

# Nachrechnung und Ertüchtigung historischer Bogenbrücken an Projektbeispielen

Dr.-Ing. Dirk Sperling

EHS beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH, Braunschweig, Deutschland

Dipl.-Ing. Hauke Schmidt

EHS beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH, Braunschweig, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Instandsetzung und Ertüchtigung historischer Gewölbebrücken ist eine komplexe und nicht alltägliche Ingenieuraufgabe. Bei der zwingend erforderlichen detaillierten Zustandserfassung, der mitunter kniffligen statischen Berechnung und insbesondere bei der Planung der Instandsetzung und Ertüchtigung sind maßgeschneiderte Lösungen gefragt. Anhand von ausgewählten Projektbeispielen werden die Erfahrungen und Erkenntnisse der Verfasser bei der Instandsetzungsplanung historischer Bogenbrücken dargestellt.

## 1. Einführung

Gewölbebrücken spielen im Brückenbau eine herausragende Rolle. Ausgeführt in Mauerwerks- oder Betonbauweise tragen sie als Druckbogen in einer für den Baustoff idealen Form. Aufgrund ihrer hohen Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit erreichen sie oftmals eine deutlich höhere Lebensdauer als Brücken moderner Bauart. Als schützenswerte Kulturgüter sollten Gewölbebrücken nicht ohne weiteres durch neue Bauwerke ersetzt werden. Stattdessen besteht die Forderung, diese Bauwerke so instand zu setzen, dass sie den heutigen verkehrlichen Anforderungen und Sicherheitsanforderungen genügen.

Die Instandsetzung von Gewölbebrücken stellt den Ingenieur oftmals vor schwierige Aufgaben, da:

- die statische Analyse der Bögen nicht mehr zum selbstverständlichen Lehrinhalt an Hochschulen gehört und daher eine gewisse Einarbeitung nötig ist,
- die gedankenlose Anwendung von Berechnungs- und Bemessungsregeln oftmals zu einem „Kaputtrechnen“ der Bauwerke führt, was sich angesichts ihres historischen Wertes verbietet,
- die Instandsetzung und Ertüchtigung oftmals individuelle Lösungen und somit ein gewisses Maß an ingenieurmäßiger Kreativität erfordert.

Der sture Normenanwender ist hier also nicht gefragt. Vielmehr gebietet der Respekt vor dem Bauwerk mit-

unter eine hohe Kompromissbereitschaft bei den am Bau Beteiligten.

## 2. Bauwerks- und Schadensaufnahme

Am Beginn der Instandsetzungsplanung steht immer eine detaillierte Bestandsaufnahme. Dies gilt insbesondere für historische Brücken, die im Laufe der Zeit oftmals an- und umgebaut wurden, wobei nur selten entsprechende Dokumentationen in einem für die Instandsetzungs- und Ertüchtigungsplanung ausreichendem Maße vorhanden sind.

Unverzichtbar bei der Bauwerkserkundung ist die Entnahme von Bohrkernen. Bohrkern geben Auskunft über den Schichtenaufbau, sowie die Materialart und wesentliche Materialeigenschaften.

Eine moderne Methode der Bauwerkserkundung ist das 3-D Laserscanning. Es ermöglicht eine detailgetreue Aufnahme der Bauwerksgeometrie und ist mehreren Planungsphasen von Nutzen:

- im Rahmen der Grundlagenermittlung zur Feststellung wesentlicher geometrischer Daten und Randbedingungen der Planung,
- bei der Entwurfsplanung zur Erstellung des Objektplans,
- bei der Ausschreibung, wo eine möglichst vollständige Erfassung der zu berücksichtigenden Details hilft, das Nachtragspotenzial zu minimieren,
- in der Ausführungsphase als Grundlage der Beweissicherung und des Soll-Ist-Vergleichs.

