



Integrale Brücken

Entwurf, Berechnung, Ausführung, Monitoring

Roman Geier
Volkhard Angelmaier
Carl-Alexander Graubner
Jaroslav Kohoutek

Vorwort

Seit etwa 15 Jahren sind in der D-A-CH-Region (Deutschland – Österreich – Schweiz) Rahmenbauwerke – sogenannte integrale Brücken – stärker in den Fokus von Bauherren, Planern, Prüfern und ausführenden Firmen gerückt. Folglich waren in den Normungs- und Fachausschüssen der einzelnen Länder vermehrte Aktivitäten zu verzeichnen, um für die integrale Bauweise abgesicherte Grundlagen und Regelwerke zur Verfügung stellen zu können, welche zu einer weiteren Verbreitung und Anwendung dieses Brückentyps führen sollten.

Im Zuge des internationalen Austausches dieser Arbeitsausschüsse zwischen Deutschland, Österreich und der Schweiz hat sich im Jahr 2011 auf Anregung des Verlags Ernst & Sohn eine internationale Gruppe von Ingenieuren formiert. Die Gemeinsamkeit dieser Personen bestand neben maßgebenden Rollen in den jeweiligen nationalen Arbeitsausschüssen darin, dass in ihrem beruflichen Wirken der integralen Bauweise sehr viel Aufmerksamkeit geschenkt wurde, da sie in der Bauweise großes Zukunftspotenzial erkennen konnten. Ziel der Verfasser war es daher, den integralen Brücken ein eigenes Fachbuch zu widmen, mit dem die bisher vorliegenden Erfahrungswerte zusammenfassend für die Ingenieurgemeinschaft aufbereitet werden sollten.

In der Konzeptphase des vorliegenden Buches war auch Prof. Dr.-Ing. Michael Pötzl Teil der Gruppe, der sich bereits in den 1990er-Jahren intensiv mit diesem Brückentyp befasste und zahlreiche, heute gebräuchliche Grundlagen erforschte und Denkansätze publizierte. Leider ist er kurz vor Fertigstellung dieses Buches im Juni 2016 unerwartet verstorben. Die integrale Bauweise hat dadurch einen sehr starken Fürsprecher verloren.

Gerade die integrale Bauweise bietet eine Vielzahl von Ansätzen, Gestaltung und Funktion in Einklang zu bringen und der Nachwelt außergewöhnliche und dauerhafte Bauwerke zu hinterlassen. Dieses Buch soll daher den praktizierenden Ingenieuren einen Denkanstoß bieten, um künftig innovative, dauerhafte und ästhetisch ansprechende Bauwerke zu entwerfen.

Wien, im Januar 2017

Dr.-Ing. Roman Geier

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Einführung	1
2 Grundlagen	7
2.1 Begriffe und Definitionen	7
2.2 Vorteile integraler Brücken	13
2.2.1 Vorteile für den Entwurfsprozess	13
2.2.2 Vorteile im Zuge der Errichtung der Tragwerke	15
2.2.3 Vorteile für Nutzer und Anrainer	15
2.2.4 Vorteile für die Bauwerkserhaltung	16
2.3 Impulse aus dem Unterhalt	16
2.4 Herausforderungen bei integralen Brücken	23
2.5 Nachhaltigkeit integraler Brücken	25
2.5.1 Bedeutung der Nachhaltigkeitsbeurteilung	25
2.5.2 Nachhaltigkeitsbeurteilung von Brücken	28
2.5.3 Nachhaltigkeitsmerkmale integraler Brücken	30
3 Gestaltung	33
3.1 Mehrfeldrige Rahmenbrücken	33
3.2 Einfeldrahmen	41
3.3 Sprengwerke und sprengwerkartige Bögen	49
3.4 Hybride Konstruktionen	53
4 Entwurf	57
4.1 Allgemeines	57
4.2 Bauwerk-Baugrund-Interaktion	59
4.3 Gründung und Unterbau	63
4.4 Überbau	67
4.4.1 Krümmung im Grund- und Aufriss	67
4.4.2 Vorspannung	71
4.4.3 Optimierte Stützweiten der Randfelder	72
4.4.4 Integrale Verbundbrücken	73
4.4.5 Integrale Fertigteilbrücken	74
4.5 Parameterstudie – Einflussgrößen auf den Entwurf	74
4.5.1 Darstellung des Systems	74
4.5.2 Beschreibung des Modells	76
4.5.3 Ergebnisse	77
4.6 Entwurf am Beispiel eines integralen Bogentragwerks	83
4.6.1 Ausgangslage	83
4.6.2 Wahl des Tragsystems	84
4.6.3 Interaktion Gleis – Tragwerk	87
4.6.4 Konzeption des integralen Bogentragwerks	88
4.6.5 Bauwerk-Baugrund-Interaktion	90

4.6.6	Statische Berechnung	92
4.6.7	Reales Systemverhalten	96
5	Berechnung und Bemessung	99
5.1	Ständige Einwirkungen	99
5.1.1	Eigengewicht und Ausbaulasten	99
5.1.2	Vorspannung	99
5.1.3	Baugrundsetzungen	99
5.2	Veränderliche Einwirkungen	100
5.2.1	Temperatur	100
5.2.2	Schwinden	105
5.2.3	Kriechen	109
5.2.4	Erddruck	111
5.2.5	Straßenverkehr	115
5.2.6	Eisenbahnverkehr bzw. Normalspurbahnverkehr	117
5.2.7	Fußgänger- und Radverkehre	121
5.2.8	Wind	122
5.2.9	Schnee	122
5.3	Idealisierung der Struktur	122
5.4	Modellierung des Baugrunds	123
5.4.1	Allgemeines	123
5.4.2	Flach gegründete Brücken	125
5.4.3	Tief gegründete Brücken	129
5.5	Schnittgrößenermittlung	134
5.6	Grundlagen der Bemessung	136
5.6.1	Nachweiskonzept bei linear-elastischer Tragwerksanalyse	136
5.6.2	Geotechnische Kategorien und Schwierigkeitsklassen	142
5.6.3	Nichtlineare Berechnung	146
6	Konstruktive Durchbildung	149
6.1	Deutschland	150
6.1.1	Ausführung des Brückenendes	150
6.1.2	Hinweise für besondere Bauteile	151
6.1.3	Ausführung von Schleppplatten	153
6.2	Österreich	154
6.2.1	Ausführung des Brückenendes	154
6.2.2	Hinweise für besondere Bauteile	156
6.2.3	Ausführung von Schleppplatten	157
6.3	Schweiz	158
6.3.1	Ausführung des Brückenendes	158
6.3.2	Hinweise für besondere Bauteile	160
6.3.3	Ausführung von Schleppplatten	161
6.4	Angloamerikanischer Raum	162
6.5	Sonderkonstruktionen	165
6.5.1	Fahrbahnübergang aus Betonelementen	165
6.5.2	Schleppplatte aus bewehrtem Gummibeton	167

