalkräfte im Überbau

Genauso wie die horizontalen Überbauverschiebungen hängen auch die Normalkräfte aus Temperatur und Betonschwinden primär vom Öffnungswinkel α und den

Stützen, weniger jedoch von den Widerlagern ab. In Bild 8 ist die maßgebende Lastfallkombination unter Einbeziehung des Schwindens mit einer fiktiven Abkühlung um insgesamt 47 K zugrunde gelegt. Bei weichen Stützen (Typ B1, B4, B5, B6) zeigt sich eine rasche Abnahme der Zugkraft. Für Öffnungswinkel $\alpha > 30^\circ$ wird sie bereits von der Vorspannung wieder überdrückt. Bei steifen Betonstützenscheiben (Typ B3) bleibt die Zugkraft auf vergleichsweise hohem Niveau und klingt nur allmählich ab, da der gekrümmte Überbau kaum horizontal ausweichen und sich damit „entlasten“ kann. Es zeigt sich sehr anschaulich, daß die für eine gerade Brücke charakteristischen hohen Normalkräfte bereits bei schwacher Grundrißkrümmung ($\alpha > 20^\circ$) auf ein vernachlässigbares Maß absinken.

3.3 Quermomente im Überbau

Der qualitative Verlauf des Querbiegemoments entspricht dem Verlauf des Hauptbiegemoments eines beidseitig teilweise eingespannten Balkens infolge Gleichlast. Die Rotationssteifigkeit der Widerlager kann mit dem Einspanngrad eines Balkens verglichen werden. Je steifer die Widerlager sind, desto größer werden die Endmomente. Bei starren

