

# HISTORISCHE EISENBAHN BRÜCKEN



Erhalten historischer Bauwerke e. V. (Hrsg.)

# HISTORISCHE EISENBAHN BRÜCKEN

Band zur Tagung am 8. Februar 2019  
in Neuhausen a.d.F.

Schriftenreihe zur Denkmalpflege | Band 5

Fraunhofer IRB Verlag

Schriftenreihe zur Denkmalpflege  
Herausgegeben von Erhalten historischer Bauwerke e.V.  
Band 5

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-7388-0250-4  
ISBN (E-Book): 978-3-7388-0252-8

Umschlaggestaltung: Manuela Gantner | Punkt, STRICH.  
Foto: Falkenbach-Viadukt, Gabriele Patitz, Karlsruhe  
Plan: Lehrgerüst für den Falkenbach-Viadukt, Vorderansicht 1:50,  
EVS EUREGIO Verkehrsschienennetz GmbH Stolberg

Lektorat: Dr. Steffie Gawlik  
Herstellung: Andreas Preising  
Layout und Satz: Manuela Gantner | Punkt, STRICH.  
Druck und Bindung: RCOM Print GmbH, Würzburg-Rimpar

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2019  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon +49 711 970-2500  
Telefax +49 711 970-2508  
[irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)  
[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

## **GRUSSWORT**

Sehr geehrter Herr Bürgermeister Hacker,  
sehr geehrter Herr Donth,  
sehr geehrte Frau Dr. Plate,  
sehr geehrte Damen und Herren und  
liebe Kolleginnen und Kollegen,

als Vorsitzende des Vereins »Erhalten historischer Bauwerke« möchte ich Sie heute sehr herzlich in diesem schönen Jugendstilsaal des Gasthauses Ochsen in Neuhausen begrüßen. Diese Vereinstagung können wir in Kooperation mit dem Landesamt für Denkmalpflege Esslingen, insbesondere dem Fachbereich Industrie- und Technikdenkmalpflege durchführen. Dafür ganz herzlichen Dank an Sie Herr Dr. Hascher!

Der 2004 in Karlsruhe gegründete gemeinnützige Verein hat sich u. a. auf die Fahnen geschrieben, einen aktuellen und aktiven Beitrag zur Erhaltung und zur Pflege unseres kulturellen Erbes zu leisten. Mittels Veranstaltungen wie diese wollen wir die Öffentlichkeit und Entscheidungsträger hinsichtlich aktueller Themen aus den Bereichen Denkmalpflege, Wirtschaft und Wissenschaft informieren und Diskussionen und den Gedankenaustausch anregen.

Bei der heutigen Tagung hier in Neuhausen stehen historische Eisenbahnbrücken im Brennpunkt. Die Aktualität dieses Themas zeigt sich

- bei der Präsenz und Diskussion in der Tagespresse,
- in den Diskussionen in politischen und fachtechnischen Gremien,
- auf Fachveranstaltungen wie z. B. an der Technischen Akademie Esslingen,
- den vorliegenden Statistiken hinsichtlich des Bestandes und Zustandes an alten und nicht nur denkmalgeschützten Brückenbauwerken aus Beton, Naturstein sowie Stahl- und Holzkonstruktionen und
- insbesondere auch an Ihnen als zahlreiche Teilnehmer dieser Tagung aus ganz Deutschland und Gästen aus der Schweiz und Österreich.

---

Herzlichen Dank für Interesse und Ihr Kommen – wir wissen zu schätzen, dass der Weg nach Neuhausen nicht unbedingt einfach war.

Der aktuelle Zustand alter Eisenbahnbrücken (und auch Straßenbrücken dürfen nicht ausgenommen werden) ist uns allen nicht unbekannt und deren Instandhaltung, Instandsetzung bzw. Abschätzung der vorhandenen Tragfähigkeit und Nutzungsdauer gehört bei vielen von Ihnen zum Tagesgeschäft auf Seiten der Nutzer, politischen Entscheidungsträger, Planer und ausführenden Firmen.

Vertreten sind heute die

- Deutsche Bundesbahn mit der DB Netz AG und DB Engineering & Consulting GmbH,
- Privat- und Museumsbahnen,
- die Schweizerische Bundesbahn AG,
- Städte und Gemeinden, Landschaftsverbände,
- verschiedene Landesdenkmalämter,
- zahlreiche renommierte Ingenieur- und Architekturbüros aus ganz Deutschland,
- Vertreter der Universitäten und Hochschulen,
- ausführende Firmen und
- nicht zu vergessen Vertreter aus der Bundesregierung mit dem Tätigkeits-schwerpunkt Verkehr, digitale Infrastruktur und Eisenbahninfrastruktur, Herr Donth herzlichen Dank für Ihr Kommen.

Es sind alle Bereiche vertreten und können sich informieren, austauschen und vernetzen, was auch ein Ziel des Vereins ist:

Politiker – Eigentümer – Nutzer – Denkmalpfleger (Beschützer) – Bauschaffende.

Im heutigen Vortragsprogramm spannen wir einen Bogen

- beginnend mit Grundthesen zu Eisenbahnbrücken in der Denkmalpflege
- über die Bau- und Konstruktionsgeschichte von Bogenbrücken hin zu
- modernen Methoden und Verfahren der Bestandserfassung und Bewertung bis
- zur Abschätzung und Beurteilung der vorhandenen Tragfähigkeit in Bezug zur zukünftigen Belastung und
- einem von der DBU finanzierten Forschungsprojekt »*Entwicklung einer praxisorientierten Arbeitshilfe zur denkmalgerechten Instandsetzung und ressourcenschonenden Instandhaltung umweltgeschädigter historischer Eisenbahnbrücken*«.

Abgerundet wird das Programm durch Beispiele aus der Praxis:

- der Instandsetzung einer Eisenbahnbrücke aus Nagelfluh und
- einem Vortrag über die älteste Steinbrücke Deutschlands, die Steinerne Brücke in Regensburg. Deren denkmalgerechte Instandsetzung wurde jüngst erfolgreich abgeschlossen.

Können die oft mehr als 100 Jahre alten und mehr oder weniger täglich genutzten Bauwerke – oft dem Hochleistungsbetrieb ausgesetzt, wenn man an die DB denkt – für die zukünftige Nutzung erhalten und ertüchtigt werden oder ist ein Abriss und Neubau die einzige Alternative?

Zweifelslos stehen hier Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gegen Abwägungen hinsichtlich des Erhalts unsere Kulturguts, unserer Ingenieurskunst und der Auseinandersetzung mit dem Bestand.

Wir wollen uns diesem Spannungsfeld stellen und mit den heutigen Vorträgen aus der Praxis der Planer und Ingenieure einen Gedanken- und Meinungsaustausch hinsichtlich der Möglichkeiten und Chancen für eine Erhaltung Historischer Eisenbahnbrücken anbieten.

An dieser Stelle danke ich den Referenten sehr herzlich für Ihr außerordentliches Engagement, für Ihre Vorträge und die Beiträge im Tagungsbuch.

Ich wünsche Ihnen heute einen spannenden Tag mit vielen Ideen, Anregungen und vielleicht auch dem einen oder anderen neuen Gedanken oder Blickwinkel.

Dr.-Ing. Gabriele Patitz

Vorstandsvorsitzende





**Michael Donth**

Mitglied des Deutschen Bundestages

## GRUSSWORT

Sehr geehrte Frau Vorsitzende Dr. Patitz,  
Sehr geehrter Herr Bürgermeister Ingo Hacker,  
Sehr geehrte Frau Dr. Plate,  
meine Damen und Herren,

ich danke Ihnen herzlich für die Einladung nach Neuhausen und freue mich, dass ich als Verkehrs- bzw. als Bahnpolitiker meiner Fraktion heute beim Verein »Erhalten historischer Bauwerke« zu Gast sein darf.

Besonders angenehm ist für mich am heutigen Termin, dass es einmal nicht um den neuen großen Bau der Eisenbahn hier in der Nachbarschaft geht und darum, wieviel Mehrkosten er in unerfreulicher Weise verursacht. Sicherlich wird auch dieser Bau dank seiner hochqualitativen Architektur einmal im positiven Sinne historisch sein, obwohl auch der Bonatz-Bau und dessen Erhalt bei der Diskussion in der Landeshauptstadt eine große Rolle gespielt hat.

Heute geht es um den Erhalt historischer Eisenbahnbrücken, ein Thema, das zugegebenermaßen noch nicht lange in mein bahnpolitisches Bewusstsein gerückt ist, dafür aber im vergangenen Herbst umso intensiver auch als Mitglied im Ausschuss für Tourismus.

Vor allem im ländlichen Raum sind Baudenkmäler wichtige Faktoren für die touristische Attraktivität der Regionen.

Nahezu zeitgleich mit Ihrer freundlichen Einladung zur heutigen Veranstaltung kam mein Kollege Volkmar Vogel auf mich zu. Er ist Berichterstatter meiner Fraktion für den Denkmalschutz. Er machte mich auf die Initiative des Deutschen Nationalkomitees für Denkmalschutz aufmerksam, die erreichen möchte, dass denkmalpflegerische Anliegen in Zukunft bei Investitionsmaßnahmen der Bahn besser berücksichtigt werden.

---

Gerade das Beispiel der Eisenbahnbrücke in Albbrook zeigt ja, dass es sowohl finanziell als auch organisatorisch von Vorteil wäre, wenn man bei anstehenden Brückensanierungen die Denkmalschutz-Anliegen frühzeitig in den Planungsprozess einbinden und gesondert würdigen würde, damit sich der Denkmalschutz sehr früh einbringen kann und nicht erst nach Vorliegen der Planung.