7	Ausführung, Bauüberwachung und Monitoring	169
7.1	Bauausführung.....	169
7.1.1	Einfluss des Bauverfahrens.....	169
7.1.2	Einfluss der Herstellungstechnologie.....	178
7.2	Baubegleitung und -überwachung.....	185
7.2.1	Ausschreibungen und Vergabe.....	185
7.2.2	Arbeitsanweisungen.....	185
7.3	Bauwerkserhaltung.....	186
7.4	Monitoring bei integralen Brücken.....	187
7.4.1	Beispiel Seitenhafenbrücke.....	188
7.4.2	Beispiel Oberwarter Brücke.....	203
7.4.3	Rampenbauwerk B2309.....	210
8	Umrüstung bestehender Brücken – Ausblick und Chancen	215
8.1	Kleine Tragwerkslängen.....	216
8.1.1	Keine Änderung des statischen Systems – Fugenverguss.....	216
8.1.2	Keine Änderung des statischen Systems – Umbau Widerlager.....	218
8.1.3	Aktivierung einer Rahmenwirkung.....	219
8.2	Große Tragwerkslängen – Isola-della-Scala-Brücke.....	223
8.2.1	Ausgangssituation.....	223
8.2.2	Finite-Elemente-Berechnungen.....	224
8.2.3	Bauherstellung.....	230
	Literaturverzeichnis	235
	Stichwortverzeichnis	243

4 Entwurf

Bei integralen Brücken handelt es sich um sehr komplexe Strukturen, bei denen im Entwurfsprozess nicht auf Bauteilebene gearbeitet werden oder das Bauwerk isoliert vom Untergrund betrachtet werden kann. Daher sollen im folgenden Abschnitt wesentliche Einflussgrößen auf das Tragverhalten beschrieben werden, welche besonderer Aufmerksamkeit bedürfen.

4.1 Allgemeines

Anzumerken ist in diesem Kontext, dass eine Variation jeder einzelnen Eingangsgröße, welche bei Anwendung des semiprobabilistischen Teilsicherheitskonzepts stets erforderlich ist, Auswirkungen auf die übrigen das Tragverhalten steuernden Parameter hat. Daher muss bereits im Entwurfsstadium ein iteratives Vorgehen am Gesamtsystem Untergrund – Bauwerk stattfinden. Eine eingehende Betrachtung der unterschiedlichen Einflussparameter auf das Tragverhalten integraler Brücken erfolgt in [3] und [20], wobei die an ausgeführten Bauwerken gewonnenen Erfahrungen einschließlich der verbesserten Modellierungs- und Simulationsmethoden in den letzten 20 Jahren zu neuen Erkenntnissen geführt haben.

Bereits in [3] wurden die grundlegend diametralen Anforderungen an eine integrale Brücke im Entwurfsstadium durch mehrere Zielkonflikte beschrieben. Der erste Optimierungsprozess für den Tragwerksplaner ergibt sich zwischen einer möglichst großen Einspannung des Überbaus bei Lasteinwirkung und einer möglichst hohen Flexibilität bei Zwang.

Dabei sind diese Aspekte nicht nur für das isolierte Bauwerk, sondern auch für das Gesamtsystem aus Bauwerk und Baugrund zu beachten. Dieses Verhalten wird durch die Bauwerks-Baugrund-Interaktion beschrieben und führt dazu, dass die Wahl und der Ansatz von Bodenkennwerten im Rahmen der Bemessung große Auswirkungen auf das gesamte Verhalten einer Konstruktion ausüben. Beim Entwurf können somit zwei Philosophien verfolgt werden:

- Ausbildung eines geringen Einspanngrades im Bereich der Widerlager bzw. Stützen und geringe Biegesteifigkeit der Gründung. Durch die Flexibilität kann eine gewisse Rotationsfähigkeit des Überbaus vorausgesetzt werden und die Rahmenecke kann aufgrund der geringeren Momente relativ einfach ausgebildet werden. Die Feldmomente stellen sich ähnlich wie bei einem konventionellen Tragwerk ein. Diese Praxis ist in den USA und Kanada sehr gebräuchlich und in den zugehörigen Richtlinien beispielsweise bei Spundwandgründungen mit zahlreichen Erfahrungswerten auch bei größeren Tragwerkslängen und Temperaturgradienten belegt.
- Hohe Biegesteifigkeit des Widerlagers bzw. kurze, massive Stützen sowie eine massiv ausgebildete Gründung führen zu einer hohen Einspannwirkung des Überbaus. Dadurch können schlankere Überbauten realisiert werden, weil ein Teil des Momentes vom Feldmoment zum Rahmeneck verlagert wird. Die Ausbildung eines solchen Rahmenecks erfordert jedoch höheren Aufwand für die Bemessung und konstruktive Durchbildung. Ferner muss das gewünschte Einspannmoment auch für die Gründung realisiert werden, wodurch zwangsläufig hohe Erdwiderstände und folglich auch möglicherweise hohe unerwünschte Zwänge entstehen.

Ein weiterer Zielkonflikt wird zwischen kleinen Verschiebungen und daraus resultierenden hohen Zwangsbeanspruchungen und zwischen kleinen Zwangsbeanspruchungen und dem Zulassen großer Bauwerksverschiebungen charakterisiert.

Der entwerfende Ingenieur ist daher mit zwei diametral gegenüberstehenden Forderungen bei integralen Brücken konfrontiert. Einerseits werden für die Brückenenden geringe Verschiebungswege gewünscht, um den Übergang zwischen Tragwerk und freier Strecke ohne besondere Maßnahmen zu gewährleisten, wodurch jedoch bei behinderter Ausdehnung sehr große Zwangskräfte geweckt werden.

Andererseits treten bei großen Verschiebungswegen kleine Zwangsbeanspruchungen im Überbau auf, die besser beherrscht werden können. Für die sich dann einstellenden größeren Längenänderungen am Tragwerksende sind jedoch geeignete und vor allem dauerhafte bauliche Lösungen erforderlich.

Der entwerfende Ingenieur muss sich also in diesem Spannungsfeld bewegen und kann den Entwurf nur in die eine oder andere Richtung unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen optimieren. Die gewählte Variante kann gemäß Kapitel 3 auch bei der Gestaltung zum Ausdruck gebracht werden. Einfluss auf den Entwurf haben folgende Parameter:

Gründung

- Steifigkeit (horizontal, vertikal) und Rotationsfähigkeit der Gründungselemente für die Widerlager und Stützen,
- Ausführung als Flach- oder Tiefgründung,
- Ausführung der Hinterfüllung,
- Baugrundeigenschaften.

Unterbau

- Biegesteifigkeit der Stützen längs und quer,
- Geometrie der Stützen und des Widerlagers in Längs- und Querrichtung,
- Steifigkeit des Widerlagers horizontal und vertikal,
- Rotationssteifigkeit des Widerlagers um die vertikale Achse,
- resultierender Erddruck auf das Widerlager durch zu erwartende Tragwerksbewegungen und die gewählte Hinterfüllung,
- Anschluss der Stützen und der Widerlager an den Überbau.