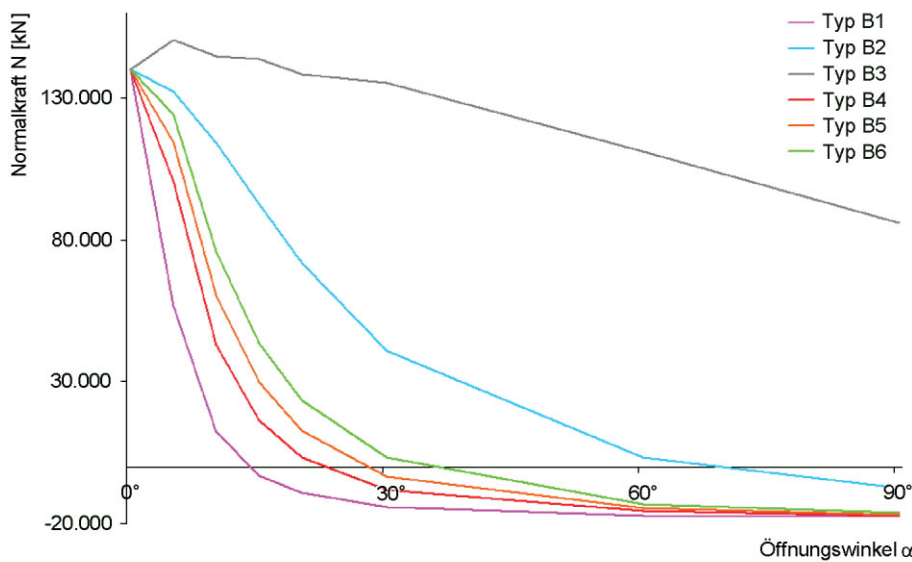


Bild 8. Maximale Normalkräfte im Überbau

Fig. 8. Maximum normal forces of the superstructure

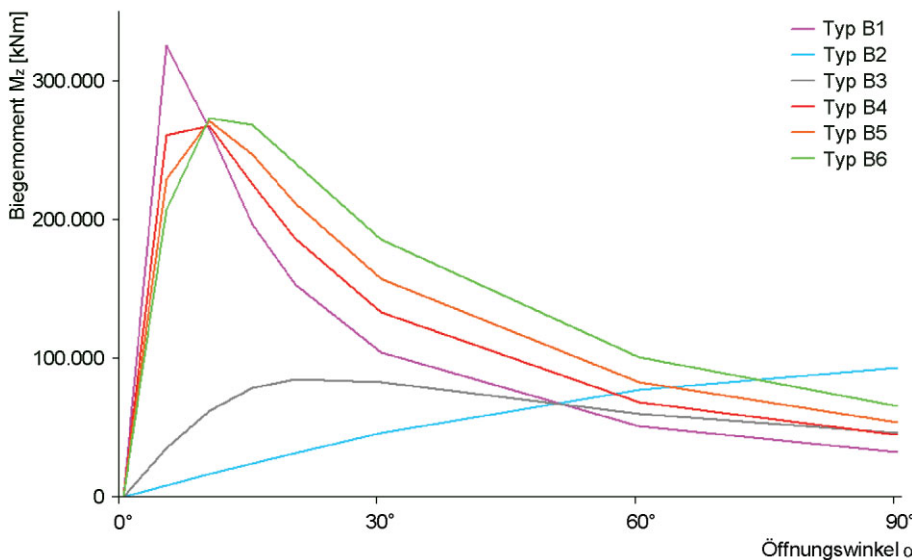


Bild 9. Quermomente in Brückenmitte
Fig. 9. Transverse bending moments in the middle of the bridge

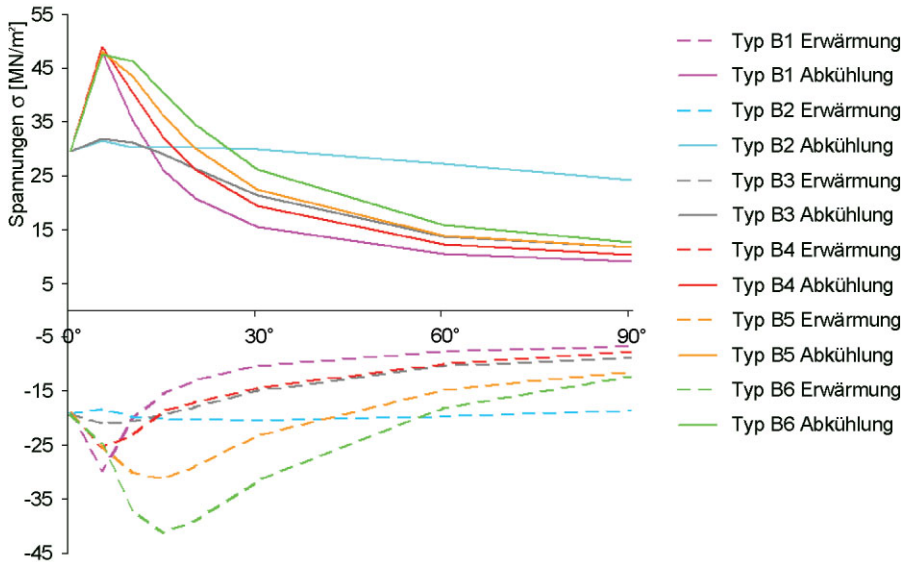


Bild 10. Maximale Randnormalspannungen im Überbau
 Fig. 10. Maximum normal stresses of the superstructure

Widerlagern werden die Endbereiche sogar für die Bemessung maßgebend. Sind die Stützen in Brückenquerrichtung steif, ähnelt der Momentenverlauf dem eines Durchlaufträgers. Die in Bild 9 dargestellten Quermomente in Brückenmitte sind zusammen mit den Normalkräften ein Maß für die Beanspruchung des Überbaus. Erwartungsgemäß steigen die Momente bei nachgiebigen Stützen rasch an und erreichen wiederum für Öffnungswinkel α zwischen 10° und 15° ihr Maximum. Insgesamt liegen sie deutlich höher als bei den steifen Stützen, da sich der Überbau stärker verformt. Je steifer die Stützen (Typ B2, B3), desto stärker werden die Quermomente „gedämpft“. Eine hohe Rotationssteifigkeit der Widerlager wirkt sich sowohl in Brückenmitte (Typ B6) als auch an den Widerlagern ungünstig aus, da das Gesamtsystem steifer wird.

3.4 Normalspannungen im Überbau

Als aussagekräftige weil integrale Größe eignen sich die Randnormalspannungen am besten, da sie Normalkräfte und Momente beinhalten. Sie sind in Bild 10 für die maßgebenden Einwirkungskombinationen unter Einbeziehung von Erwärmung und Abkühlung getrennt dargestellt. Die Verläufe spiegeln die Ergebnisse aus den vorherigen Diagrammen deutlich wider. Sowohl bei Abkühlung als auch bei Erwärmung werden für nachgiebige Stützen und Öffnungswinkel $\alpha > 45^\circ$ nur noch mäßige Randspannungen erreicht. Derartige Brücken werden also durch die fugenlose Bauweise unwesentlich zusätzlich beansprucht.

