

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 133 (2007)
Heft: 25: Über Brücken

Artikel: Historische Bögen
Autor: Schlegel, Roger / Stahel, Roger
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-108136>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

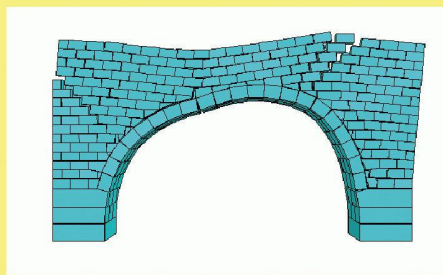
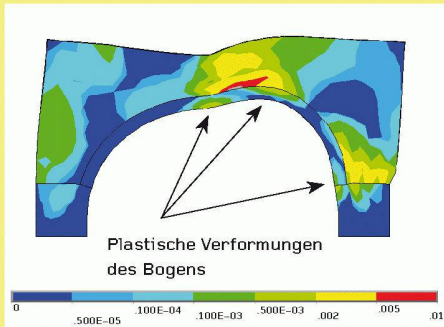
Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

HISTORISCHE BÖGEN



01

01 Schematische Darstellung der Interaktion zwischen Bogenmauerwerk und Übermauerung einer Brücke unter Last.

Oben: Visualisierung der berechneten plastischen Dehnungen. In dunkelblauen Bereichen sind die Verformungen minimal, in gelben und roten Bereichen treten die höchsten Dehnungen auf.

Unten: Der oben dargestellten Dehnungsverteilung entsprechendes Rissbild im Mauerwerk

(Bilder: Autoren)

Nichtlineare Berechnungen, die realitätsnahe Materialmodelle beinhalten, ermöglichen die zuverlässige Bewertung und möglichst kostensparende Sanierung historischer Bogenbrücken. Sie erschliessen nicht nur vorhandene Lastreserven, sondern lassen auch Unsicherheiten erkennen, die mit vereinfachten Ingenieurmodellen nicht zu Tage treten.

Die grosse Zahl historischer Bogenbrücken (Strassen- und Eisenbahnbrücken) insbesondere in Deutschland und das zunehmende Interesse seitens der Betreiber, diese Konstruktionen auch weiterhin zu nutzen, erfordern eine realitätsnahe Tragfähigkeitsbewertung. Der überwiegende Teil dieser meist gemauerten Brücken ist mindestens 150 Jahre alt. In der Regel übersteigen die heutigen Verkehrslastbeanspruchungen die Lasten aus der Bauzeit der Brücken. Typischerweise kann mit den heute gebräuchlichen, vereinfachten Ingenieurmodellen und Berechnungsmethoden oft keine ausreichende Sicherheit unter der neuen Verkehrsbeanspruchung nachgewiesen werden. Nahezu immer stehen die mit vereinfachten Methoden ermittelten zulässigen Belastungen im Widerspruch zu den Erfahrungen der Betreiber über bereits beobachtete ertragbare Einwirkungen.