Überbau

- Geometrie und ggf. Krümmung (Öffnungswinkel, Krümmungsradius) im Grundriss und Aufriss,
- Grad der Behinderung für die Längsausdehnung,
- Steifigkeit des Überbaus in Längs- und Querrichtung,
- Länge des Bauwerks.

Durch die geschickte Wahl des Tragsystems – welches auf den anstehenden Boden abgestimmt ist – können unter Beachtung der angeführten Einflussparameter herausragende Bauwerke in integraler Bauweise erstellt werden (Kapitel 3). Die am Entwurfsprozess beteiligten Ingenieure sind aber in diesem Fall deutlich mehr gefordert, als dies bei einer konventionellen Brücke der Fall wäre.

In den folgenden Abschnitten werden daher wesentliche Einflussgrößen auf das Bauwerk beschrieben, um die Sensibilität der beteiligten Ingenieure für den iterativen Entwurfsprozess zu wecken.

4.2 Bauwerk-Baugrund-Interaktion

Beim Entwurf integraler Brücken ist eine vom Boden isolierte Betrachtung des Tragwerks nicht möglich, da zwischen Untergrund – in den das Tragwerk vollständig eingebettet ist – und Brücke starke Wechselwirkungen bestehen, die beim Entwurf, bei der Bemessung und auch bei der Bauausführung in geeigneter Weise berücksichtigt werden müssen.

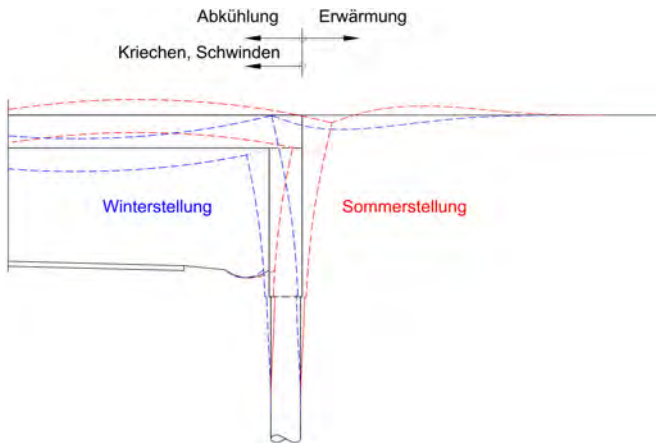
Die Bauwerk-Baugrund-Interaktion ist durch die statisch unbestimmte Lagerung der Brücken und die daraus folgenden Zwänge ein sehr wesentlicher Aspekt integraler Bauwerke, welcher hoher Aufmerksamkeit bedarf. Neben der in Abschnitt 4.1 angeführten allgemeinen Beschreibung der Einflussparameter sind für den Baugrund folgende Parameter hervorzuheben:

- Nachgiebigkeit des Baugrundes,
- Nachgiebigkeit des Hinterfüllmaterials,
- mobilisierter Erddruck durch die Widerlagerverschiebung (positive und negative Wandverschiebungen).

Generell werden die Systemeigenschaften integraler Brücken maßgeblich aus dem Steifigkeitsverhältnis zwischen Überbau, Unterbau und Gründung beeinflusst und sind daher für den Entwurf immer gemeinsam zu betrachten. Dennoch soll im Folgenden versucht werden, zur Erläuterung wesentliche Einflussparameter auf den Entwurf und deren Auswirkungen auf das Systemverhalten etwas isolierter voneinander darzustellen.

Bei konventionell gelagerten Brücken ist das Verhältnis der Steifigkeit zwischen Überbau und Unterbau hoch und Verformungen des Überbaus können sich mehr oder weniger ungehindert einstellen. Dadurch werden Zwangsnormalkräfte im Überbau stark reduziert bzw. weitgehend vermieden. Wird nun das Steifigkeitsverhältnis zwischen Überbau und Unterbau kleiner, so treten durch die teilweise behinderte Ausdehnung des Überbaus Zwangsnormalkräfte auf, deren Größenordnung vom Grad der behinderten Längsausdehnung abhängig ist.

Eine für integrale Brücken grundlegende Eigenschaft ist die Veränderlichkeit der auftretenden Erddrücke hinter den Widerlagern und den Gründungselementen aufgrund der zyklischen Temperaturdehnungen des Überbaus (Bild 4.1). Hinzu kommen die Langzeiteffekte aus Kriechen und Schwinden, die zu einer Verkürzung und damit zu einer Abnahme der Erddrücke hinter dem Widerlager führen.

**Bild 4.1**

Temperaturverhalten eines integralen Widerlagers

Bei symmetrischen Tragwerken liegt der Verschiebungsruehpunkt in Tragwerksmitte und die daraus resultierenden Beanspruchungen an den Widerlagern sind identisch. Bei unsymmetrischen Tragwerken muss der Verschiebungsruehpunkt in Abhängigkeit der Steifigkeit des Tragwerks und des Unterbaus ermittelt werden, wodurch sich auch unterschiedliche Beanspruchungen der beiden Widerlager ergeben können.

Dabei sind nicht nur die rein translatorischen Bewegungen infolge der Temperatur bzw. der Langzeiteffekte Kriechen und Schwinden zu berücksichtigen, sondern auch ggf. auftretende Rotationen des Widerlagers bzw. der Gründung, die sich aus der Beanspruchung des Widerlagers aus dem Erddruck ergeben können.

Allgemein formuliert sind bei integralen Brücken folgende Grenzfälle für den Erddruck zu berücksichtigen (im Speziellen siehe dazu Abschnitte 5.2.4 und 5.4):

- Reduzierte Erddruckbeiwerte: infolge der Tragwerksverkürzung können diese bei konventioneller Hinterfüllung auf den aktiven Erddruck als untere Grenze abgemindert werden. Bei eigenstandsicherer Hinterfüllung ist in diesem Fall auch eine Reduktion auf 0 denkbar.
- Erhöhte Erddruckbeiwerte: infolge der Tragwerksverlängerung, wobei die Größenordnung von der Ausbildung des Widerlagers abhängig ist und für jedes Projekt gesondert festgelegt werden muss.

Zur Steuerung der Bauwerk-Boden-Interaktion und der im Tragwerk resultierenden wirkenden Schnittgrößen ist die Ausbildung des Widerlagers wesentliches Kriterium. In Hinblick auf das Interaktionsverhalten können für das Widerlager die folgend beschriebenen Ausführungsformen definiert werden.

Steifes Widerlager

Durch geeignete konstruktive Maßnahmen soll die Längsausdehnung des Tragwerks verhindert werden. Bei der Planung eines steifen Widerlagers sind das statische System sowie die gegebenen Randbedingungen sehr wesentlich.