Als Beispiel hierfür sei die Instandsetzung der Hallertorbrücke Nürnberg genannt. Hier wurde durch 3-D-Laserscanning eine fugentreue Aufnahme der Ansichtflächen für die denkmalgerechte Natursteininstandsetzung realisiert (Bild 1). Im Weiteren wurde auf Basis der gewonnenen Punktwolke ein Geometriemodell als Grundlage für die Erstellung des Objektplans generiert (Bild 2). Letztendlich waren die Daten auch bei der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen für unser nicht am Standort Nürnberg ansässiges Ingenieurbüro von erheblichem Vorteil, da alle Details für den planenden Ingenieur jederzeit vom Schreibtisch aus einsehbar waren.

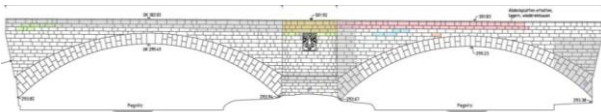


Bild 1: Aus Laserscan erzeugte fugentreue Ansicht einer Natursteinstirnwand der Hallertorbrücke in Nürnberg

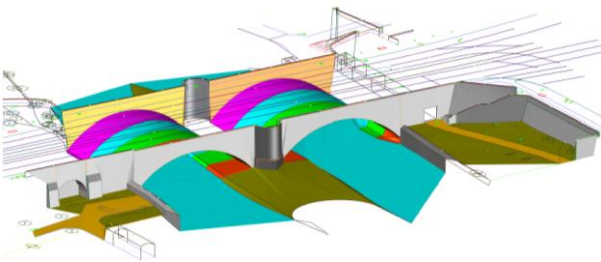


Bild 2: Aus Laserscan entwickeltes Geometriemodell der Hallertorbrücke in Nürnberg

### 3. Nachrechnung

Obwohl sie über viele Jahrzehnte ihre Tragfähigkeit nachgewiesen haben, werden Gewölbebrücken durch Nachrechnungen mitunter nicht ausreichende Tragfähigkeiten bescheinigt. Dies liegt keinesfalls nur an den höheren Lasten, die heutige Brücken aufnehmen müssen. Hier zeigt die Erfahrung, dass ordnungsgemäß gegründete Gewölbebrücken relativ unempfindlich gegenüber höheren Lasten sind.

Die ungünstigen Berechnungsergebnisse resultieren oftmals aus nicht wirklichkeitsnahen Berechnungsansätzen, die - sich überlagernd - schließlich zu einem Negativbefund bei der Beurteilung der Tragfähigkeit führen. Daher ist es zwingend erforderlich, die aktuellen Normenansätze, die in erster Linie für Neubauten konzipiert sind, hinsichtlich ihrer Anwendung auf Gewölbebrücken kritisch zu hinterfragen.

Auch wenn Gewölbebögen meist ohne konstruktiv durchgebildete Gelenke errichtet wurden, hat es sich bewährt, die Schnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit am Zwei- oder Dreigelenkbogen zu ermit-

eln. Tatsächlich bilden sich bei gemauerten Bögen diskrete Gelenke in den Mauerwerksfugen aus, wenn sich die resultierende Druckkraft unter Traglast dem Querschnittsrand nähert, sodass die Fuge weit aufklafft.

Die Berechnung am statisch bestimmten Dreigelenkbogen bietet den Vorteil, dass lediglich Gleichgewichtsbedingungen zu erfüllen sind, sich die Schnittgrößen also unabhängig der tatsächlichen Steifigkeitsverhältnisse verteilen. Ein weiterer wichtiger Grund, die Gelenkbildung bzw. das „Aufweichen“ gerissener Bereiche bei der Schnittgrößenermittlung zu berücksichtigen, ist die damit einhergehende Verminderung oftmals bemessungsmaßgebender Zwangsschnittgrößen aus dem Temperaturlastfall.

Zu beachten ist, dass die Gelenke nicht, wie in der Stabstatik üblich, in der Querschnittsachse angeordnet werden, sondern die zulässigen Exzentrizitäten innerhalb des Querschnitts bei der Schnittkraftermittlung ausgenutzt werden.

Bild 3 veranschaulicht, welche Auswirkung die Exzentrizität der Gelenke auf den Verlauf der Biegemomente hat. Die obere Abbildung zeigt den Momentenverlauf bei Anordnung der Gelenke in der Schwerachse. Werden die Gelenke hingegen nur leicht exzentrisch angeordnet (unteres Bild), entstehen dort aufgrund der hohen Bogennormalkräfte auch signifikante Biegemomente und damit eine insgesamt gleichmäßigere und daher günstigere Momentenverteilung.