Die Vertreter vom Denkmalschutz-Komitee haben uns dann bei einem gemeinsamen Gespräch in Berlin erläutert, wie man das machen könnte. Der neue Konzernbevollmächtigte der Deutschen Bahn für Baden-Württemberg, Thorsten Krenz, war bei dem Gespräch auch mit dabei. Er von Seiten der Bahn und wir von Seiten des Bundestags haben die Vorschläge aufgenommen und sind jetzt dabei, sie bei der Bahn und in die politischen Gremien einzubringen. Gerade in der vergangenen Woche hatte ich die Gelegenheit, das Anliegen in einem persönlichen Gespräch mit dem Aufsichtsratsvorsitzenden der Deutschen Bahn, Michael Odenwald, anzusprechen. Verschiedene Vorschläge wären dabei aus meiner Sicht nicht nur kurzfristig umsetzbar, sondern würden sogar zu Zeit- und Geldeinsparungen führen. Ich denke dabei an die Einführung eines Denkmalkatasters bei der DB-Netz, damit vor Beginn von Planungen dieses Thema bereits berücksichtigt werden kann und nicht erst im Rahmen der Anhörungen der Träger öffentlicher Belange, wenn schon viel Zeit und Ingenieurskunst investiert wurde.

Die gesellschaftliche Wertschätzung für historische Eisenbahnbauten hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Viele ehrenamtliche und berufspezifische Unterstützer bringen sich mit viel Herzblut für den Erhalt solcher Denkmäler der Verkehrs-, Technik- und Industriegeschichte ein. Dazu gehören auch Sie, meine Damen und Herren, wofür ich Ihnen großen Dank und Respekt ausspreche!

Historische Eisenbahnen und ihre Anlagen üben eine große Faszination auf uns Menschen aus, wenn wir z. B. auf einer Dampflok fahren oder unter den riesigen Steinbögen einer hundertjährigen Eisenbahnbrücke stehen. Sie sind ein Stück unserer Kulturgeschichte und liegen uns deshalb besonders am Herzen.

Wir handeln im kulturellen und gesellschaftlichen Interesse, wenn wir uns für den Erhalt historischer Eisenbahnanlagen einsetzen.

Darum setze ich mich gerne dafür ein, dass die Vorschläge des Denkmalschutz-Komitees Gehör finden. Derzeit verhandelt die Bundesregierung mit der Deutschen Bahn über eine neue Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung, für Fachleute die LuFV III, für die Maßnahmen und die Finanzierung zum Erhalt der Schieneninfrastruktur. Das ist jetzt die Chance, um in der neuen Vereinbarung ein paar kleine Anpassungen vorzunehmen, damit der Denkmalschutz bei Erhaltungsmaßnahmen an der Schieneninfrastruktur besser berücksichtigt wird, etwa indem ausdrücklich die Option der Ertüchtigung historischer Anlagen als wirtschaftliche Alternative aufgenommen wird oder die Kosten für die unter Umständen aufwändigeren Voruntersuchungen ebenfalls übernommen werden.

Allerdings müssen wir auch die berechtigten Forderungen des Rechnungshofes beachten und mit den Steuergeldern verantwortlich umgehen.

Der Bundestag ist in die Verhandlungen leider nicht eingebunden, so dass ich mich dort nicht direkt einbringen kann. Zusammen mit meinem Kollegen Volkmar Vogel bin ich aber dabei, die Vorschläge über andere Kanäle einzuspeisen.

Meine Damen und Herren, Sie sehen, Sie sind mit Ihren Bemühungen um historische Eisenbahnbrücken nicht allein. Sie haben auf Seiten der Politik durchaus Unterstützer, die Ihren Einsatz flankieren. Vielleicht gibt Ihnen dieses Wissen noch zusätzlichen Schwung für Ihre heutige Tagung, ohne dass ich jetzt in den Raum stellen oder gar versprechen will, dass alles eine realistische Chance auf Umsetzung hätte. Der Wille seitens der Bahn und bei den Fachpolitikern ist auf jeden Fall aber da.

Ich wünsche Ihnen auf jeden Fall erfolgreiche Gespräche und gute Anregungen.

Vielen Dank

Michael Donth

CDU Abgeordneter des Wahlkreises Reutlingen,  
Mitglied im Ausschuss für Verkehr und digitale Infrastruktur,  
stellvertretendes Mitglied im Haushaltausschuss u. für die CDU/CSU Bundestagsfraktion,  
Mitglied im Eisenbahninfrastrukturbirat



## GRUSSWORT

Sehr geehrte Frau Patitz,  
sehr geehrter Herr Donth,  
meine sehr geehrten Damen und Herren,

wer einmal mit dem Glacier-Express durch Tunnel und über Brücken durch die grandiose Schweizer Landschaft gefahren ist, vergisst dieses Erlebnis möglicherweise nie wieder. Auch die Hohenzollernbrücke in Köln ist ein einzigartiges, die Landschaft, das Stadtbild, die Kultur prägendes Bauwerk. Und das sind nur zwei Beispiele von unendlich vielen. Brücken verbinden Orte und Menschen, machen Wege kürzer und sicherer. Historische Eisenbahnbrücken sind nicht selten Wahrzeichen einer Region und von hoher Ästhetik und sie sind Symbole für großartige Ingenieursleistungen. Der Erhalt dieser Brücken ist deshalb von großer Bedeutung für uns alle.

Der Fachkongress in unserem wunderschönen – historischen – Ochsensaal und diese daraus resultierende Broschüre ist ein wichtiger Baustein, um vorhandenes Wissen zu vernetzen und die Politik, die Geldgeber und Entscheider einzubinden und mitzunehmen. Ein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang dem Verein »Erhalten historischer Bauwerke« und allen, die sich in herausragender Weise für den Erhalt der historischen Eisenbahnbrücken einsetzen und die die Tagung und die Broschüre mit ihren Erfahrungen und ihrem Fachwissen bereichern. Historische Bauwerke setzen markante städtebauliche Akzente, sie sind unsere Geschichte, Teil unserer Baukultur, Teil unseres Lebens.

Ingo Hacker

Ingo Hacker ist Bürgermeister von Neuhausen auf den Fildern, im Gemeindetag Baden-Württemberg Vorsitzender des Ausschusses für Verkehr, Bauen und Digitalisierung und auf Bundesebene im Deutschen Städte- und Gemeindebund der Vorsitzende des Ausschusses Wirtschaft, Tourismus und Verkehr. Außerdem ist er ordentliches Mitglied im Beirat Baukultur des Landes Baden-Württemberg.





Baden-Württemberg

LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE  
IM REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART

## GRUSSWORT

Sehr geehrter Herr Abgeordneter Donth [MdB],  
sehr geehrter Herr Bürgermeister Hacker,  
liebe Gabriele Patitz,  
sehr geehrte Damen und Herren,

zunächst herzlichen Dank für die Gelegenheit, heute hier im Namen des Landesamtes für Denkmalpflege ein Grußwort sprechen zu dürfen.

Natürlich freue ich mich, dass Sie für diese spannende Tagung ein Kulturdenkmal als Veranstaltungsort gewählt haben.

Der Gasthof Ochsen prägt mit seinem farbigen Fachwerk repräsentativ den südlichen Zugang zum Ortskern. Während der Gasthof selbst aus der Mitte des 19. Jahrhunderts stammt, ist der herrliche Jugendstilsaal, in dem wir uns hier befinden von 1903. In den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts hat das Landesdenkmalamt die Renovierung mit rund 150.000 TDM gefördert.

Mit der Tagung an diesem Ort tragen Sie also indirekt zum Denkmalerhalt bei.

Leider kommt man aber mit der Eisenbahn nicht bis nach Neuhausen. Immerhin haben Sie eine Brücke hier in Neuhausen, über den Sulzbach. Sie wurde übrigens schon in den 1930er Jahren vom württembergischen Denkmalrat ins Denkmalbuch eingetragen. Die Brücke selbst ist eher kurz, der darauf stehende Nepomuk dafür umso auffälliger; eine wirklich schöne Arbeit aus dem Ende des 19. Jahrhunderts.

Brücken, hier insbesondere Steinbogenbrücken, finden sich schon sehr früh in den Denkmallisten des Landes. Der Denkmalwert von – insbesondere eisernen – Eisenbahnbrücken wurde jedoch erst deutlich später erkannt – zum einen aufgrund des geringeren Alters aber auch aufgrund der Tatsache, dass Denkmäler der Technik und der Ingenieurbaukunst zunächst in ihrem schützenswerten historischen Wert erkannt werden mussten.

---

1976 erschien erstmals ein Band über Technikdenkmale im Rheinland und in Baden-Württemberg widmete sich erst 1991 ein Buch dieser Gattung. Dem speziellen Sachverstand, der die Bewertung und Erhaltung von Denkmalen der Technik- und Industriegeschichte erfordert, werden wir im Landesamt für Denkmalpflege durch unseren Fachreferenten Dr. Michael Hascher gerecht.

Der Sonderforschungsbereich 315 an der Universität Karlsruhe/ KIT – »Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke«, eine Wurzel Ihres Vereins, spielt bei diesen Fragen eine wichtige Rolle. Seine Bedeutung für die Denkmalpflege kann nicht oft genug betont werden. Hier wurden von 1985–2000 die wissenschaftlichen Grundlagen für einen behutsamen Umgang mit historischen Bauwerken gelegt: zerstörungsfreie Untersuchungs- und Prüfverfahren für die historische Substanz entwickelt und neue Reparatur- und Instandsetzungsverfahren ermöglicht.