Zum Beispiel kann auf gewachsenem Fels oder zwischen zwei massiven Gegenlagern wie beidseits angeordnete Tunnelportale (z. B. Sunnibergbrücke in der Schweiz) mit

vertretbarem technischen Aufwand ein steifes Widerlager realisiert werden. Hingegen ist bei normalen Böden und nur wenigen Tragwerksfeldern ein solches steifes Widerlager in der Realität kaum zu realisieren (vgl. dazu Oberwarter Brücke, Abschnitt 7.4.2).

Die Umsetzung eines steifen Widerlagers auf durchschnittlich anstehende Böden erfordert einen zielgerichteten Entwurf des statischen Systems, bestehend aus einem schlanken Überbau mit zahlreichen, relativ kurzen Tragwerksfeldern (Bild 4.2). Dieses Konzept ist den ursprünglichen Gewölbebrücken in Natursteinbauweise sehr ähnlich. Der Aufwand für die Herstellung eines unverschieblichen (steifen) Widerlagers ist bei einem solchen System weitaus niedriger und technisch sowie wirtschaftlich sinnvoll umsetzbar.

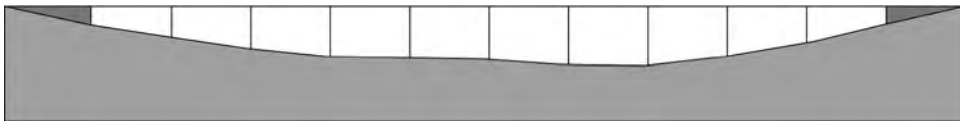


Bild 4.2 Vielfeldriger Überbau mit kurzen Stützweiten

Konventionelles Widerlager

Dieses liegt zwischen den Grenzfällen des steifen und des flexiblen Widerlagers und stellt die Mehrzahl an realisierten Widerlagern integraler Brücken dar. Das konventionelle Widerlager wird dadurch definiert, dass nahezu die gleichen Längenänderungen am Widerlager wie bei konventionell gelagerten Brücken auftreten und das Maß der Längsverschieblichkeit hauptsächlich durch den Brückenentwurf (z. B. Geometrie im Grundriss und Aufriss) bestimmt wird. Charakteristisch ist ferner, dass durch die Relativverschiebungen zur Hinterfüllung und dem angrenzenden Bodenkörper Erddrücke in unterschiedlicher Größenordnung mobilisiert werden (positive und negative Wandverschiebungen gemäß Bild 4.1). Als Größenordnung für die zu erwartenden Verschiebungen wird auf Tabelle 4.1 verwiesen.

Tabelle 4.1 Freie Dehnung für Betonüberbauten in C30/37 bei üblichen Verhältnissen für 37K/27K, Angabe von Richtwerten

Einwirkung	Char. Wege Tragwerk [%o]	Relevanz für Übergang
Abfließende Hydratationswärme	-0,10	N
Autogenes Schwinden ϵ_{cas}	-0,08	N
Trocknungsschwinden ϵ_{cas}	-0,30	J
Bremsen		J
Temperaturschwankung $\Delta T_{\text{N,neg}}$	-0,27	J
Temperaturschwankung $\Delta T_{\text{N,pos}}$	+0,37	J
Summe Längung	+0,27	
Summe Verkürzung	-0,75	
Gesamtdehnung	-1,02	

Flexibles Widerlager

Ziel der flexiblen Widerlagerausbildung ist die Reduktion der Zwänge im Überbau durch eine nachgiebige Unterbaukonstruktion (Widerlager und zugehörige Gründung) und den daraus resultierenden Relativverschiebungen zum angrenzenden Erdkörper. Dies kann auf unterschiedliche Wege erreicht werden:

- Das klassische Konzept des flexiblen Widerlagers von *Pötzel* und *Naumann* [21], welches auch in Großversuchen und ersten Bauwerken eingehend untersucht wurde. Durch den Einbau von nachgiebigen Werkstoffen hinter dem Widerlager oder im Bereich der Gründung werden Relativverschiebungen des Bauwerks möglich, ohne besondere Zwangsnormalkräfte im Tragwerk zu erzeugen (siehe Bild 4.3). Die auftretenden Längenänderungen hinter dem Tragwerk müssen jedoch aufgenommen werden und konstruktiv für den Übergang auf die freie Strecke gelöst werden.
- Eine andere Möglichkeit ist es, das Widerlager selbst so auszubilden, dass dieses im Vergleich zum Überbau eine sehr niedrige Steifigkeit aufweist und so bei Längenänderung ebenfalls nur wenig Zwang entsteht. Diesbezüglich sind als Beispiel Spundwandgründungen (siehe Abschnitt 6.4) anzuführen, die außerhalb des D-A-CH-Bereiches durchaus gebräuchlich sind, um integrale Bauwerke zu gründen.



Bild 4.3 Ausführung eines flexiblen Widerlagers mit Weicheinlage

Bei der Beurteilung der Steifigkeit des Widerlagers ist auch auf den Beitrag der Flügelmwände zur Gesamtsteifigkeit zu achten. Durch entsprechend gestaltete Konstruktionen wie beispielsweise durch Hängeflügel kann eine geringere Steifigkeit und bei kastenförmiger Ausbildung eine größere Steifigkeit erreicht werden.

Die Zusammenarbeit zwischen Tragwerksplaner und Bodengutachter ist daher für integrale Brücken ein entscheidendes Kriterium, um das vorhandene Potenzial der Bauweise nutzen zu können. Eine auf der „sicheren Seite“ liegende Angabe der Bodenparameter ist für integrale Brücken nicht möglich, da entweder die durch den Boden geweckten Zwangsschnittgrößen im Überbau oder andererseits die auftretenden Widerlagerbeanspruchungen aufgrund der Dehnwege zu niedrig eingeschätzt werden. Auch diesbezüglich handelt es sich um eine völlig andere Ausgangslage, als dies beim Entwurf konventioneller Tragwerke der Fall ist.

Bei der Bemessung von integralen Brücken ist es daher zweckmäßig, für die erforderlichen Bodenparameter einen oberen und unteren Grenzwert anzugeben und für diese Werte eine Berechnung durchzuführen. Alleine durch diese Betrachtungsweise wird klar, dass die Bemessung einer integralen Brücke höhere Ansprüche an den Tragwerksplaner stellt sowie die Interaktion und enge Abstimmung zwischen Bodengutachter und Tragwerksplaner erfordert.

4.3 Gründung und Unterbau

Während die grundlegenden Verhältnisse für das Widerlager bereits im Abschnitt 4.2 beschrieben wurden, sollen in diesem Abschnitt noch besondere Aspekte der Gründung und des Unterbaus angeführt werden, welche einen Einfluss auf das Systemverhalten haben.

Die einfachste und auch sehr gebräuchliche Ausführung für den Unterbau integraler Brücken stellt der flach gegründete Einfeldrahmen dar. Diese Bauweise ist im Regelfall bis Stützweiten von etwa 25 m in schlaff bewehrter Ausführung weit verbreitet, wenn der anstehende Boden eine solche Ausführung zulässt.