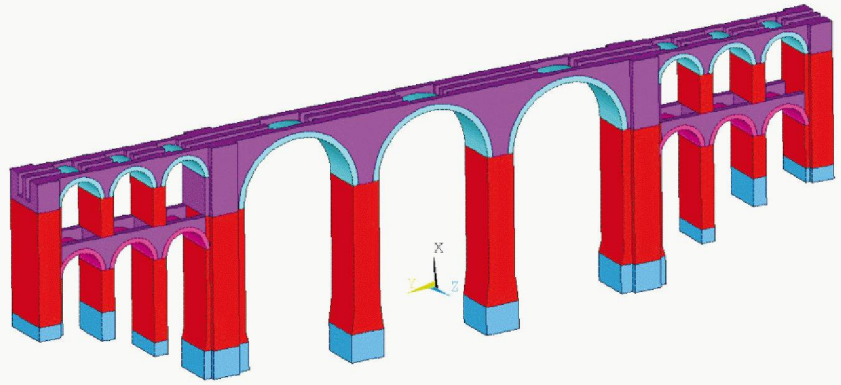
INTERAKTIONEN IN BOGENBRÜCKEN

Vergleichsberechnungen zeigten, dass die sinnvolle Bewertung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit einer historischen Brücke nur dann möglich ist, wenn ihre Spannungs- und Verformungszustände realitätsnah berechnet werden können. Voraussetzungen hierfür sind neben der Erfassung der massgeblichen Einwirkungen die zutreffende Strukturmodellierung und ein geeignetes Materialmodell. Dieses muss das richtungsabhängige und, bei gemauerten Brücken, das von der Verbandsausbildung verursachte Materialverhalten sowie die wesentlichen Rissbildungen und Versagensmechanismen erfassen. Oft liegen bei gemauerten Bogenbrücken räumliche Tragstrukturen vor, bestehend aus dem eigentlichen Bogenmauerwerk, der Gründung, der Übermauerung bzw. Überschüttung und der meist in Querrichtung tragenden Fahrbahnkonstruktion. In diesen Fällen kommt der Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bauwerksbereichen sowie der Interaktion mit der Gründung eine grosse Bedeutung zu. In der Regel sind hierfür dreidimensionale Strukturmodelle erforderlich, da neben dem Bogen die Übermauerung bzw. Hinterfüllung und die Gründung infolge einer mittragenden bzw. stützenden Wirkung einen wesentlichen Beitrag zur Tragfähigkeit des Gesamtbauwerks leisten (Bild 1).

Das Berechnungsverfahren der Finite-Elemente-Methode wurde für die Berechnung historischer Bauwerke durch Zusatzmodule erweitert. Neu entwickelte Materialmodelle ermöglichen die wirklichkeitsnahe und an Versuchsergebnissen verifizierbare Simulation des Materialverhaltens, der Verformungen, Rissbildungen und Schädigungen historischer Baustoffe wie Mauerwerk, Beton, Naturstein, Fels und Boden. Vergleiche der Leistungsfähigkeit der neu geschaffenen Berechnungsmöglichkeiten mit den herkömmlichen Vorgehensweisen zeigten, dass vereinfachte Ingenieurverfahren und Stabwerksmodelle die Tragfähigkeit einer gemauerten Bogenbrücke ca. um den Faktor 6 bis 10 unterschätzen. Diese Ergebnisse bestätigen die Erfahrungen der Betreiber.



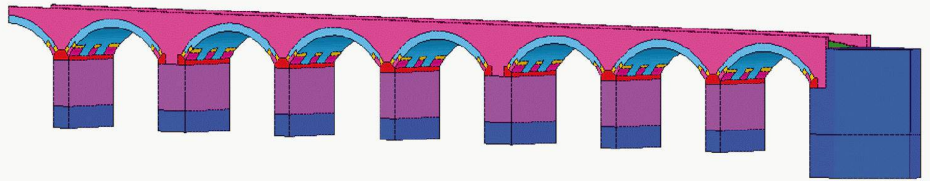
02



03



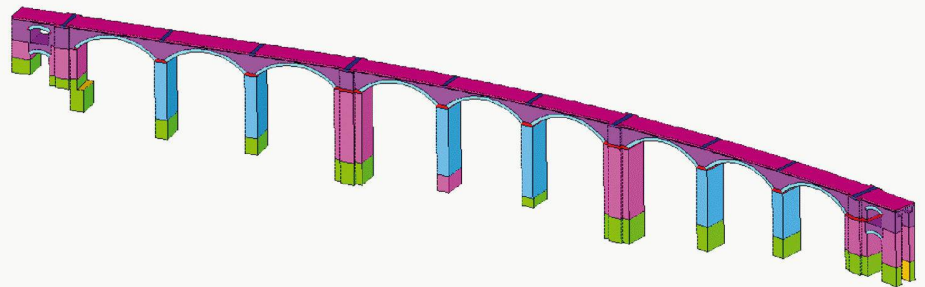
04



05



06



07

02 Lützelviadukt

03 3-D-Geometriemodell des Lützelviadukts

04 Flutbrücke Braunsdorf

05 3-D-Geometriemodell der Flutbrücke Braunsdorf

06 Viadukt Niederwiesa

07 3-D-Geometriemodell des Viadukts Niederwiesa.