Von zahlreichen Publikation erwähne ich hier das 1989 erschienene Sonderheft zur Betonsanierung – sozusagen visionär. Im Landesamt für Denkmalpflege läuft gerade ein Forschungsprojekt zu diesem aktuell vielfach in der Sanierung befindlichen, sperrigen Baumaterial. In den 1980er Jahren war unser Kollege Ulrich Boeying in den Sonderforschungsbereich abgeordnet und hat dort intensive Forschungen zu Eisenbahnbrücken geleistet. 1995 veröffentlichte er in der Reihe Arbeitshefte des Landesamtes für Denkmalpflege einen Band über Eiserne Eisenbahnbrücken in Baden-Württemberg. Zu Massivbrücken gibt es bisher keine gleichwertigen Übersichten.

Die heutige Tagung scheint ein Beitrag zum Schließen einer Lücke zu sein – und das nicht nur hinsichtlich Fragen nach dem Denkmalwert, sondern auch zur Ermittlung des Bauwerkszustandes und zu Sanierungsstrategien. Referenten und Teilnehmer kommen von weither hier in Neuhausen zusammen – dies zeugt von der allseits bekannten Qualität der Veranstaltungen Ihres Vereins. Vielen Dank für die Organisation dieser Tagung.

Brücken haben für die Menschen eine besondere Bedeutung. Ich erinnere nur an den hohen symbolischen und emotionalen Wert der Brücke von Mostar, die mit internationale Hilfe wieder neu aufgebaut wurde. Mit diesem Schicksalsbauwerk sind Brücken in Baden-Württemberg nicht vergleichbar. Trotzdem hatten auch wir in diesem Jahr einen Petitionsfall, der immerhin den Bundestag beschäftigte. Die Brücke in Albbruck (Waldshut-Tiengen) hat für die Menschen dort einen hohen identitätsstiftenden Wert. Die Bahn will sie abreißen. Warum? Weil sie Abriss und Neubau vom Steuerzahler finanziert bekommt, den normalen Bauunterhalt dagegen muss sie selbst finanzieren. Dabei ist Pflege und Bauunterhalt die beste Gewähr für einen langfristigen Erhalt. Unabhängig vom Denkmalschutz sollte dieser ressourcenschonende Weg gegangen werden. Und die graue Energie gehört längst in die Bilanzierung aufgenommen.

Ein Grund für den schnellen Weg zum Neubau ist die sog. LuFV, die Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung zwischen dem Bund und der Deutschen Bahn AG. Die bundesdeutsche Denkmalpflege, vertreten durch das Deutsche

Nationalkomitee, setzt sich seit Jahren intensiv dafür ein, dass hier eine Veränderung erreicht werden kann. Bisher verhallen Gespräche mit der Bahn erfolglos und die politische Unterstützung – nun, Herr Abgeordneter Donth, hier sind wir Ihnen für Ihre Initiative dankbar.

Wenn die Deutsche Bahn übrigens nicht Eigentümerin ist, so gibt es Vorzeigemodelle wie das Beispiel des Laufenmühle- Viadukt der Schwäbischen Waldbahn, deren wichtigster Gesellschafter die Stadt Welzheim ist. Das Laufenmühle-Viadukt konnte mit Hilfe moderner Analysemethoden, fachlicher Betreuung durch das LAD und verschiedener Zuschüsse erhalten werden und blieb, wie die Presse Ende letzter Woche meldete, sogar im Kostenplan.

Ich wünsche Ihnen einen interessanten Informationsaustausch und gute Gespräche.

Dr. Ulrike Plate

Landeskonservatorin des LAD Esslingen im RP Stuttgart  
Referatsleiterin Bau- und Kunstdenkmalpflege, stellv. Abteilungsleiterin Abt. 8



## VORWORT

**Spezialisten stellen im Hinblick auf Historische Eisenbahnbrücken ihre Forschungen, Prüfungen, Berechnungen, Ertüchtigungen und Sanierungen vor**

Seit 15 Jahren verfolgt der Verein »Erhalten historischer Bauwerke«, Karlsruhe bundesweit die verantwortungsvollen Aufgaben des Erhaltens und der Pflege des kulturellen Erbes und der Förderung der Denkmalpflege.

Im Fokus von Seminaren, Tagungen und Veröffentlichungen stehen naturwissenschaftliche Untersuchungen an historischen Bauwerken, deren Bewertung und u. U. Ertüchtigungen. Der Verein will damit auch einen Beitrag zur Förderung der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft mit der Praxis leisten.

Die Tagung am 08.02.2019 in Neuhausen a. d. F. schaut auf Historische Eisenbahnbrücken.

*Michael Hascher* führt in das Thema ein und umreißt das gesamte Aufgabenspektrum in dem er feststellt, dass »Infrastrukturobjekte, besonders Brücken, einen sehr großen Teil der prominenten (Kultur-)Denkmale der Industrie und Technik ausmachen. Dabei spielt die Betreuung von Brücken in der praktischen Denkmalpflege eine große Rolle. Generell besteht die Schwierigkeit beim Erhalt historischer Brücken darin, dass es auf der einen Seite einen hohen Denkmalwert gibt. Dieser wird erstens durch die meist gute Wahrnehmung der Bauwerke im öffentlichen Raum und die dadurch oft (und beabsichtigte) prägende Wirkung auf die Kulturlandschaft bestimmt. Zweitens ist die operationale Erhaltung der Bauwerke wichtig, die in der Regel weiter als Brücken benutzt werden. Auf der anderen Seite ergeben sich gerade aus der Nutzung Probleme, denn die Anforderungen wachsen und die Brücken lassen sich oft nur schwer denkmalgerecht daran anpassen. Bemerkenswert ist schließlich der Überlieferungszustand der

---

Eisenbahnbrücken. In der Regel handelt es sich um Bauwerke, die noch ihrem ursprünglichen Zweck dienen. In einigen Fällen sind aus den Eisenbahn- auch Straßen- oder Geh- und Radwegbrücken geworden. Eine Sanierung im Betrieb ist zwar technisch kein Problem und auch organisatorisch zu lösen, etwa mit Ersatzbrücken, in der Praxis brechen die damit verbundenen Kosten und Einschränkungen aber vielen denkmalgerechten Sanierungen ‚das Genick‘. Für die Brücken der Deutschen Bahn AG, die wiederum den Hauptteil des Bestandes denkmalgeschützter Eisenbahnbrücken ausmachen, kommt eine Besonderheit der Finanzierung erschwerend hinzu. Der häufigste Grund, weshalb Brücken in die Diskussion kommen, ist die Tragfähigkeit. Die neuere Denkmalpflege ist meist bestrebt, das historische Tragwerk in seiner Funktion zu erhalten. Die heutigen Belastungen sind aber oft höher oder zumindest in Geschwindigkeit und allgemein in der Belastungsart andere, als es in der Bauzeit der Fall war. Heute werden neue Methoden zum Bestandserhalt entwickelt. Grundlage sollte stets eine Bauaufnahme sein, die für die Bauteile (Überbau, Widerlager/Pfeiler, Belagsaufbau) Material, Alter, Verformungen, Schäden erfasst. Ebenso ist eine Auseinandersetzung mit der Bestandsstatik und dem ursprünglichen Entwurfskonzept unerlässlich. Im Kern heißt das, sich mit der Leistungsfähigkeit des historischen Tragwerks auseinanderzusetzen, das ja durchaus repariert werden kann.«

*Stefan Holzer* spricht von Protagonisten des Betonbaus – von unbewehrten Stampfbeton-Eisenbahnbrücken mit drei Gelenken. »Je nach Herstellungs firma wurden dabei Eisengelenke oder aber Gelenke aus Granitsteinen bevorzugt. Wichtigste Beispiele dieser frühen Eisenbahnbrücken sind: Inundationsviadukt der Marienbrücke Dresden (1894), Chemnitztalviadukt Chemnitz (1898), Eisenbahnviadukt Altenburg-Langenleuba (1899), Illerbrücke Kempten (1903), Eisenbahnbrücke Garching/Alz (1907), Pegnitzbrücke Nürnberg-Schniegling (1909). Es handelt sich nicht um ein großes Œuvre. Umso mehr sollte bei diesen wichtigen Zeugnissen sorgfältig auf eine möglichst unverfälschte Erhaltung des Bestandes geachtet werden. Dazu zählt neben der Erhaltung des Tragwerks auch die Erhaltung der Spuren des Herstellungsvorgangs, der Schichtung der lagenweisen Einbringung des Stampfbetons, Spuren der Abschalung für das Betonieren in Sektoren, Abdrücke der Schalbretter. Sorgen über eine mangelhafte Betonqualität sind meist unangebracht. Wie bei Werksteinbögen, sind auch bei Stampfbetonbögen die effektiven Druckspannungen im Tragwerk gering. Überdies wurde der beste Beton in der Regel im Haupttragwerk angebracht. Schlechte Betonqualität in Zwicken oder Ausfüllungen sind kein Grund zur Sorge. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte können die frühen Zeugnisse des Betonbaus genauso lange erhalten bleiben wie die gleichzeitigen Natursteinbrücken.«

*Markus Assing* verfolgt ein Forschungsprojekt zur Entwicklung einer praxisorientierten Arbeitshilfe zur denkmalgerechten Instandsetzung und ressourcenschonenden Instandhaltung umweltgeschädigter historischer Eisenbahnbrücken. »Zur Vermeidung der Konflikte zwischen der Deutschen Bahn und der