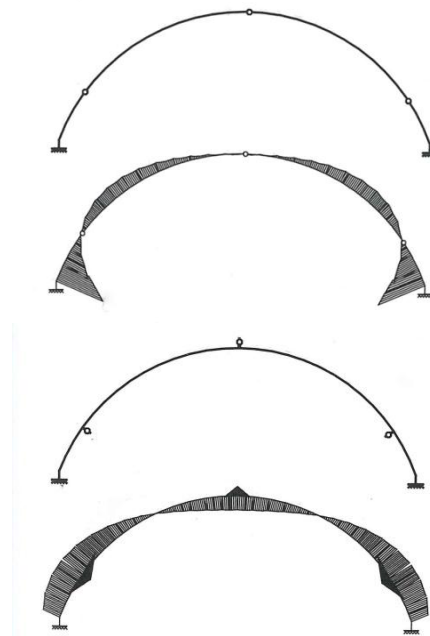


Bild 3: Verlauf der Biegemomente am Dreigelenkbogen bei Anordnung der Gelenke in der Schwerachse (oben) bzw. bei exzentrischer Anordnung der Gelenke (unten) [1]

Eine alternative und mit Tabellenkalkulationsprogrammen einfach durchzuführende Berechnungsme-

thode zur Berücksichtigung der Lage der ideellen Gelenke im Querschnitt ist das Stützlinienverfahren. Dabei wird zunächst die Stützlinie (=Verlauf der Druckspannungsergebnisierenden  $e = M / N$ ) am Dreigelenkbogen ermittelt. Anschließend werden die Gelenke innerhalb eines zulässigen Querschnittsbereiches solange verschoben, bis die gesamte Stützlinie innerhalb dieses Bereiches liegt. Wenn dies gelingt, ist eine zulässige Lage der Druckspannungsergebnisierenden gefunden und der Nachweis gegen Gelenkbildung erfüllt. In [2] wird diese Methode näher beschrieben.

#### 4. Ertüchtigungskonzepte

Ausgangspunkt der meisten Schäden ist die Durchfeuchtung des Gewölbes durch oberseitig eindringendes Wasser. Das Wasser sammelt sich dauerhaft in der Auffüllung und wirkt ständig auf die Konstruktion ein. Die Folge sind Frostschäden am Naturstein, Korrosion der Bewehrung und optische Beeinträchtigungen an Sichtflächen.

Im Zuge einer grundhaften Instandsetzung empfiehlt es sich daher, die bestehende Auffüllung komplett zu entfernen. Nach Freilegung des Gewölbes ist dieses instand zu setzen und, soweit der Zustand der Oberfläche dies überhaupt zulässt, ggf. abzudichten.

In welcher Weise die Konstruktion oberhalb der Gewölbebögen wieder aufgebaut wird, hängt wesentlich von der zusätzlich aufzunehmenden Verkehrslast und den geometrischen Randbedingungen ab.

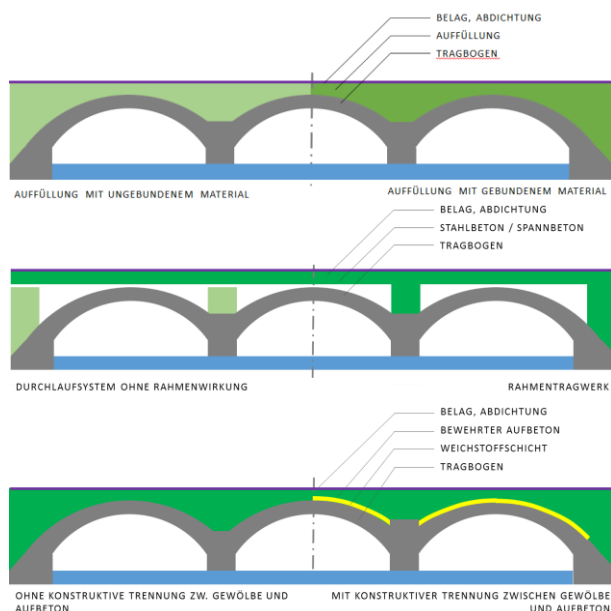


Bild 4: Ertüchtigungskonzepte für Gewölbebrücken

Oftmals ist es statisch ausreichend, das Gewölbe durch ungebundenes oder gebundenes Material wieder aufzufüllen (Bild 4, oberes Bild). Die Auffüllung mit gebundenem Material (z.B. Leichtbeton) bietet gegenüber dem ungebundenen Material den Vorteil einer