4 Empfehlungen für den Entwurf

Ausgangspunkt für den Entwurf einer fugenlosen Betonbrücke sind die unveränderlichen geometrischen Randbedingungen, die sich aus der Trassierung ergeben. Maßgebend für den einzuschlagenden „Entwurfspfad“ sind Kurvenradius bzw. Öffnungswinkel α und Lage der Gradienten über dem Gelände. Der Öffnungswinkel α gibt an, ob die Grundrißkrümmung allein ausreicht, die Zwängungen aus Temperaturschwankung und Schwinden wirksam abzubauen. In diesem Fall kann von einer geometrischen, weil aus der „natürlichen“ Krümmung des Überbaus resultierenden Nachgiebigkeit, gesprochen werden. Reicht diese

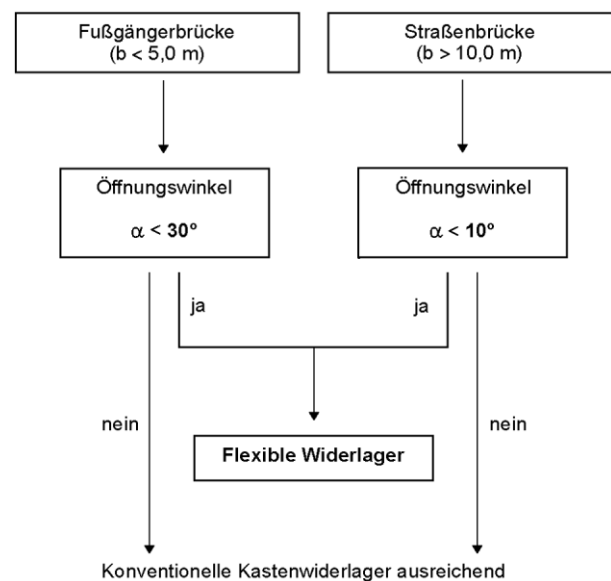


Bild 11. Kriterium für die Wahl flexibler Widerlager
 Fig. 11. Criterion for choosing of flexible abutments

Krümmung jedoch nicht aus oder ist die Brücke gerade, kann eine planmäßige Nachgiebigkeit der Widerlager in Anspruch genommen werden. In [1] ist dieses neuartige „flexible Widerlager“ und den damit möglichen Verschiebungen ausführlich beschrieben. Unter Berücksichtigung von Querschnittsform und -breite des Überbaus ist zwischen Fußgänger- und Straßenbrücke zu unterscheiden.

Kleine Grundrißkrümmung erfordert flexible Widerlager

Legt man als maßgebendes Kriterium die maximalen Betonzugspannungen in der Fahrbahnplatte zugrunde, empfiehlt es sich, bei Unterschreitung der in Bild 11 angegebenen Öffnungswinkel α flexible Widerlager vorzusehen, um die erforderliche Verformungsfähigkeit zu erzielen. Die optimale Ausbildung der Stützen und Widerlager kann wiederum über den Öffnungswinkel α festgelegt werden (Bild 12).