Denkmalbehörde werden Lösungen entwickelt, die sowohl die Belange des Denkmalschutzes als auch die mit dem Eisenbahnverkehr im Zusammenhang stehenden besonderen betrieblichen Anforderungen berücksichtigen. Eine Brücke soll solange genutzt werden, wie es ihr Zustand, ihre Tragfähigkeit und Tragsicherheit sowie die Wirtschaftlichkeit im Bauunterhalt zulassen. Alter und Konstruktionsart allein sind dabei bereits heute keine ausreichenden Kriterien mehr, eine Brücke zu ersetzen. Damit stimmen die wirtschaftlichen Grundsätze der Bahn im Prinzip mit den Zielen der Denkmalpflege zur Erhaltung historischer Bahnbrücken überein. Dennoch werden häufig auch denkmalgeschützte Eisenbahnbrücken durch Neubauten ersetzt. Aktuelle Recherchen ergeben, dass beispielsweise in den letzten 10 Jahren etwa 400 Gewölbe- und Mauerwerksbrücken abgebrochen wurden. In der Praxis des Brückenbaus zeigt sich, dass die Denkmalbehörden in die sehr spezifischen Planungsprozesse der Bahn erst spät und wenig intensiv einbezogen werden. Die Planungen der Bahn sind meist bereits so weit fortgeschritten, dass Umplanungen nur mit einem erheblichen zeitlichen und finanziellen Aufwand möglich sind. Daher tritt spätestens dann, wenn bei den Denkmalbehörden ohne weitere vorangegangene Abstimmungen die Rückbaugenehmigung beantragt wird ein heftiger Konflikt zu Tage. In einer bauwerksbezogenen gesamtwirtschaftlichen Betrachtung sind jedoch der Erhalt und die Ertüchtigung einer Eisenbahnbrücke im Vergleich zum Neubau in vielen Fällen günstiger. Insbesondere bei den theoretisch nahezu unbegrenzt haltbaren Gewölbebrücken ist daher die Entscheidung für einen Neubau für Ingenieure, die auch die Begrenztheit der natürlichen Ressourcen und nachhaltige Konzepte der Erhaltung und Ertüchtigung im Blick haben, nur schwer nachvollziehbar.«

*Andreas Bruschke* ist Spezialist auf dem Gebiet der 3D-Fotogrammetrie und setzt sie zur Dokumentation und Vermessung von Natursteinbrücken ein wie z.B. am Falkenbach-Viadukt. »Die Höhe der Brücke und der teils dichte Baumbestand (darunter) lassen eine Aufnahme von unten nur teilweise zu. Deshalb kommen Laserscanner hier nicht in Frage. Die oberen Abschnitte müssen aus teils geringem Abstand mit Hilfe eines Multikopters fotografiert werden. Der Einsatz dieser Technik ist heute Standard. Das Verfahren ist durch flexible Aufnahmedispositionen vielseitig einsetzbar - von kleinsten Objekten, aufgenommen mit Makroobjektiven zur Erfassung von Oberflächenstrukturen, bis zu Geländeaufnahmen. Allein die Photogrammetrie ist durch den Einsatz von Arbeitsbühnen, Hubschraubern und Multikoptern, also bewegten Objekten, in der Lage, sonst unzugängliche Bauteile in guter Abbildungsqualität zu erreichen. Orthofotos können Bauaufnahmezeichnungen sinnvoll ergänzen. Sie erhöhen deren Aussagekraft und Informationsgehalt durch die anschauliche fotografische Wiedergabe. Aufmaß und Darstellungsinhalt beschränken sich auf die Baukonstruktionen. Gegebenenfalls wird das Fugenbild in den Zeichnungen ergänzt. Verschiedene Materialien, Zustand und Schäden sind in den Orthofotos deutlich sichtbar.«

---

*Gabriele Patitz* schafft mittels Bauradar im Vorfeld von Planungen und Entscheidungen hinsichtlich der eventuellen Erhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen möglichst zerstörungsfrei Klarheit über den aktuellen Zustand des Objektes. »Für die weitere Betriebssicherheit und Nutzung als Eisenbahnbrücke müssen vorhandene Schadensbilder an Bögen und Pfeilern erfasst, beurteilt und der Baubestand begutachtet und bewertet werden. Aufgrund interdisziplinärer Zusammenarbeit und flächiger Radarerkundung eröffnete sich die Möglichkeit, ein an die tatsächlichen Verhältnisse angepasstes Sanierungskonzept zu entwickeln. Es erfolgte eine gezielte und minimierte Sanierung, deren Qualität mittels Radaruntersuchungen während des laufenden Bauprozesses kontrolliert worden ist.«

Für *Andreas Bewer* war die Untersuchung zum Tragverhalten des Falkenbach-Viadukts ein Prozess der Annäherung an das Bestandsbauwerk, der die Radaruntersuchungen, Bauteiluntersuchungen und Materialuntersuchungen begleitet hat. »In intensiver interdisziplinärer Kommunikation stellte sich die Bewertung des Risikos einer Ringseparation als die zentrale Aufgabenstellung dar. Ganz konkret ergab sich daraus die Frage, ob die vorgefundenen Hohlräume in Brückenbögen injiziert werden müssen, um so an allen Stellen einen Verbund zwischen den Bogenringen des Viadukts sicherzustellen, oder ob trotz eines partiellen Ausfalls der Kraftschlüssigkeit zwischen den Mauerwerksringen immer noch die erforderliche Tragfähigkeit gewährleistet wird. Das Viadukt besteht aus zwei bündig aneinander gebauten Bogenbrücken mit acht Öffnungen über eine Gesamtlänge von ca. 145 m. Eine erste Brücke wurde 1889 eingeweiht. Für einen zweigleisigen Ausbau der Bahnstrecke ist 1907 ein zweites Viadukt in gleicher Bauweise westlich angebaut worden. Die Untersuchung an den Brücken kam zu dem erfreulichen Ergebnis, dass eine Injektage der mit Bauradar vorgefundenen Hohlräume nicht erforderlich ist und dass die Mauerwerksbrücke nach einer üblichen Fugeninstandsetzung, verbunden mit einer Modernisierung des Überbaus, in Zukunft die Funktion einer Eisenbahnbrücke wieder erfüllen kann. Bauwerkserhalt und Funktionserhalt bedingen sich gegenseitig. Nicht Abreißen ist immer eine Option. Das zu prüfen und den Bauwerkserhalt ernsthaft in Erwägung zu ziehen ist eine soziokulturelle, ökologische und ökonomische Pflichtaufgabe des Betreibers.«

*Erik Meichsner* stellt vor, dass »mit der Instandsetzung des rund 160 Jahre alten Eisenbahnviaduktes ein Wahrzeichen Traunsteins und der Ingenieurbaukunst für die weitere Nutzung ertüchtigt werden konnte. Eine neue Abdichtung und Entwässerung erhöhen die Dauerhaftigkeit und beheben die Hauptschadensursache der Stein- und Fugenschäden am Natursteinmauerwerk aus Nagelfluh. Die Königlich Bayerische Staats-Eisenbahn baute die sogenannte Bayerische Maximiliansbahn als Ost-West-Verbindung zwischen Salzburg und Ulm. Auf dem 1860 eröffneten letzten Teilabschnitt Traunstein-Salzburg ist das Viadukt in Traunstein das imposanteste Bauwerk. Es wurde fünfjochig mit rustizierten Rundbogenöffnungen 1859 fertig gestellt. Das Eisenbahnviadukt ist als Einzeldenkmal

in der Denkmalliste des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege aufgeführt und als Wahrzeichen Traunsteins liegt die Erhaltung und fachgerechte Instandsetzung im öffentlichen Interesse. In den 1950er Jahren wurden bereits grundlegende Instandsetzungen der Abdichtung, der Entwässerung und des Geländers durchgeführt. Die Grenze der Dauerhaftigkeit dieser Maßnahme war jedoch spätestens in den 1990er Jahren erreicht. 2014 sind dann Bauarbeiten am gesamten Bauwerk zur Instandsetzung und Erneuerung der Fahrbahnplatte, der Gleisanlagen und der Mauerwerksoberflächen umgesetzt worden. Zur Aufrechterhaltung des Verkehrs durch Personen- und Güterzüge erfolgte auf der hoch frequentierten Strecke nach Österreich eine halbseitige Sperrung. Im gesperrten Gleis wurden die Arbeiten zur Herstellung der Stahlbetonplatte und der Abdichtungen durchgeführt, während im Nachbargleis der Bahnbetrieb weiter verlief.«

*Ralph Egermann* berichtet von der Instandsetzung Deutschlands ältester Steinbogenbrücke in Regensburg, die im Juni 2018 wieder zur Nutzung für Fußgänger und Radfahrer freigegeben worden ist. »Die zunehmenden Nutzungsanforderungen in der Vergangenheit beeinflussten maßgeblich die Einwirkungen auf die Brücke. Am Ende waren es immer schwerer werdende Transportmittel, die der verbreiterten Brücke die höchsten wechselnden Lasten in ihrer langen Geschichte aufzwangen. Diese Lasten haben die Brücke nachweislich erheblich geschädigt und nach den Sanierungen in den sechziger Jahren neue umfangreiche Instandsetzungen notwendig gemacht. Das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege erwartete von der Instandsetzung der Steinernen Brücke, dass sie behutsam, nachhaltig, denkmalgerecht, unaufdringlich, selbstverständlich und ehrlich durchgeführt wird. Dies galt sowohl für den Umgang mit den vorhandenen Bauteilen und Baustoffen als auch für die Verwendung von Reparaturmaterialien sowie für den Einbau neuer Bauteile. Für die Stadt Regensburg als Bauherr und Verantwortliche für ein Verkehrsbauwerk, das Teil einer Landesstraße ist, bestand die Notwendigkeit, dass bei der Instandsetzung die aktuelle Vorschriftenlage für Verkehrsbauwerke bzw. Brücken Berücksichtigung fand und dass die Ausführungen den Bedingungen der Wirtschaftlichkeit, der Funktionsfähigkeit und der Dauerhaftigkeit folgten. Die untere Denkmalschutzbehörde der Stadt, die als genehmigendes Organ ebenfalls Bauherrnfunktion übernahm, verfolgte das Ziel, das Bau- und Kulturdenkmal so unverändert wie möglich zu erhalten. Die ursprünglich geschätzten Gesamtkosten für die Instandsetzungsarbeiten von 20 Mio. Euro wurden dabei eingehalten.«