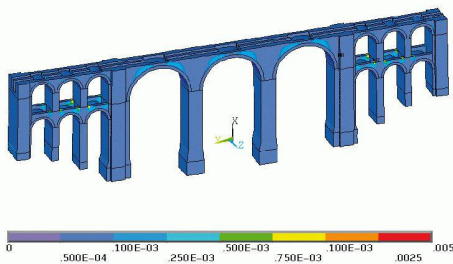
In den 3-D-Modellen sind die unterschiedlichen Materialbereiche zur Erfassung der verschiedenen Mauerwerksarten durch die Farbgebung der Bauteile hervorgehoben

BERECHNUNG VON DREI GROSSEN MAUERWERKSVIADUKTEN

Am Beispiel von drei grossen Mauerwerksviadukten wird nachfolgend das Vorgehen zur Berechnung derartiger Bauwerke dargestellt. Neben der Leistungsfähigkeit und Realitätsnähe des Modells ist dabei wichtig, dass auch mit modernen, nichtlinearen Methoden nachvollziehbare und prüfbare Standsicherheitsnachweise, die im Einklang mit dem gültigen Regelwerk stehen, erstellt werden können. Die berechneten Eisenbahn-Viaduktbrücken Lützelviadukt (Bild 2), Flutbrücke Braunsdorf (Bild 4) und Viadukt Niederwiesa (Bild 6) befinden sich im deutschen Bundesland Sachsen. Alle drei Brücken wurden im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts aus Natursteinmauerwerk (Sandstein, Quarzitschiefer, Gneis, Porphyrtuff) gebaut. Sie wurden während ihrer Nutzungsdauer mehrfach saniert und teilweise mit Füllbeton im Fahrbahnbereich verstärkt. Die hier vorgestellten Berechnungen und Nachweise wurden im Zuge der geplanten Streckenwiederinbetriebnahme aufgestellt. Es konnten damit Lastreserven erschlossen und die erforderlichen Instandsetzungsmassnahmen auf ein Minimum reduziert werden. Dadurch wurden die Berechnungen für den Betreiber nicht nur zur Planungsgrundlage, sondern auch zu einem wesentlichen Bestandteil seiner Investitionsentscheidung.

STRUKTURMODELLIERUNG

Die Modellierung der drei Brückenbauwerke erfolgte mit 3-D-Modellen. Dazu wird die Strukturgeometrie der Brücken mit Finiten Elementen (FE) vernetzt. Die der Berechnung



08

08 Berechnete plastische Dehnungen unter Eigenlast beim Lützelalviadukt. In den dunkelblauen Bereichen sind die Verformungen minimal, in den grünen und gelben Bereichen (Bögen und Nebenbögen) treten die grössten Dehnungen auf

zu Grunde liegenden Geometriemodelle haben heute das Qualitätsniveau von CAD-Modellen erreicht, ebenso können vorhandene CAD-Daten eingelesen werden. In den Bildern 3, 5 und 7 sind die Geometriemodelle der untersuchten Brücken dargestellt. Die verschiedenen Mauerwerksarten (Bogenmauerwerk, Pfeilermauerwerk, Bogenaufmauerung und Stirnmauern) wurden in den relevanten Bereichen durch unterschiedliche Materialbereiche erfasst. Auch das Längsgefälle, das die Höhe der Stirnmauern beeinflusst, sowie die Grundrisskrümmung wurden den Bestands- und Ausmassunterlagen entsprechend berücksichtigt. Die Bogenspannweiten des Lützelalviadukts (Bilder 2 und 3) betragen 14.16 m (Bogenstich 7.08 m) für die Hauptbögen bzw. 5.09 m (Bogenstich 2.54 m) für die Nebenbögen. Die Flutbrücke Braunsdorf (Bilder 4 und 5) besteht aus 24 Bögen mit der Spannweite von 8.5 m und einem Stichmass von 2.12 m. Das FE-Modell dieser Brücke beinhaltet die Bögen 17 bis 24. Die Spannweite der Hauptbögen des Viadukts Niederwiesa (Bilder 6 und 7) beträgt 14.16 m bei einem relativ geringen Bogenstich von 2.83 m. Die Modellabmessungen (Berechnungsausschnitt) betragen für

- die Lützelalbrücke 103.62 m (Länge) und 29.72 m (Höhe),
- die Flutbrücke Braunsdorf 82.18 m und 8.29 m (Höhe) und
- das Viadukt Niederwiesa 175 m (Länge) und ca. 25 m (Höhe).