Folgende Entwurfskriterien sind bei der Ausbildung einer Flachgründung zu berücksichtigen (siehe dazu auch Abschnitt 5.4.2):

- Die insbesondere bei Einfeldrahmen auftretenden Verdrehungen des Widerlagers bzw. abhebende Kräfte sind zu berücksichtigen, um klaffende Fugen zwischen Flachgründung und Untergrund zu vermeiden.
- Durch die Ausbildung eines kastenförmigen Widerlagers, bestehend aus der Flachgründung und den Flügeln, können steifere Widerlager erreicht werden.
- Sollten bei Flachgründungen weichere Konstruktionen erwünscht sein, so können diese durch scheibenförmige Ausbildung oder durch eine größere Widerlagerhöhe erzielt werden. Dabei kann jedoch der Erddruck auf die Widerlagerwand selbst das Bemessungskriterium darstellen. Daher ist die Variation der Widerlagerhöhe nur innerhalb bestimmter Grenzwerte sinnvoll.

Des Weiteren ist im Entwurf besonders bei kleineren integralen Brücken darauf zu achten, dass bei schiefen Widerlagern – also nicht senkrecht zur Bewegungsrichtung angeordneten Unterbauten – im Grundriss gesehene Rotationskräfte auf das gesamte Bauwerk wirken. Diese können im Extremfall zu einer Bewegung des Tragwerks führen. Generell kommt es zu einer Umlagerung der Erddrücke in Richtung des stumpfen Eckes und müssen im Entwurf und in der Bemessung berücksichtigt werden [20].

Bei größeren Stützweiten wird jedoch vermehrt die Tiefgründung bevorzugt, da generell eine flexiblere Konstruktion zur Lastabtragung sowie der Abtragung von Zwangskräften zur Verfügung steht.

In Kombination mit schlanken und hohen Pfeilern ist mit einer Tiefgründung eine längsdehnweiche Konstruktionsform vorhanden. Die Flexibilität kann durch die Anordnung einer einzelnen Pfahlreihe gegenüber einem Pfahlbock mit vertikalen oder geneigten Pfählen (vgl. dazu Abschnitt 7.4.1) weiter erhöht werden. Hinzu kommt, dass durch spezielle bauliche Maßnahmen im oberen Bereich der Pfähle die Elastizität der Gründung noch weiter vergrößert werden kann. Beispielsweise kann der obere Pfahlbereich durch eine Ummantelung mit einer Weicheinlage, mit einem Mantelrohr oder auch durch gezielte Auflockerungen des Untergrundes im Zuge der Bauherstellung weicher gestaltet werden.

Um das bei integralen Brücken zumeist gewünschte hohe Verformungsvermögen einer Gründung zur Vermeidung von hohen Zwangsschnittgrößen zu aktivieren, sollte bei einer Tiefgründung die Anordnung von nur einer Pfahlreihe gegenüber mehrreihiger Anordnung bevorzugt werden, sofern die Lastabtragung in vertikaler Richtung gesichert ist.

Zusammenfassend sind folgende Entwurfskriterien bei der Ausbildung einer Pfahlgründung zu berücksichtigen (siehe dazu auch Abschnitt 5.4.3):

- Da bei integralen Brücken das Gesamtsystem aus Überbau, Unterbau und Gründung modelliert wird, sind die Pfähle mit möglichst realistischen Biegesteifigkeiten im Rechenmodell zu berücksichtigen.
- Für die Realisierung einer möglichst flexiblen Gründung ist die Ausbildung einer einzelnen Pfahlreihe zu bevorzugen.
- Um ein konventionelles, weniger flexibles Gründungsbauwerk zu erreichen, sind Pfahlgruppen, eventuell in geneigter Ausführung, zweckmäßig.
- Um eine Reduzierung der Pfahlsteifigkeit im Kopfbereich zu erreichen, können entweder Weicheinlagen oder Mantelrohre angeordnet werden oder als wirtschaftliche Alternative in Abhängigkeit des anstehenden Bodens auch bewusst im Zuge der Baumaßnahme Auflockerungen durchgeführt werden.
- Eine Mantelreibung der Pfähle sollte unter Berücksichtigung der zuvor genannten Kriterien nur in jenen Bereichen angesetzt werden, in der diese auch gesichert auftritt. Dabei ist die zyklische Beanspruchung im oberen Pfahlbereich zu berücksichtigen.
- Bei der Bemessung sind zumeist Grenzwertbetrachtungen (obere und untere Schranken, z. B. Bodenkennwerte) durchzuführen.

Durch die gezielte Anordnung von unterschiedlichen Neigungsverhältnissen der Widerlager können ästhetische Bauwerke mit schlanken Überbauten erreicht und gleichzeitig Vorteile für den Entwurf und die Ausführung genutzt werden. Beispielsweise führt ein Anzug der Widerlagerstirnwände in Richtung des Dammes zu folgenden Vorteilen:

- Bei einem solchen Widerlager kann eine Tragkonstruktion nahezu ohne Flügel entwickelt werden. Dadurch ist der Entwurf sehr flexibler Widerlager möglich.
- In Bezug auf die Sichtbeziehungen können für die darunter verlaufenden Verkehrswege Verbesserungen erreicht werden.

- Die vertikalen Tragelemente des Unterbaus sind weiter vom Lichtraum des Verkehrs entfernt. Dies ist nicht nur im Endzustand, sondern auch für die Herstellung zu berücksichtigen.

Demgegenüber stehen aber folgende Nachteile:

- Durch die nach hinten geneigte Widerlagerkonstruktion resultieren größere Spannweiten für das Randfeld und dadurch im Regelfall höhere Beanspruchungen, die sich in größeren Tragwerksquerschnitten niederschlagen können.
- Durch die Nutzung leichter Verbundkonstruktionen können die Nachteile der größeren Spannweite jedoch weitgehend kompensiert werden.
- Durch die größeren Bauwerksabmessungen ist die Herstellung tendenziell teurer.

Im Gegensatz dazu führt eine Neigung der Widerlagerstirnwände in Richtung Tragwerksmitte zu folgenden Aspekten, die bei der Konzeption des Tragwerks berücksichtigt werden müssen:

- Kleinere Spannweiten und dadurch geringere Beanspruchungen mit kleineren Bauteilabmessungen.
- Aufgrund der kleineren Abmessungen tendenziell günstiger.
- Zur Absicherung des Damms sind große Flügelkonstruktionen erforderlich, welche zu einer sehr hohen Steifigkeit des Widerlagers führen.
- Das Widerlager befindet sich näher am Lichtraum des Verkehrs.