## INHALT

Michael Hascher	
Eisenbahnbrücken in der Denkmalpflege.	
Grundthesen, Einführung in das Thema	25
Stefan M. Holzer	
Unbewehrte Stampfbeton-Bogenbrücken.	
Geschichte, Konstruktion und Tragverhalten	41
Marcus Assing, Falk Hoffmann-Berling	
Ein Forschungsprojekt zu einem »Brückenschlag«	55
Andreas Bruschke	
Anwendung der 3D-Photogrammetrie zur Dokumentation	
und Vermessung von Natursteinbrücken	61
Gabriele Patitz	
Zustandserfassung unsanierter und saniert	
Brückenbauwerke mit Bauradar. Beispiele	
Laufenmühle-Viadukt und Falkenbach-Viadukt	71
Andreas Bewer	
Untersuchungen zum Tragverhalten von	
Mauerwerksbögen. Beispiel Falkenbach-Viadukt	87
Erik Meichsner	
Praxisbeispiel – EÜ Traun. Instandsetzung einer	
Eisenbahnbrücke aus Nagelfluh	103
Ralph Egermann	
Statt Schienenverkehr Fußgänger und Radfahrer.	
Aspekte zur Instandsetzung der Steinernen Brücke	
in Regensburg	113
Autorenverzeichnis	136



Michael Hascher

## **EISENBAHNBRÜCKEN IN DER DENKMALPFLEGE**

### **Grundthesen, Einführung in das Thema**

»Brücke, Mühle und Fabrik« – der Titel des 1991 vom damaligen Landesdenkmalamt Baden-Württemberg herausgegebene Überblicksband zu technischen Kulturdenkmälern – ist mehr oder weniger eine zutreffende Aufzählung der Objektgattungen, bei denen die Industriedenkmalpflege am häufigsten in die Beratung von Einzelfällen einbezogen wird. Infrastrukturobjekte, besonders Brücken, machen einen sehr großen Teil der prominenten (Kultur-)Denkmale der Industrie und Technik aus.<sup>1</sup> Dabei spielt die Betreuung von Brücken in der praktischen Denkmalpflege eine große Rolle.

### **Denkmalpflege und Verkehr – eine lange (Forschungs-)Geschichte**

Brücken standen gewiss nicht am Beginn der Denkmalpflege, wurden aber schon relativ früh als denkmalfähig angesehen. So gab es bereits ab 1902 – lange vor Bestehen von Denkmalschutzgesetzen – eine Initiative und öffentliche Auseinandersetzungen um z.B. den Erhalt der Heidelberger Neckarbrücke beim geplanten Ausbau des Neckars sicherzustellen.<sup>2</sup> Später, in den 1950er-Jahren, bereitete der steigende Autoverkehr den Denkmalpflegern Sorge, denn schon damals wurden viele Verkehrsbauwerke wie Brücken, aber auch Tore, von vielen Verkehrsteilnehmern als zu schmal, zu niedrig oder zu wenig tragfähig angesehen,

so dass ein gewisser Veränderungsdruck entstand.<sup>3</sup> Diesem Druck wichen bald auch Brücken, die nicht lange zuvor noch als »Symbole des Fortschritts« gefeiert worden waren.<sup>4</sup>

Generell besteht die Schwierigkeit beim Erhalt historischer Brücken darin, dass es auf der einen Seite einen hohen Denkmalwert gibt. Dieser wird erstens durch die meist gute Wahrnehmung der Bauwerke im öffentlichen Raum und die dadurch oft (und beabsichtigte) prägende Wirkung auf die Kulturlandschaft bestimmt.<sup>5</sup> Zweitens ist die operationale Erhaltung der Bauwerke wichtig, die in der Regel weiter als Brücken benutzt werden.<sup>6</sup> Auf der anderen Seite ergeben sich gerade aus deren Nutzung Probleme, denn die Anforderungen wachsen und die Brücken lassen sich oft nur schwer denkmalgerecht daran anpassen. Daher wurden in den letzten Jahren beim Landesamt für Denkmalpflege (LAD) – ähnlich wie bei anderen Landesämtern – einige Projekte initiiert, mit denen die fachlichen Grundlagen des Erhalts denkmalgeschützter Brücken verbessert werden sollen. Die ersten Projekte waren verkehrsträgerübergreifend und zielten zunächst auf den Datenaustausch mit der Straßenbauverwaltung und der Deutschen Bahn AG (2011).<sup>7</sup> Leider ist die Datenlage bis heute nicht völlig befriedigend.

Ein weiteres Projekt zielte 2013 auf die Evaluation der vom LDA/LAD betreuten Maßnahmen.<sup>8</sup> Seine Ergebnisse beziehen sich allerdings hauptsächlich auf Straßenbrücken.<sup>9</sup>

Ausschließlich mit der Eisenbahn und ihren Brücken befasste sich in jüngerer Zeit unter anderem die Herbstsitzung 2014 der AG Industriedenkmalpflege in Chemnitz.<sup>10</sup> Sie führte dabei eine Reihe von Sitzungen und Veranstaltungen fort, in der sich entweder die AG Industriedenkmalpflege oder ICOMOS mit der Eisenbahn und ihren Brücken befasst hatten.<sup>11</sup> In Baden-Württemberg ist der Bezugs-punkt vor allem das Arbeitsheft zu den Eisernen Eisenbahnbrücken von Boeyng von 1995.<sup>12</sup> Doch auch aus anderen Bundesländern gab es davor und seither eine Reihe von Publikationen, die zumindest auch Eisenbahnbrücken behandelten.<sup>13</sup> Besonders hervorzuheben sind hierbei die großen Brücken in Münosten, Waldshut und Chemnitz, deren Erhalt bedroht war, sowie die Donaubrücke in Linz, die letztlich abgerissen wurde.<sup>14</sup>

## Zum Denkmalwert von Eisenbahnbrücken

Die Einführung der Eisenbahn und der weitere Ausbau des Eisenbahnsystems machte den Bau zahlreicher Brücken notwendig. Dabei handelte es sich einerseits um Brücken, auf denen Eisenbahnstrecken verliefen, und andererseits um Brücken, die der Querung der Eisenbahnareale dienten, die stellenweise durch zunehmende Breite oder stärkeren Verkehr nicht mehr gefahrlos auf Schienen-ebene überquert werden konnten.

Eisenbahnbrücken sind immer Teil von Bahnstrecken. Die höhere Bauaufgabe war also zunächst die Festlegung der Trasse der Bahn. Bei der Konzeption der

Brücke mussten somit schon einige Randbedingungen berücksichtigt werden. Die Trassierung von Bahnstrecken war (und ist) insbesondere in Gebirgsregionen eine Herausforderung, die seitens der Denkmalpflege auch dadurch gewürdigt wurde, dass einige Strecken als UNESCO-Welterbestätten eingetragen (u. a. Semmeringbahn, Bergbahnen in Indien) sind.<sup>15</sup> In Baden-Württemberg wurden ebenfalls einige Strecken als Kulturdenkmal erkannt, von denen manche wichtige Stationen in der Geschichte der Überwindung von Gebirgen durch Bahnen markieren.<sup>16</sup> Kennzeichnend für all diese Strecken sind eine große Häufung von Ingenieurbauwerken (Dämme, Stützmauern und Brücken, teils Tunnels), die besonders in den Scheitelbereichen auftreten. Diese sind Folge der – im Vergleich zu Straßenbrücken – schwierigeren Trassierungsparameter: Ein Schienenweg kann weder so steil noch mit so engen Kurven trassiert werden wie eine Straße.

Neben ihrer Anzahl stellten die Eisenbahnbrücken aber auch hinsichtlich ihrer Belastung eine schwere Aufgabe dar. Vor allem die Lokomotiven waren schwerer als die Fuhrwerke und die Geschwindigkeit der Züge mit eventuell auftretenden Bremsbelastungen stellten neuartige Anforderungen an die Bauwerke.

In den Anfängen wurden diese Zwänge mit den traditionellen Methoden des Naturstein-, Ziegel- oder Holzbau gelöst, doch ab den 1840er-Jahren avancierte Eisen bzw. Stahl zum typischen Baustoff gerade für größere Brücken.<sup>17</sup> Die immer weitere Ausweitung der Verkehrsleistung der Eisenbahn machte den Ausbau (zwei-, teilweise auch viergleisig) vieler Bahnstrecken und zum Teil schon im 19. Jahrhundert auch den Umbau vieler Brücken notwendig. Dabei kamen oft Stahl, etwa ab den 1880er-Jahren, jedoch auch Beton zum Einsatz. Gerade die Bauweise »Walzträger in Beton« (WiB) entwickelte sich zur Standardbauweise für kleine Brücken und löste vielfach frühere, meist in Naturstein ausgeführte Gewölbebrücken ab.

Bei der Erfassung von Eisenbahnbrücken als Kulturdenkmale, aber auch im Hinblick auf heutige Bauvorhaben, spielen die geschilderten Aspekte der Bedeutung der Bahnstrecken und des Umbaus eine wichtige Rolle: So verläuft die ohne Zweifel wichtige und denkmalwerte badische Schwarzwaldbahn auf über 100 Brücken, von denen fast die Hälfte der Bauweise »Walzträger in Beton« zuzurechnen ist. Einige dieser Brücken erhielten diesen neuen Überbau auf die Weise, dass die älteren Widerlager noch erhalten sind und so – neben dem Beleg der Trassierung – den Alterswert der Strecke transportieren (Bild 1). Im Übrigen ist ihr Denkmalwert gering und lässt im Umgang einen größeren Handlungsspielraum zu.