besseren Lastverteilung. Ein Nachteil ist die schwierige Ausbaubarkeit des Verfüllmaterials.

Falls durch die Konstruktion höhere Verkehrslasten aufgenommen werden müssen, für die sich das Gewölbe nicht nachweisen lässt, besteht die Möglichkeit, die Lasten einer völlig neuen Tragkonstruktion („Brücke in Brücke“) zuzuweisen (Bild 4, mittleres Bild). Dieses Konzept wurde vielfach bei der Ertüchtigung älterer Mauerwerksviadukte des frühen Autobahnbaus in Deutschland realisiert. Die neuen Überbauten erfordern aufgrund ihrer großen Spannweite oftmals eine Bauhöhe, die über die Höhe der Auffüllung im Bogenstich hinausgeht. Dies erfordert eine Anhebung der Gradienten und führt zu einer Veränderung des äußeren Erscheinungsbildes, die von den Denkmalschutzbehörden nicht immer akzeptiert wird.

Ein oftmals möglicher Kompromiss aus den vorgenannten Varianten „Wiederauffüllung“ und „Brücke in Brücke“ ist die Auffüllung mit bewehrtem Konstruktionsbeton. Der vorhandene Bogen trägt dann sein Eigengewicht und die Frischbetonlasten, während die Verkehrslasten durch den bewehrten Beton abgetragen werden. Die bei mehrfeldrigen Bögen entstehenden stark gevouteten Stahlbetondurchlaufträger kommen mit geringen Bauhöhen in Feldmitte aus und beeinträchtigen daher nicht das äußere Erscheinungsbild.

#### 5. Erkenntnisse aus der Projektbearbeitung

Die Erfahrungen bei der Instandsetzung von Gewölbebrücken lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Gewölbebrücken weisen eine hohe Tragfähigkeit und Langlebigkeit auf.
- Ursächlich für die Mehrzahl der Schäden an Gewölbebrücken ist Oberflächenwasser, welches über Fugen und Risse in die Auffüllung eindringt und dort zu Frost- und Korrosionsschäden führt.
- Eine Instandsetzung ist im Allgemeinen vergleichsweise kostengünstig möglich. Dazu gibt es eine Vielzahl von Instandsetzungsmöglichkeiten.
- Die Instandsetzung erfordert eine sorgfältige Erkundung des Bauwerks. Dadurch werden aufwändige Umplanungen in der Bauzeit und Nachträge / Stillstandzeiten vermieden.
- Zusätzliche Lasten infolge der Umbauten sind möglichst gering zu halten.
- Ein Hauptaugenmerk bei der Instandsetzung muss der Vermeidung von horizontalen Verformungen der Widerlager als häufige Schadensursache gelten.
- Um die Tragfähigkeit nicht zu unterschätzen, muss die sich im Traglastzustand einstellende Gelenk- bzw. Rissbildung berücksichtigt werden. Dazu genügen oft einfache Modellannahmen.



- Die Instandsetzung historischer Gewölbebrücken kann nicht immer regelkonform zum aktuellen Stand der Technik erfolgen. Sie erfordert maßgeschneiderte Lösungen und eine gewisse Kompromissbereitschaft bei allen Beteiligten.