Neben dem Widerlager beeinflusst insbesondere die Ausbildung der Stützen das Steifigkeitsverhältnis von Überbau zu Unterbau. Aufgrund der horizontalen Pfeilerverformung hat die Gestaltung einen maßgeblichen Einfluss auf die Zwangsbeanspruchungen des Überbaus in Längsrichtung. Die Steifigkeit der Stützen in Längs- und Querrichtung kann über folgende Parameter gesteuert werden, wobei gerade bei im Grundriss gekrümmten Brücken auf eine möglichst verformungsfähige Konstruktion in Querrichtung geachtet werden muss:

- Stützengeometrie, insbesondere Stützenhöhe und zugehöriger Querschnitt. Durch die Ausbildung von zwei getrennten Halbstützen anstelle eines Vollquerschnittes kann die Flexibilität in Längsrichtung erhöht werden (siehe dazu Bild 4.4).
- Zugehöriges Gründungskonzept.
- Eine Vergrößerung der Feldweiten durch eine Reduktion der Stützenanzahl kann zu einer verminderten Verformungsfähigkeit der Brücke in Längsrichtung und anschließend zu einer Erhöhung der Zwangsschnittgrößen im Überbau führen.
- Durch die Anordnung von Vouten zwischen Überbau und Stütze kann das Verformungsverhalten, die Gestaltung des Bauwerks sowie die konstruktive Durchbildung positiv beeinflusst werden. Dadurch kann erreicht werden, dass sich ein Fließgelenk in Richtung der Pfeilermitte verlagert, eine erhöhte Rotationsfähigkeit und geringere Momentenspitzen sind die Folge. Eine Untersuchung der erforderlichen Bewehrungsmengen zeigt, dass bei einem 0,5 m breiten Pfeiler, der im Anschlussbereich an den Überbau auf 1,0 m aufgeweitet wird, deutliche Reduzierung der Bewehrungsmassen möglich werden. Gründe hierfür sind die Kombination aus guter Rotationsfähigkeit am Stützenfuß und großer statischer Nutzhöhe am Pfeilerkopf [22].

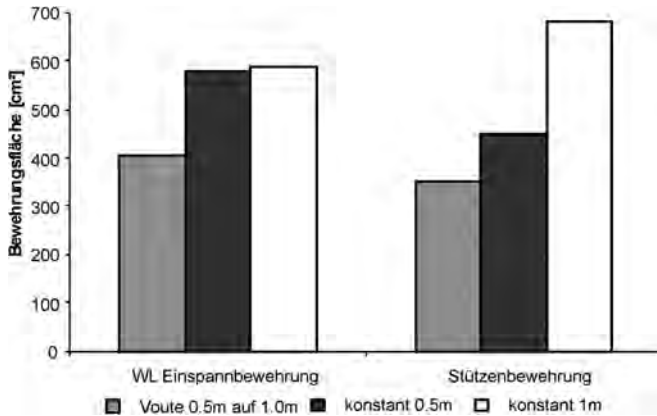


Bild 4.4 Reduzierung der Bewehrungsmengen infolge einer Voute

- Bei der Wahl der Querschnittsform für die Stützen ist bereits im Entwurf auf eine möglichst gleichmäßige Ausbildung des Spannungsverlaufs entlang der Stabachse zu achten, damit sich im Zustand II eine gleichmäßige Verteilung der Rissbreiten einstellt. Dadurch kann eine relativ gleichmäßige Verformungsarbeit der Stützen gewährleistet werden.

Eine weitere Möglichkeit im Entwurf bietet die Ausführung von Doppelpfeilern oder V-förmigen Stützen (Bilder 4.5 und 4.6). Dabei wird eine Reduktion der Schnittgrößen im Überbau bei gleichzeitiger Beibehaltung der Tragsicherheit erreicht.



Bild 4.5 Geteilte Rundstütze eines integralen Mehrfeldrahmens

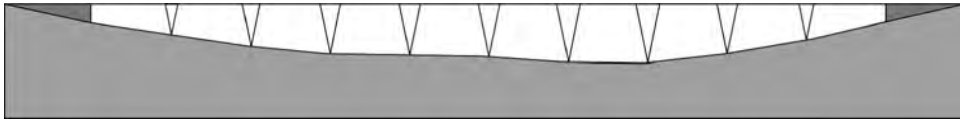


Bild 4.6 Reduktion der Stützweiten durch V-förmige Stützen

Wird bei größerer Tragwerkslänge die Ausführung des Bauwerks in semi-integraler Bauweise, d. h. mit Lagern und/oder Fugen im Bereich des Widerlagers erforderlich, so ist bereits im Entwurf darauf zu achten, wie Horizontalkräfte – etwa durch Bremsen und Anfahren im Eisenbahnverkehr – sicher in den Untergrund übertragen werden können. Da die Pfeiler entsprechend den grundlegenden Entwurfsprinzipien der integralen Brücken zumeist flexibel ausgebildet werden, ist die Abtragung dieser Kräfte zumeist nur durch die Anordnung von einzelnen massiven Pfeilerböcken möglich.

In diesem Zusammenhang ist auf besondere integrale und semi-integrale Tragwerke für den Eisenbahn-Brückenbau zu verweisen. Durch den Entwurf von integralen Mehrfeldrahmen konnten so wirtschaftliche, sehr dauerhafte und überdies auch noch optisch sehr ansprechende Bauwerke realisiert werden, um lange Talabschnitte zu überbrücken.

Die erforderliche Gesamtlänge des Brückenbauwerks wird aus mehreren, voneinander durch Fugen getrennte integrale Rahmen gebildet. Zur Aufnahme der großen Horizontalkräfte werden im Bewegungsruhepunkt der Tragwerke Aussteifungskonstruktionen vorgesehen, welche sehr gezielt zur Gestaltung des Brückenbauwerks eingesetzt werden können. Ein typisches Beispiel für die Umsetzung dieses Entwurfskriteriums stellen die im Zuge des Verkehrsprojekts Deutsche Einheit Nr. 8 [23] (Strecke Nürnberg – Berlin) realisierten Brücken dar, bei dem zahlreiche außergewöhnliche Bauwerke mit Gesamtlängen von 1.000 m errichtet werden konnten. Die Brücken wurden in den Einzelabschnitten integral ausgeführt und kommen zwischen den Einzeltragwerken ohne wartungsintensive Schienenauszüge aus.

Hier ist deutlich erkennbar, dass ein geschickt gewählter Entwurf, welcher auf die Rahmenbedingungen und Erfordernisse integraler Brücken im Spannungsfeld zwischen Zwang – Verschiebung – Flexibilität eingeht, zu außergewöhnlichen und sehr wartungsarmen Bauwerken führt.

4.4 Überbau

4.4.1 Krümmung im Grund- und Aufriss

Neben den bereits behandelten Aspekten gibt es auch einige Parameter, die beim Entwurf besonders den Überbau betreffen, jedoch auch Auswirkungen auf die übrigen Bauteile des Tragwerks haben.

Temperaturbeanspruchungen des Tragwerks führen, wie in Abschnitt 4.2 gezeigt, zu einer Verlängerung des Überbaus bei ansteigender und zu einer Kontraktion bei fallender Temperatur. Bei konventionell gelagerten Brücken können diese Dehnungen ungehindert im Überbau auftreten. Bei integralen Brücken führen diese Längenänderungen in Abhängigkeit des statischen Systems und der ausgeführten Widerlager zur

Mobilisierung von Erddrücken in unterschiedlicher Größenordnung. Diese können zu Zwangsschnittgrößen im Bauwerk führen.