Anders verhält es sich bei Brücken, die als Einzelbauwerk Kulturdenkmal sind oder wesentlich zum Denkmalwert einer geschützten Bahnstrecke beitragen. Hier ist ein genauerer Blick auf die Denkmalwerte sinnvoll. Diese liegen (nach baden-württembergischem Denkmalschutzgesetz) meist im Bereich der wissenschaftlichen Gründe, die teils von künstlerischen und oft von heimatgeschichtlichen Gründen unterstützt werden. Widerlager und anschließende Stützmauern sind

oft älter als die Überbauten, meist sogar bauzeitlich und in Naturstein ausgeführt. Besonderheiten sind hier selten. Der in (bau-)technikhistorischer Sicht wichtigste Wert steckt sicher stets im Überbau. Hier existiert eine Vielzahl von Typen, für die es bei der DBAG eine gewisse Systematik gibt, die sich bei näherer Betrachtung dann noch weiter aufgliedern lässt. Besonders die eisernen Eisenbahnbrücken verteilen sich auf sehr viele unterschiedliche Typen, die bereits 1995 von Ulrich Boeyng beschrieben und erfasst wurden.<sup>18</sup> Für Massivbrücken fehlt eine solche Übersicht leider noch.<sup>19</sup> Allerdings kann nicht all diesen Brücken gleichermaßen ein technikhistorischer Wert zugesprochen werden. Die Bauwerke der Anfangsphase eines neuen Bautyps sind sicher wichtiger als Exemplare aus der mittleren Verbreitungszeit, typische Konstruktionen anders einzuschätzen als Sonderfälle und Kuriositäten. Superlative (älteste, höchste, weiteste usw.) können ein Grund für eine hohe Bewertung sein, sind aber keinesfalls Bedingung für einen Denkmalwert.<sup>20</sup> Insgesamt bemisst sich der Denkmalwert ohnehin nur aus dem Zusammenspiel zunächst der Gründe und dann der Einschätzung der Denkmalwürdigkeit auf Grundlage des Überlieferungszustandes.<sup>21</sup>

Einen weiteren Wert können Brücken auch als Produkte und somit Zeugnisse der Unternehmensgeschichte haben.<sup>22</sup>

Künstlerische Gründe kommen bei Eisenbahnbrücken insofern zur Geltung, als manche Bauteile über die reine Funktion hinaus gestaltet sind oder das funktionale Design von besonderer Qualität ist. Beispiele sind die Gliederung der Außenmauern von Massivbrücken durch Gesimse, Pilaster u. ä., die Ausführung von Widerlagern und Stützmauern in bossiertem Quadermauerwerk oder die Gestaltung der »Tore« bei der Einfahrt in Fachwerküberbauten (Bilder 2 und 3).



Bild 1 WiB-Brücke der Schwarzwaldbahn über die Gartenstraße in Hausach

Auch angebaute Teile können künstlerische Qualität haben, sind aber, anders als bei älteren Straßenbrücken (Figurenschmuck!), relativ selten.<sup>23</sup>

Bemerkenswert ist schließlich der Überlieferungszustand der Eisenbahnbrücken. In der Regel handelt es sich um Bauwerke, die noch ihrem ursprünglichen Zweck dienen, was Münzenmayer (1990) als »operationalen Erhalt« bezeichnete.<sup>24</sup> In einigen Fällen sind aus den Eisenbahn- auch Straßen- oder Geh- und Radwegbrücken geworden, im Extremfall auch durch Translozierung. Hier kann vom »funktionalen Erhalt« gesprochen werden. Sehr selten – und damit viel seltener als etwa bei Fabriken – ist nur noch ein »formaler Erhalt« gegeben und die Brücke hat ihre ursprüngliche Funktion verloren. In Ausnahmefällen kann auch dabei eine Denkmaleigenschaft vorliegen, wenn der Seltenheitswert verbunden mit dem Belegwert für wissenschaftliche Gründe hoch genug ist. Beispiele hierfür sind bzw. waren: die Neumagenbrücke in Staufen/Br. (ursprünglich Bahnbrücke von 1845, 1870 als Straßenbrücke nach Staufen, eine der ältesten erhaltenen Bahnbrücken überhaupt), die Erlengrabenbrücke in Ettlingen und die seit kurzem bei Ravensburg neben der Straße liegende Straßenbrücke, einer der ältesten erhaltenen Vollwandträger (ursprünglich als Bahnbrücke 1847 gebaut, 1880 als Straßenbrücke umgenutzt).<sup>25</sup>

Insbesondere bei den translozierten und fragmentierten Brücken, von denen nur noch Teile des Überbaus erhalten sind, ist aber keine Denkmaleigenschaft im Sinne des DSchG mehr gegeben und sie sind als sonstige Erinnerungsmonumente (also »Denkmale« im allgemeinen Sinn) nicht Gegenstand der staatlichen Denkmalpflege.



**Bild 2** Gestaltete Steinbrücke über die Jagst in Crailsheim

## Generelles zur denkmalgerechten Sanierung von Eisenbahnbrücken

Die Ausführungen zur Sanierung von Eisenbahnbrücken beziehen sich auf den Großteil der Kulturdenkmale (Denkmale im Sinne des DSchG), also die aktiv dem Schienenverkehr dienenden Bauwerke. Diese haben einige Besonderheiten, die sich stark auf die Sanierungsfähigkeit auswirken. Zuerst ist hier der Betrieb selbst zu nennen. Durch diesen ist schon die Untersuchung der Bauwerke schwierig und lässt sich meist nicht ohne Sicherheitsbeauftragten der Bahn realisieren. Eine Sanierung im Betrieb ist zwar technisch kein Problem und auch organisatorisch zu lösen, etwa mit Ersatzbrücken, in der Praxis brechen die damit verbundenen Kosten und Einschränkungen (Schienenersatzverkehr u. ä.) aber vielen denkmalgerechten Sanierungen »das Genick«. Die eingeübte Vorgehensweise der Bahn, neben dem Bestands- ein Ersatzbauwerk zu errichten und dieses in einer relativ kurzen Sperrpause an die Stelle des alten zu schieben, ist eben weit weniger aufwändig als eine Sanierung des Bestandes. Gerade bei Gewölbebrücken ist das Schieben ja kaum eine Option und daher dauert vor allem hier die Sanierung länger. Doch auch bei balkenförmigen Überbauten ist eine Bestandssanierung schwieriger.

Generell kommt in diesem Zusammenhang eine rechtliche Besonderheit zur Geltung: Eisenbahnbrücken unterliegen in der Regel dem Allgemeinen Eisenbahngesetz (AEG), einem Bundesgesetz. Die Genehmigungsverfahren sind daher keine rein denkmalrechtlichen, sondern Plangenehmigungs- oder Planfeststellungsverfahren nach §18 AEG. Planfeststellungsbehörde ist jeweils das Eisenbahnbundesamt (EBA).<sup>26</sup> Die Denkmalpflege wird als Träger öffentlicher Belange (TÖB) gehört. Ihre Belange können also gegenüber anderen Belangen »weggewogen« werden, wenn das EBA zur Auffassung kommt, dass im konkreten Einzelfall andere Belange wichtiger wären als der Denkmalerhalt bzw. dieser nur mit unangemessenem Aufwand zu realisieren wäre.



**Bild 3**  
Fachwerkbrücke über den Argen bei Langenargen

Für die Brücken der Deutschen Bahn AG, die wiederum den Hauptteil des Bestandes denkmalgeschützter Eisenbahnbrücken ausmachen, kommt eine Besonderheit der Finanzierung erschwerend hinzu: Zwischen der DBAG und der Bundesrepublik Deutschland besteht eine Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV), über die generell Investitionen in Infrastrukturmaßnahmen aus dem Bundeshaushalt finanziert werden können. Bisher geht die Vereinbarung davon aus, dass es sich um Neubauten handelt. Instandhaltung und Sanierungen muss die DBAG aus ihren selbst erwirtschafteten Mitteln bezahlen, was sie durchaus tut, aber bei größeren Vorhaben überfordert. Da die DBAG zu 100 % Bundesbesitz ist, sind auch keine Zuschüsse aus der Landesdenkmalförderung möglich. Die Stiftungen halten sich in der Regel auch zurück. Ausnahmen wie die Talbrücke in Münosten oder das Chemnitztalviadukt konnten nur im Rahmen von Einzelfallentscheidungen finanziert werden. Eine beim Deutschen Nationalkomitee für Denkmalschutz (DNK) angesiedelte Arbeitsgruppe bemüht sich derzeit, für die nächste LuFV eine Anerkennung von Sanierungsmaßnahmen, die ähnlich einem Neubau zur »Aktivierung« der Strecke führen, als LuFV-Maßnahme zu erreichen.<sup>27</sup> Seitens der Denkmalpflege muss man sich allerdings bewusst sein, dass dies wohl nur für Maßnahmen erreichbar sein wird, die zu einer deutlichen Steigerung der Restnutzungsdauer einer Brücke führen. Für Maßnahmen, mit denen diese nur um ein paar Jahre verlängert werden kann, ist der Aufwand einfach zu hoch.

Eine generelle Schwierigkeit besteht darin, dass bei der DBAG – und ebenso den meisten anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) – kaum Erfahrung mit der Sanierung von Brücken bestehen, während der Ersatzneubau ein Standardverfahren ist.

Weitere Probleme ergeben sich im Einzelfall aus den Aufgabenstellungen, die seitens der EVU für die Brücken formuliert werden. Geht es beispielsweise um eine Elektrifizierung der Strecke, sind meist nur wenige Eisenbahnbrücken, dafür aber umso mehr eisenbahnquerende Brücken betroffen. Für die Fachwerkbrücken mit untenliegender Fahrbahn, deren Obergurte konstruktiv verbunden sind, ist damit meist ein Eingriff gegeben, der im ungünstigsten Fall auch zum Denkmalverlust führen kann.