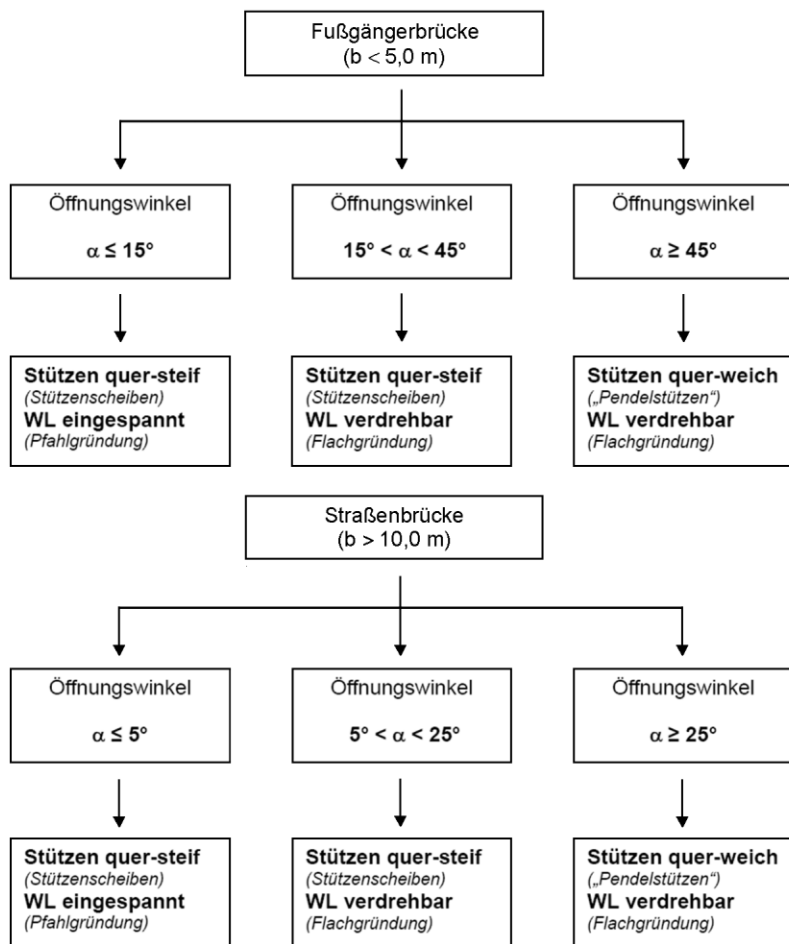


Bild 12. Kriterien zur Ausbildung der Stützen und Widerlager
Fig. 12. Criteria for choosing of the type of column and abutment

5 Schlußbemerkungen

Ein Rückgriff auf die Geschichte kann dem modernen Brückenbau neue Impulse geben. Die für den Baustoff Beton ideale, fugenlose Bauweise in Kombination mit einem ausreichend gekrümmten Überbau führen zu robusten Brücken mit großem gestalterischen Potential. Denn die „geometrische Nachgiebigkeit“ aus der Krümmung eines Bauteils eröffnet die Möglichkeit, die gefürchteten, immer zu Rißbildung führenden Zwängungen aus Abkühlung und Schwinden auf ungefährlichem Niveau zu halten.

Filigranität und Effizienz sind nicht Gegner, sondern „kongeniale“ Partner

Beim Entwerfen ist der Einstieg entscheidend, weil damit gleich zu Beginn gewisse Präferenzen gesetzt werden. Eine im Grundriß gekrümmte Brücke sollte daher gedanklich zuerst als fugenlose Konstruktion entwickelt werden. Der Öffnungswinkel gibt dabei sehr schnell einen ersten Anhalt für das weitere Vorgehen. Es zeigt sich, daß Straßenbrücken bereits mit einem Öffnungswinkel > 25° hierfür geeignet sind, wenn die Stützen filigran und schlank, das heißt nachgiebig und die Widerlager nicht zu steif, das heißt gegebenenfalls als „flexible Widerlager“ entworfen werden. Bei der Planung einer gekrümmten Brücke ist der Ingenieur in der beneidenswerten Lage, das statisch Sinnvolle mit guter Gestaltung zu paaren. Er muß es nur nutzen. Ultima ratio sollte daher die konventionell gelagerte und eben nicht die fugenlose Brücke sein!

Literatur

- [1] Pötzl, M. und Naumann, F.: Fugenlose Betonbrücken mit flexiblen Widerlagern, Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 8.
- [2] Pötzl, M.: Robuste Brücken – Vorschläge zur Erhöhung der ganzheitlichen Qualität, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1996.
- [3] Pötzl, M. und Naumann, F.: Fugenlose Betonbrücken, Shaker-Verlag 2005, in Vorbereitung.
- [4] Maisel, J.: Zur Zwangbeanspruchung fugenloser Betonbrücken mit gekrümmtem Grundriß, Diplomarbeit, Fachhochschule Coburg, 2004.
- [5] Pötzl, M. und Koch, R.: Erkenntnisse aus Messungen an der fugenlosen Brücke über das Nesenbachtal in Stuttgart, Beton- und Stahlbetonbau 96 (2001), Heft 10.



Prof. Dr.-Ing. Michael Pötzl
Fachhochschule Coburg
Fakultät Design
Friedrich-Streib-Straße 2
96450 Coburg
poetzl@fh-coburg.de



Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Maisel
DB Projekt Bau GmbH
Projektzentrum Nürnberg
Äußere Cramer-Klett-Straße 3
90489 Nürnberg
juergen.maisel@bahn.de