Bei einem im Bogen angeordneten Tragwerk kann die Grundrisskrümmung hingegen sehr zweckmäßig für den Entwurf einer integralen Brücke genutzt werden. In Abhängigkeit des Krümmungsradius R und des Öffnungswinkels α kann die Flexibilität des Überbaus stark beeinflusst werden.

Der Grund für diese erhöhte Flexibilität des Überbaus in Längsrichtung ist, dass es bei Längenänderungen infolge Temperaturbeanspruchung zu einem radialen Ausweichen der Brücke kommt und nur deutlich niedrigere Normalkräfte bei den Widerlagern ankommen. Die Umsetzung eines steifen Widerlagers gemäß Abschnitt 4.2 ist daher bei einem gekrümmten Tragwerk deutlich einfacher und auch wirtschaftlich sinnvoll umsetzbar. Messungen an solchen Bauwerken (siehe Abschnitt 7.4) haben gezeigt, dass der Abbau von Zwangsnormalkräften im Überbau durch radiale Verschiebung des Tragwerks sehr gut funktioniert.

Ein besonderes Beispiel für die Anwendung dieses Entwurfsprinzips stellt die bereits angesprochene Sunnibergbrücke im Schweizer Kanton Graubünden als Teil der Umfahrung Klosters dar (Bild 4.7). Von der Typologie handelt es sich um einen gevouteten Durchlaufträger, wobei die Voute aufgelöst und oberhalb des Brückendecks angeordnet ist. Die Verbindung mit den Pfeilern ist in allen Achsen monolithisch. Ebenfalls monolithisch, und dies stellt bei 526 m Gesamtlänge des Tragwerks durchaus eine Besonderheit dar, ist der Anschluss des Überbaus an die beiden Widerlager.



Bild 4.7 Sunnibergbrücke im Kanton Graubünden

Als Begründung für die Umsetzung des Entwurfs diene die relativ starke Krümmung im Grundriss, was ein „Atmen“ – also ein radiales Ausweichen – der Brücke unter zum Beispiel Temperaturbeanspruchungen ermöglichen würde. Im Gegensatz zur Krümmung im Aufriss ist bei dieser Thematik für den Grundriss allerdings Vorsicht geboten. Die Brücke kann sich zwar über einen weiten Bereich dem Zwang aus Temperatur durch ein seitliches Ausweichen entziehen, im Widerlagerbereich jedoch nicht mehr – hier bleibt das Brückendeck aufgrund seiner großen Biegesteifigkeit in Querrichtung quasi voll eingespannt.

Bei einer ebenfalls integralen und im Grundriss gekrümmten Straßenbrücke im Zuge der Ostumfahrung Vaihingen in Stuttgart, die an beiden Enden monolithisch mit anschließenden Tunnelbauwerken verbunden ist, führte dieser Effekt ebenfalls zu erheblichen konstruktiven und herstellungstechnischen Problemen.

Dabei ist beim Entwurf jedoch unbedingt darauf zu achten, dass der Unterbau und die zugehörige Gründung dieses radiale Ausweichen der Konstruktion begünstigen und die Schnittgrößen in den Pfeilern aufgrund der größeren horizontalen Kopfverschiebung abgedeckt werden können. Möglichst flexible Tiefgründungen – gegebenenfalls auch mit zusätzlichen Maßnahmen im Kopfbereich der Pfähle – sind hier auf jeden Fall zu bevorzugen. Insbesondere wenn durch die Anlageverhältnisse nur geringe Pfeilerhöhen möglich sind.

Der Abbau von Zwangsnormalkräften im Überbau ist im Allgemeinen von den Einflussfaktoren Krümmungsradius, Öffnungswinkel, Steifigkeit des Überbaus und dem Steifigkeitsverhältnis zwischen Überbau und Unterbau in Querrichtung abhängig. Bei einer Parameterstudie an einer Brücke mit variablem Öffnungswinkel wurden die in Bild 4.8 dargestellten Ergebnisse für das Verhältnis zwischen den Zwangsnormalkräften am Widerlager zwischen einer geraden (N_{Gerade}) und einer gekrümmten (N_{Kreis}) integralen Brücke erzielt.

Dabei ist erkennbar, dass ein zunehmender Öffnungswinkel zu einer deutlichen Reduktion der Zwangsnormalkräfte in den Widerlagerachsen führt. Als wesentliches Kriterium ist zu berücksichtigen, dass der Überbau in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel und dem Krümmungsradius in Querrichtung zusätzliche Zugbeanspruchungen erfährt,

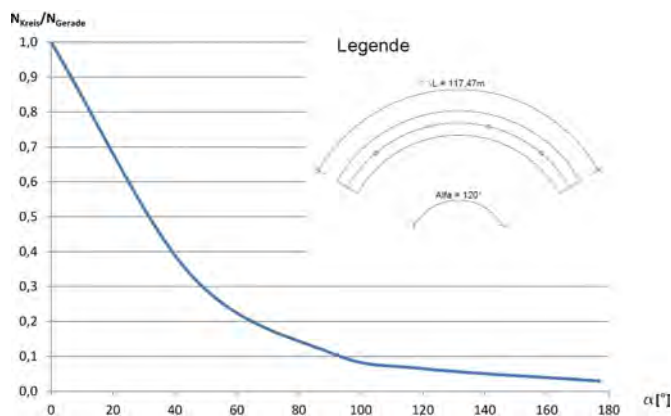


Bild 4.8 Einfluss der Krümmung auf die Normalkraft im Überbau

welche bei der Bemessung nachgewiesen und durch entsprechende Bewehrungsmengen abgedeckt werden müssen (Bild 4.9). Besondere Beachtung muss in diesem Zusammenhang auch den beiden Widerlagerachsen gewidmet werden. Dieser Effekt ist insbesondere in der Überlagerung mit anderen Beanspruchungen zu sehen.

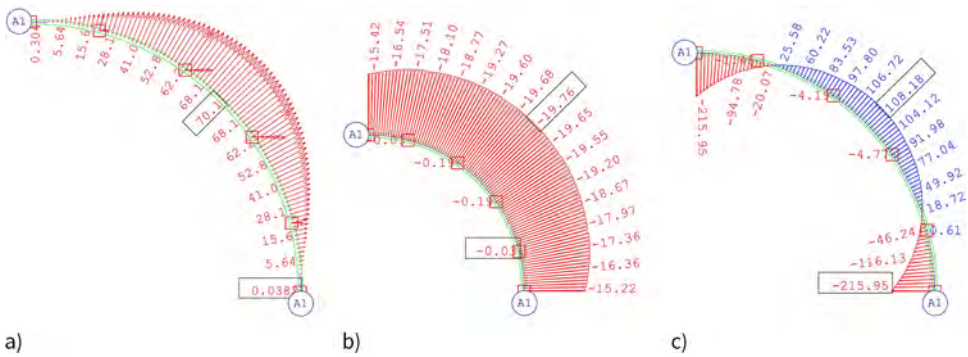


Bild 4.9 a) Verschiebungen, b) Normalkraft und c) Biegemomente eines gekrümmten integralen Tragwerks

Eine weitere Möglichkeit zum Abbau von Zwangsnormalkräften im Überbau ergibt sich, wenn Bewegungen eines biegeweichen Überbaus in vertikaler Richtung genutzt werden. Dies ist beispielsweise bei filigranen und leichten Geh- und Radwegbrücken sehr gut möglich, wobei im Wesentlichen die zuvor beschriebenen Aspekte für die Grundrisskrümmung im gleichen Maß Gültigkeit besitzen. Der Einfluss auf den Schnittgrößenverlauf im Überbau bei Überlagerung der verschiedenen Lastfälle ist in jedem Fall nachzuweisen.