Häufiger als die Höhe ist die Breite der Brücke ein Problem: Bei historischen Bahnen ragen die (heutigen) Lichtraumprofile ineinander, Rettungswege sind nicht vorgesehen. Bei Sanierungen müssen höhere Anforderungen an die Lichtraumprofile berücksichtigt werden. Der häufigste Grund, weshalb Brücken in die Diskussion kommen, ist aber die Tragfähigkeit. Zu dieser gleich genaueres im nächsten Abschnitt.

Im Hinblick auf den generellen Umgang mit den Problemen ist das Vorgehen bei Diskussionen zwischen Bahn/EVU und Denkmalpflege zu verbessern. Über den Ansatz des DBU-Projektes in Niedersachsen wird noch berichtet. Hier kann auf Ergebnisse von Gesprächen eingegangen werden, die in einer Arbeitsgruppe

zwischen der DB Netz regionale Netze und dem Landesamt für Denkmalpflege erarbeitet wurden, leider jedoch nicht zu einem beiderseits verabschiedeten Leitfaden geführt haben. Zum einen ging es um die Verbesserung der Kommunikation zwischen beiden Institutionen. Man tauschte Daten aus und die Denkmalbehörden werden jetzt wesentlich früher, also 2–3 Jahre vor der eigentlichen Maßnahme kontaktiert. Zum anderen ging es um eine »Checkliste«, welche Punkte zur Beurteilung der Sinnhaftigkeit einer Sanierungsmaßnahme abgearbeitet werden müssen. Dazu gehören folgende Aspekte:

Zentral ist die beidseitige Kenntnis des Bauwerksbuchs, in der sich die Hintergründe der pauschalen Bauwerksnote findet, aber auch die Notenentwicklung in den letzten Jahren ablesen lässt. Die Bauwerksnote – in der Öffentlichkeit in den letzten Jahren öfters mal thematisiert – ist sicher ein wichtiges Indiz und eine Note 4 ist gewiss ein Grund, sich zu überlegen, ob sich ein Einstieg in eine Sanierung überhaupt noch lohnt. Andererseits resultiert die globale 4 manchmal nur aus leicht behebbaren Schwächen, die z. T. auch nur den separaten Überbau für den Rettungsweg betreffen. Umgekehrt gibt es Fälle, in denen sich schon bald nach der Errichtung eines Bauwerks Probleme beispielsweise mit der Entwässerung abzeichneten, denen man durch Maßnahmen nicht abhelfen konnte. Hier stellt sich dann noch stärker die Frage der Erfolgsaussichten einer Sanierung.

Aussagekräftig und einfach zu ermitteln sind auch Nachrechnungen der Vergangenheit der Brücke. Natürlich müssen insbesondere lange zurückliegende Schätzungen des Restnutzungswertes nicht vorbehaltlos akzeptiert werden. Doch die hier zu Grunde gelegten Daten ergeben oft ein genaueres Bild des Bauwerks als der bloße Augenschein. Über die verschiedenen möglichen Stufen und Lastmodelle kann eine erneute Nachrechnung unter Umständen zu für das Denkmal günstigeren Ergebnissen führen.

Eine schwierige, allerdings schwer zu ermittelnde Größe ist dabei der Umfang der Benutzung der Brücke in der Vergangenheit. Vor allem für länger zurückliegende Zeiträume sind hier kaum zuverlässige Zahlen vorhanden und die Schätzungen gehen meist zuungunsten des Denkmals aus.

## **Tragfähigkeit von Brücken, ihre Baumaterialien, Breite und Höhe**

Die neuere Denkmalpflege ist meist bestrebt, das historische Tragwerk einer Brücke in seiner Funktion zu erhalten. Die heutigen Belastungen sind aber oft höher oder zumindest in Geschwindigkeit und allgemein in der Belastungsart andere, als es in der Bauzeit der Fall war. Daher wurden in der Vergangenheit vielerorts technische Hilfsmittel wie Lastverteilungsplatten, zusätzliche Spannglieder oder Balken herangezogen, um das historische Tragwerk zumindest teilweise zu erhalten. Heute werden in der Forschung im Kontext der Nachhaltigkeitsdiskussion und knapper Kassen – also durchaus nicht nur mit dem Blick auf

Denkmale – neue Methoden zum Bestandserhalt entwickelt.<sup>28</sup> Das im Hochbau schon sehr verbreitete »Bauen im Bestand« findet so langsam auch Eingang in den Ingenieurbau.<sup>29</sup>

In diesem Kernbereich der Diskussion ergeben sich zahlreiche Fragen: Welche neuen Methoden erscheinen als denkmalgerecht und sollten weiter untersucht werden? Wie weit dürfen Verstärkungsmaßnahmen gehen, um nicht den Denkmalwert zu zerstören?

Gemeinsam ist allen Fällen die Erfahrung, dass eine sorgfältige Vorbereitung das A und O für eine gelungene Maßnahme ist. Dazu gehört zu allererst das Bewusstsein, dass es für denkmalgeschützte Brücken vielleicht gewisse Leitlinien, sicher aber keine »Lösungen von der Stange« gibt.

Grundlage sollte stets eine Bauaufnahme sein, die für die Bauteile (Überbau, Widerlager/Pfeiler, Belagsaufbau) Material, Alter, Verformungen, Schäden erfasst. Ebenso ist eine Auseinandersetzung mit der Bestandsstatik und dem ursprünglichen Entwässerungskonzept unerlässlich.

Strittig ist, wie genau die Nutzungsgeschichte zu ermitteln ist. Zwar ist Konsens, dass die üblicherweise aus den Bauwerksbüchern herauslesbaren Daten zu kleineren Umbauten sowie grobe Daten zu Zeiträumen der Streusalznutzung wichtig sind, doch bei der Belastungsgeschichte scheiden sich die Geister. Während die eine Seite dafür plädiert, viel Arbeit in die Ermittlung der Belastungsart (Autos, Busse, verschiedene Arten von Zügen etc.) und -dauer zu stecken, kritisiert die andere, dass dadurch eine Präzision suggeriert wird, die letztlich gar nicht gegeben sei. Unbenommen davon ist festzuhalten, dass auf diesem Level der Diskussion wenigstens akzeptiert ist, dass die Lebensdauer einer Brücke nicht allein von ihrem Alter, sondern vielmehr von Lastwechseln, Pflege, Witterung usw. beeinflusst wird.

Weiterhin wurden in Diskussionen Beobachtungen eingebracht, die darauf schließen lassen, dass gerade die Entwässerungskonzepte selten gut durchdacht sind und beispielsweise die historisch bewährte Methode des Lehmschlages zur Abdichtung von Steinbogenbrücken kaum mehr in Erwägung gezogen wird. Allerdings muss zugestanden werden, dass die Einbringung eines Lehmschlages im Eisenbahnbetrieb eine lange Sperrpause bedingen würde.

Generell ist für eine denkmalgerechte Sanierung historischer Brücken die Auseinandersetzung mit historischen Bautechniken und, so vorhanden, den entsprechenden Normen notwendig. Ohne diese, d. h. beim ausschließlichen Anlegen von Neubaunormen und Arbeiten mit Baumethoden des aktuellen Stahl- und Massivbaus, kommen kaum gute Ergebnisse heraus. Im Kern heißt das, sich mit der Leistungsfähigkeit des historischen Tragwerks auseinanderzusetzen, das ja durchaus repariert werden kann. Genügt dies nicht, so sind inzwischen aus der Sanierung denkmalgeschützter Straßenbrücken einige Methoden bekannt, die unterstützend eingesetzt werden können wie etwa das Vernadeln, die Zementinjektion oder das Anbringen externer Spannglieder.<sup>30</sup> Gleich damit anzufangen

oder gar von Beginn an den Ersatz eines Natursteintragwerks durch eine Betontragwerkskonstruktion zu planen, die dann nur noch mit Naturstein verblendet wird, wäre kein denkmalgerechtes Vorgehen.

Zu den Methoden ist noch zu bemerken, dass die mancherorts gewählte feste Verbindung des Gewölbes zu den Außenmauern noch keinesfalls Konsens ist. Auch das Mittel der Zementinjektion will gut durchdacht sein, denn wenn der historische Mörtel nicht bekannt ist, kann unter Umständen der Schaden größer sein als der Nutzen.<sup>31</sup>

Ein Beispiel einer Massivbrückenmaßnahme aus jüngster Zeit ist die Sanierung des Laufenmühleviadukts der Wieslauftalbahn bei Welzheim (Bild 4).<sup>32</sup> An dieser großen Brücke mit einem Dreigelenkbogen waren bei einer vorangegangenen Maßnahme schon die Probleme der Entwässerung des Troges angegangen worden. Gegenstand der 2018 abgeschlossenen Maßnahme der letzten Jahre war die Sanierung der Bögen. Die Anforderung der Denkmalpflege waren dabei, die Spuren der Herstellung der Betonbrücke möglichst zu erhalten.<sup>33</sup> Das schloss u. a. ein handelsübliches, farbiges Oberflächenschutzsystem, wie es wenige Jahre zuvor noch am Strümpfelbachviadukt zum Einsatz gekommen war, aus. Ein transparenter Oberflächenschutz wurde jedoch – trotz gewisser Vorbehalte gegen Hydrophobierungen – akzeptiert.