NACHWEISKONZEPT UND BEWERTUNGSKRITERIEN

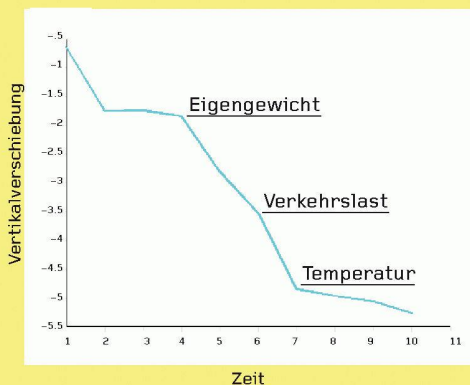
Gemäss den weltweit gültigen Vorschriften zur Standsicherheitsberechnung gemauerter Brücken dürfen im Mauerwerk Zugspannungen senkrecht zur Lagerfuge nicht und parallel zur Lagerfuge nur in begrenztem Umfang übertragen werden. Auch die übertragbaren Schub- und Druckspannungen sind begrenzt. Für die Spannungsermittlung bedeutet das, dass auftretende unzulässige Spannungen iterativ umgelagert werden müssen und ein Gleichgewichtszustand unter Ausschluss unzulässiger Spannungsgrössen zu ermitteln ist. Dieses Vorgehen wird mit FE-Berechnungen unter Zuhilfenahme nichtlinearer Materialgesetze verfolgt. In den Berechnungen wurde im Fall der Überschreitung von Festigkeiten ein ausreichendes Kraftumlagerungsvermögen der Brücken nachgewiesen, wenn die aus den Überschreitungen resultierenden Ungleichgewichtskräfte im Gesamttragwerk erfolgreich umgelagert werden können. Nach erfolgreicher Umlagerung dürfen in den Spannungszuständen der konvergierten Gleichgewichtslösung keine Überschreitungen zulässiger Spannungen auftreten.

Ein mögliches Versagen der Brücken (ein nicht ausreichendes Kraftumlagerungsvermögen) wird durch das Versagen der zentralen Tragglieder identifiziert. Hauptgegenstand der Untersuchungen sind die Mauerwerksbögen. Überbeanspruchungen der Brücken können anhand von Rissbildungen, insbesondere in den Bögen, und eines ausgeschöpften Lastumlagerungsvermögens erkannt werden. Zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit werden die auftretenden Verformungen, die Randdruckspannungen und die Lage der resultierenden Kraft im Bogenmauerwerk begrenzt. Die Beschränkung des Druckspannungsniveaus kann auch im Hinblick auf die Materialermüdung unter dynamischen Einwirkungen sinnvoll sein.

Neben dem Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit sehen die Vorschriften die Ermittlung der Belastbarkeit (der maximal aufnehmbaren Verkehrslast) vor. Die Feststellung, dass eine zulässige Spannung nicht überschritten wurde, reicht dabei für abgesicherte Aussagen über das Tragvermögen einer Mauerwerkstruktur nicht aus. Hierfür ist die Kenntnis der Versagenslast und der zugehörigen Versagensmechanismen erforderlich, die mit anschliessenden Laststeigerungsberechnungen ermittelt werden können.

BERÜCKSICHTIGUNG VORHANDENER SCHÄDIGUNGEN

Grundsätzlich sind vorhandene Schädigungen hinsichtlich einer etwa durch Rissbildungen, Gefügezerstörungen oder chemische Angriffe verursachten Reduzierung von Material-



09

eigenschaften, wie Festigkeit und Steifigkeit, zu beachten. Auch Strukturschädigungen und Imperfektionen, wie im vorliegenden Fall bleibende Pfeilerschiefstellungen, müssen im FE-Modell Eingang finden. Der Pfeiler 4 des Viaduktes Niederwiesa (Bilder 6 und 7) wies erhebliche Schäden auf. Vermutlich ist während einer strassenseitigen Baumassnahme eine Veränderung der Gründungssituation eingetreten. Mittels 3-D-Berechnungen konnte unter Annahme einer Verschieblichkeit im Fundament die vermessene Pfeilerschiefstellung nachvollzogen werden. Die daraus resultierende Zwangsbeanspruchung führte in der Folge zur Gefügauflockerung, und es stellten sich erhebliche Risse im Pfeiler ein. Der Pfeiler wurde mittels umlaufend verspannter Rundstäbe über die gesamte Pfeilerhöhe gesichert. Die zusätzliche Belastung des Pfeilers 4 sowie der angrenzenden Bögen infolge der Stützenverschiebung konnte in den Berechnungen zum Standsicherheitsnachweis berücksichtigt werden.