Generell konnte festgestellt werden, dass auch bei massiv ausgeführten integralen Brücken ein Teil der Zwangsnormalkräfte infolge von Temperaturänderungen durch vertikale Bewegungen des Überbaus abgebaut werden kann und dadurch nur geringe Verschiebungswerte bei den Widerlagerachsen auftreten werden. Dieser Aspekt konnte bei mehreren Monitoringprojekten (siehe Abschnitt 7.4) nachgewiesen werden.

Dabei kommt es bei einer Tragwerksausdehnung infolge einer Erwärmung zu einer vertikalen Bewegung des Überbaus nach oben (Bild 4.10a)). Bei einer Tragwerksverkürzung infolge Abkühlung kommt es hingegen zu einer vertikalen Bewegung des Überbaus nach unten (Bild 4.10b)). Diese Effekte müssen bei der Bemessung einer Vorspannung sowie bei Kriechen und Schwinden berücksichtigt werden, um die gewünschte Tragwerksüberhöhung im Endzustand zu gewährleisten.

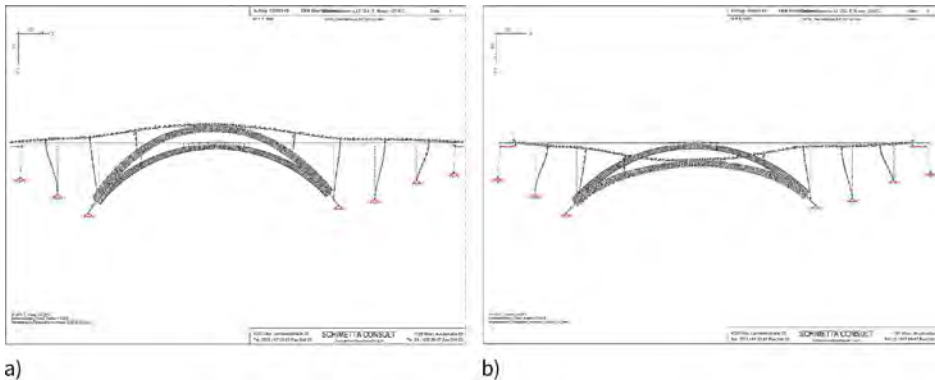


Bild 4.10 Temperaturverhalten des Überbaus bei a) Erwärmung und b) Abkühlung

Zusätzlich sollte dieses, für integrale Brücken typische, Verhalten bei der Beurteilung von Ergebnissen üblicher Messprogramme dem zuständigen Ingenieur bekannt sein, da es sonst zu Fehlinterpretationen des Tragwerkzustands bei sinkenden Temperaturen geben kann. Zunehmende Durchbiegungen des Überbaus könnten in diesem Fall fälschlicherweise auch auf ein Problem mit dem Tragwerk zurückgeführt werden.

4.4.2 Vorspannung

Bei größeren Stützweiten integraler Brücken ist auch die Anwendung von Spannbeton sehr gebräuchlich. Dabei sind jedoch Besonderheiten bei der Systemwahl und der Bemessung zu berücksichtigen. Wie bereits in [2] angeführt, bedeutet Vorspannen auch eine Verkürzung des Tragwerks. Um die Vorspannkraft im Überbau wirksam werden zu lassen, bedeutet dies auch, dass eine ungehinderte Verkürzung möglich sein soll. Diese ungehinderte Verkürzungsmöglichkeit ist bei integralen Bauwerken nicht gegeben. In Abhängigkeit der Längssteifigkeit des Überbaus, dem Steifigkeitsverhältnis zwischen Überbau und Unterbau und insbesondere der Flexibilität von Stützen in Längsrichtung werden der Wirksamkeit einer Vorspannung Grenzen gesetzt.

Im Extremfall bei nahezu unverschieblichen Widerlagern sowie kurzen und biegesteifen Pfeilern wird ein großer Teil der Vorspannkraft über den Unterbau und die Gründung in den Baugrund abfließen. Hingegen wird bei schlanken und biegeweichen Stützen eine Verkürzungsmöglichkeit des Tragwerks geschaffen und die gewünschte Vorspannkraft kann im Überbau wirksam werden.

Zu beachten ist ferner, dass sich die Normalkräfte aus Vorspannung mit den bei Tragwerksausdehnung möglicherweise auftretenden Zwangsnormalkräften überlagern. Bei zusätzlich auftretenden Biegedruckkräften aus Verkehrslasten kommt es zu nennenswerten Beanspruchungen des Überbaus, welche durchaus bemessungsrelevant werden können. Besonders zu beachten sind die Reaktionskräfte bei im Grundriss gekrümmten integralen Brücken, da durch die ungleich großen Umlenkkräfte im Überbau zusätzliche Biegebeanspruchungen entstehen.

BESTELLSCHEIN

Stück	Bestell-Nr.:	Titel	Preis* €
	978-3-433-03030-1	Integrale Brücken	79,-
	909538	Gesamtverzeichnis Ernst & Sohn 2016/2017	kostenlos
	bitte ankreuzen	Monatlicher E-Mail-Newsletter	kostenlos

Liefer- und Rechnungsanschrift: privat geschäftlich

Firma			
Ansprechpartner		Telefon	
UST-ID Nr. / VAT-ID No.		Fax	
Straße//Nr.		E-Mail	
Land	-	PLZ	Ort

Vertrauensgarantie: Dieser Auftrag kann innerhalb von zwei Wochen beim Verlag Ernst & Sohn, Wiley-VCH, Boschstr. 12, D-69469 Weinheim, schriftlich widerrufen werden.

Wilhelm Ernst & Sohn
 Verlag für Architektur und
 technische Wissenschaften
 GmbH & Co. KG
 Rotherstraße 21, 10245 Berlin
 Deutschland
 www.ernst-und-sohn.de



Datum / Unterschrift

*€-Preise gelten ausschließlich in Deutschland. Alle Preise enthalten die gesetzliche Mehrwertsteuer. Die Lieferung erfolgt zuzüglich Versandkosten. Es gelten die Lieferungs- und Zahlungsbedingungen des Verlages. Irrtum und Änderungen vorbehalten.
 Stand: März 2017 (homepage_Probekapitel)