## 6. Projektbeispiele

### 6.1 Schunterbrücke Wenden, Braunschweig



Bild 6: Schunterbrücke Wenden

Das Natursteinmauerwerk des um 1900 errichteten sechsfeldrigen Gewölbes war aufgrund der starken dauerhaften Durchfeuchtung in erheblichem Maße durch Rissbildungen und Abwitterungen geschädigt. Der vorhandene Fahrbelag wurde abgebrochen und das Gewölbe vollständig ausgeräumt und mit Leichtbeton wiederverfüllt. Die neue Stahlbetondecke wurde den gestiegenen Verkehrsanforderungen entsprechend verbreitert und abgedichtet. Das Natursteinmauerwerk wurde grundhaft instandgesetzt.

### 6.2 Gaußbrücke Braunschweig



Bild 7: Gaußbrücke Braunschweig

Die nachträglich aufgebrachte Spritzbetonschale der ursprünglich 1903 errichteten Stampfbetonbogenbrücke war aufgrund starker Bewehrungskorrosion nicht mehr tragfähig. Der Tragbogen war durch mehrere breite Trennrisse in Brückenlängsrichtung geschädigt und die Stuckarbeiten an den Stirnmauern sowie das historische Geländer abgängig.

Neben der Erneuerung des Brückenschmucks und des Geländers wurde die Tragfähigkeit des Tragbogens durch den Ersatz der bewehrten Spritzbetonschale an der Brückenunterseite und das Einschlitzen von rissüberbrückender Bewehrung an der Brückenoberseite wiederhergestellt. Das ausgeräumte Gewölbe wurde mit ungebundenem Material wiederaufgefüllt und der Bogen auf der Oberseite abgedichtet.

### 6.3 Schäferbrücke Walkenried



Bild 8: Schäferbrücke Walkenried

Bei der dreifeldrigen Bogenbrücke unbekanntes Baujahr war aufgrund der vorgefundenen breiten Längs- und Querrisse sowie der horizontalen Widerlagerverschiebungen die Tragsicherheit für die erforderliche Lastklasse nicht mehr gegeben.

Die vorhandene Kiesauffüllung wurde durch eine vom Bogentragwerk entkoppelte tragende Stahlbetonkonstruktion ersetzt. So konnten sowohl die Belastungen für die defizitären Stampfbetonbögen als auch der Horizontaldruck auf die Widerlager minimiert werden, ohne das Erscheinungsbild der denkmalgeschützten Brücke zu beeinträchtigen.

Zudem wurde durch den Aufbau von Schrammborden und dem Ersatz des maroden Geländers die Verkehrssicherheit nach den heutigen Anforderungen hergestellt sowie das Natursteinmauerwerk grundhaft instandgesetzt.

### 6.4 Hallertorbrücke Nürnberg



Bild 9: Hallertorbrücke Nürnberg

Die im letzten Jahrhundert mehrfach durch Stahlbetonbögen verbreiterte zweifeldrige Sandsteinbogenbrücke von 1697 war den Beanspruchungen aus vierspurigem Straßen- und zweispurigem Straßenbahnverkehr nicht mehr gewachsen. Sie wurde durch eine hochbewehrte Lastverteilungsplatte ertüchtigt und grundhaft instandgesetzt. Die Instandsetzungsarbeiten an den Stahlbetonbögen konnten durch umfangreiche Chlorid- und Potentialfeldanalysen auf notwendige Bereiche beschränkt werden.

## 6.5 Asbachtalbrücke



Bild 10: Asbachtalbrücke BAB 4

Im Zuge der Fahrbahnverbreiterung der BAB 4 wurde das im Jahre 1940 errichtete Natursteingewölbe durch einen Plattenbalkenquerschnitt überspannt. Kernbohrungen im Kopfbereich der Pfeiler ergaben häufig Hohlräume im Stampfbetongefüge. Um die in diesem Bereich gestiegenen Beanspruchungen sicher ableiten zu können, wurden die Hohlstellen durch Tränkbohrungen mit Zementmörtel verfüllt.

## LITERATUR

- [1] Holzer: Statische Beurteilung historischer Tragwerke, Band 1, Reihe Bauingenieur-Praxis, Verlag Ernst & Sohn, 2013
- [2] Vockrodt, Feistel, Stubbe: Handbuch Instandsetzung von Massivbrücken – Untersuchungsmethoden und Instandsetzungsverfahren, Birkhäuser-Verlag, 2003