EINWIRKUNGEN UND BERECHNUNGSERGEBNISSE

In einem ersten Lastschritt wird der Beanspruchungszustand unter ständigen Lasten wie Eigengewicht und Erddruck generiert. Zur Identifikation der ungünstigsten Verkehrslaststellung wird anschliessend eine Überfahrt über das Brückenbauwerk simuliert. Weitere Zusatzlasten wie Temperaturlasten, Windlasten, Anfahr- und Bremskräfte etc. werden in ungünstigster Überlagerung den vorgenannten Hauptlasten aus ständigen Lasten und Verkehr hinzugerechnet.

Mit dem ersten Lastschritt «ständige Lasten/Eigenlasten» wird der Ausgangszustand für die weiteren Berechnungen erzeugt. Das mit einer idealen (unverformten) Geometrie erstellte FE-Modell wird im Lastfall Eigengewicht in die verformte Ausgangslage gebracht. Zu vergleichen ist dieser Rechenschritt mit der Erstellung des Bauwerkes, dem Abbinden des Mauerwerkes und des Füllbetons und dem Abbau der Lehrgerüste der Bögen. Als Folge des Lastfalles Eigengewicht treten Kraftumlagerungen ein, welche die Tragwirkung der Brücke aktivieren. Die in Bild 8 dargestellten plastischen Vergleichsdehnungen bzw. plastischen Aktivitäten am Gesamtmodell zeigen den Effekt der Initiierung der Ausgangslage und der damit einhergehenden Aktivierung der Bogentragwirkung. Die auftretenden plastischen Dehnungen konzentrieren sich in den Bogenaufmauerungsbereichen und resultieren hauptsächlich aus Zugspannungsumlagerungen sowie Schubspannungsüberschreitungen. Diese Umlagerungen bzw. die damit einhergehenden Plastizierungen sind als Gefügefingung zu interpretieren und nicht mit sichtbaren Rissbildungen verbunden. So entzieht sich etwa das nicht in Bogenrichtung gemauerte Mauerwerk dem Lastabtrag und wirkt zu einem gewissen Anteil als Auflast der Bögen. Infolge dieser Kraftumlagerung wird die Bogentragwirkung des in Bogenrichtung gemauerten Bereiches erst aktiviert.

Charakteristisch für den Nachweis von Viaduktbrücken ist, dass neben den Eigenlasten und den Verkehrslasten die Temperaturbeanspruchungen als wichtigste Zusatzlast den Spannungs- und Verformungszustand massgeblich mitbestimmen. In Bild 9 ist die Historie der vertikalen Scheiteldurchbiegungen des Bogens in Feld 5 des Viaduktes Niederwiesa mit dem grossen Einfluss des Lastfalls Temperatur (hier Winter, Abkühlung) dargestellt.

Für die drei untersuchten Brücken konnte die volle Standsicherheit nachgewiesen werden. Die Auslastung des Mauerwerks liegt in allen Fällen unter 50% des Mittelwerts der Mauerwerkdruckfestigkeit und ist damit auch bezüglich der Gebrauchstauglichkeit unkritisch. Auch die ermittelten Durchbiegungen der Bogenscheitel sind kleiner als $L/550$ und damit im zulässigen Bereich. Die durchgeführten Laststeigerungsberechnungen wiesen einen ausreichenden Sicherheitsabstand der ertragbaren Verkehrslast gegenüber der geplanten Verkehrsbelastung aus. Die Rechenzeiten der FE-Modelle grosser Brücken liegen für eine Lastkombination bei 5 bis 10 Stunden und damit in einem überschaubaren Bereich.

09 Historie der vertikalen Scheiteldurchbiegung des Bogens in Feld 5 des Viaduktes Niederwiesa (siehe Bilder 6 und 7). Nacheinander summieren sich die Auswirkungen des Eigengewichts (nach Einbau einer neuen Fahrbahnplatte), der Verkehrslast und der Temperatur (Abkühlung im Winter)

Roger Schlegel, Dr.-Ing., Dynardo GmbH Weimar, roger.schlegel@dynardo.de
 Roger Stahel, CADFEM AG Aadorf, roger.stahel@cadfem.ch