Auch im Bereich des Stahlbaus hat sich in Versuchen der Materialprüfanstalt Stuttgart gezeigt hat, dass alte Stähle oft weit besser als ihr Ruf sind.<sup>34</sup> Wie Beispiele zeigen, sind Restaurierung und Materialwissenschaft generell wichtige Partner, wenn es um den Umgang mit historischen Brücken geht. Bei Brücken aus Eisenwerkstoffen ist je nach Material die Diskussion der Methode der Be/Entschichtung sowie Einbringung neuer Materialien von großer Bedeutung. Bei der gusseisernen Brücke über den Neumagen in Staufen/Breisgau galt 1995 noch das Sandstrahlen und Feuerverzinken als Mittel der Wahl.<sup>35</sup> Etwas mehr als zehn



**Bild 4**  
Laufenmühleviadukt an der Strecke Welzheim-Schondorf. Nach der Sanierung ist der Dreigelenkbogen etwas deutlicher hervorgehoben.

Jahre später wurde in Schramberg die ebenfalls gusseiserne Schiltachbrücke auf schonendere Weise ent- und wieder beschichtet.<sup>36</sup>

Neben der Lasterhöhung war und ist die Verbreiterung von Brücken häufig ein Grund für Denkmalverluste. Die Frage ist, mit welcher Methode man dem am denkmalgerechtenen begegnet. Zur Problematik gehören hier nicht nur die klassische Erhöhung der Breite, sondern auch die der Höhe zu verstehen, was beispielsweise bei Elektrifizierungen auftaucht und Brücken in zweierlei Weise treffen kann. Bei der Eisenbahnbrücke über die Argen bei Langenargen gab es Schwierigkeiten zwischen der geplanten Oberleitung der Südbahn Ulm-Lindau und dem Kasten des Fachwerkträgers. Dazu kamen andere Probleme wie die Breite der Durchfahrt und die Tragfähigkeit. Im Ergebnis wird die Brücke demnächst abgerissen. Angesichts der großen Bedeutung dieser Brücke wird aber versucht, die von Ulrich Boyeng jüngst erst herausgestellten Besonderheiten der Brücke<sup>37</sup> in ein didaktisches Modell einzubringen und so die Abbruchdokumentation wenigstens für die Forschung und Lehre nutzbar zu machen.

## Ausblick

Die Brücke in Langenargen wird sicher nicht die letzte denkmalgeschützte Eisenbahnbrücke sein, die abgebrochen wird. Eine Nutzung der Abbruchdokumentationen als Anschauungsmaterial ist zwar sinnvoll, mindert den Verlust aber kaum. Für andere Brücken wie die in Waldshut, Chemnitz oder Müngsten oder auch das jüngst erst von der Instandhaltung der DB in Angriff genommene Viadukt bei Dornstetten sehen die Erhaltungschancen für die nächsten Jahre besser aus (Bild 5). Im Sinne eines möglichst nachhaltigen Umgangs mit dem Baubestand werden sich Wissenschaft, Verwaltung und Öffentlichkeit sicher bemühen, die Methoden weiter zu verbessern, so dass der Anteil der Brücken, die nicht gehalten werden können, vielleicht geringer wird.



**Bild 5**

Für das Viadukt der Gäubahn bei Dornstetten sieht die Zukunft nicht so düster aus wie auf diesem Bild. Die Bahn nimmt hier Instandhaltungsmaßnahmen vor.

## Anmerkungen

- 1 Brücke, Mühle und Fabrik 1991; Denkmale der Industrie 2016
- 2 Stier 1995
- 3 Vgl. Supper 1958/59
- 4 Vgl. Gympel 2004, der sogar von »Schriftmachern« spricht.
- 5 Zur Wirkung vgl. Münzenmayer 2011; als Beispiel das Viadukt Dornstetten (Bild 5).
- 6 Bezieht sich auf von Münzenmayer (1990) eingeführtes System der Beschreibung des Überlieferungsstandes von technischen Kulturdenkmalen entlang ihrer Funktion als »operational« (in täglichem Gebrauch), »funktional« (nur hin und wieder im Gebrauch) und »formal« (nicht mehr funktionsfähig).
- 7 Vgl. Friedrichsohn/Hascher 2011. Katrin Friedrichsohn übernahm damals Koordination und Erfassung und verfasste einen (internen) Bericht.
- 8 Schneider/Baxmann 2012
- 9 Zur Sanierung vgl. zuletzt Lutz 2017
- 10 Hascher 2014
- 11 Zuletzt Eisenbahn und Denkmalpflege 1998
- 12 Boeyng 1995
- 13 Vgl. stellvertretend Rödel/Schomann 2005; Höhmann 2010; Raach/Baxmann 2014
- 14 Streit/Stadler 2017
- 15 Zur Semmeringbahn jetzt Dinhobl 2018, zu einer der indischen Bergbahnen Krishnan 2018
- 16 Zur Geislunger Steige Bauer 2000, zur badischen Schwarzwaldbahn Cremer 2014; zur Sausschwänzlebahn Holzer 2016
- 17 Zu den ersten eisernen Eisenbahnbrücken in Baden-Württemberg vgl. Boeyng 1989; 1990; 1995; zu den statischen Hintergründen Kurrer 2016, zum Stahlbau allgemein Prokop 2012
- 18 Boeyng 1995
- 19 Vgl. aber die Ansätze bei Veihelmann/Holzer 2013, Veihelmann 2016
- 20 Genauere Überlegungen zu den Kriterien bei Boeyng 1995. Es ist nicht vollständig nachvollziehbar, inwieweit diese in der Inventarisierung der folgenden Jahrzehnte zur Anwendung kamen. Die generellen Kriterien der Denkmalfähigkeit folgen Föhl 2010 (zur Übernahme und Weiterentwicklung von dessen Positionen siehe auch Erhaltung von Kulturdenkmalen 2015).
- 21 Hier kommen dann die bekannten Werte Seltenheitswert, dokumentarischer und exemplarischer Wert zur Geltung. Vgl. Strobl/Sieche, Kommentar zu §2 DSchG, 3. Aufl. 2010, RN 24
- 22 Vgl. Trautz/Voormann 2012; Boyeng 2018
- 23 Eines dieser Beispiele behandeln Krontal/Burkardt 2018.
- 24 Münzenmayer 1990
- 25 Boeyng 1989, 1990, Blumer/Numberger 2008
- 26 Zu den rechtlichen Einzelheiten vgl. Hönes 2015
- 27 Vgl. www.dnk.de, Meldung vom 26.11.2018 (geprüft 6.12.2018)
- 28 Dabei ist neben den Hochschulen die Bundesanstalt für Straßenwesen ein wichtiger Akteur. Vgl. Schnellenbach-Held 2010; Massivbau FS Hegger 2014
- 29 Bergmeister 2015; Jäger 2018; vgl. auch die Instandhaltungskapitel in neueren Handbüchern: Geißler 2014; Mehlhorn/Curbach 2014; Mölter u. a., 2017
- 30 Beispiele der Vernadelung (aus dem Brückenprojekt 2013, zusammengestellt von Claudia Kraft): Gomaringen, Schloßbrücke 2004 (vgl. Ortsakten in Arbeitsstelle Tübingen); Zementinjektion: Baiersbronn-Mitteltal (LK Freudenstadt), Ilgenbachstraße, Brücke über die Murg 2009 (vgl. Ortsakten in Arbeitsstelle Karlsruhe);

- Externe Spannglieder: Neckarbrücke im Neckartal, Rottweil (im Gelände der Pulverfabrik)
- 31 Vgl. u. a. Egermann 2014, Bewer 2014
- 32 Hier kamen neueste Methoden der Voruntersuchung und Betonsanierung zum Einsatz, vgl. auch Patitz 2017
- 33 Vgl. Veihelmann, Gewölbte Brücken 2016; zum Dreigelenkbogen Veihelmann 2016
- 34 Blumer/Numberger 2008
- 35 Käpplein 1995, vgl. jetzt auch Schwartz 2014
- 36 Blumer/Kinder/Schad 2007
- 37 Boeyng 2016

## Literatur

- Bauer, Karlheinz: Die Geislanger Steige – ein schwäbisches Jahrhundertbauwerk (Veröffentlichung des Stadtarchivs; 16), Geislingen an der Steige 2000
- Bergmeister, Konrad: Beton-Kalender. Taschenbuch für Beton-, Stahlbeton und Spannbeton sowie die verwandten Fächer/Beton-Kalender 2015: Schwerpunkte: Bauen im Bestand, Brücken. Online-Ressource. Berlin 2015
- Bewer, Andreas u.a.: Interdisziplinäre Bestandserfassung und Bewertung einer denkmalgeschützten Bogenbrücke aus Natursteinen mit Instandsetzungs- und Erhaltungskonzept. In: Patitz/Grassegger/Wölbert: Natursteinsanierung 2014. Karlsruhe 2014, S. 35–56
- Blumer, Rolf-Dieter; Numberger, Markus: Von der Nutzungsgeschichte der Schussenbrücke bei Ravensburg-Oberzell: zweimal umgesetzt und »doch« Denkmal?. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg. 37, 2008, S. 199–203
- Blumer, Rolf-Dieter; Kinder, Joachim; Schad, Frank: Oberflächenreinigung gusseiserner Kulturdenkmale mit einem neuen Verfahren am Beispiel der Schiltachbrücke in Schramberg. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 36, 2007, 1, S. 48–54
- Boeyng, Ulrich: Eiserne Eisenbahnbrücken in Baden-Württemberg (Arbeitshefte Regierungspräsidium Stuttgart – Landesamt für Denkmalpflege), 1995
- Boeyng, Ulrich: Schatzfunde im Archivregal; frühe Fotografien aus der Bauzeit der Rheinbrücke bei Waldshut. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, 43, 2014, 3, S. 200–202
- Boeyng, Ulrich: Badische Heimat – badische Köpfe: die Benckiser-Familie. In: Badische Heimat 98 (2018), 3, S. 346–354
- Boeyng, Ulrich: Die Brücke über den Erlengraben bei Ettlingen. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 18, 1989, S. 148–153
- Boeyng, Ulrich: Die Eisenbahnbrücken von Unterreichenbach und Langenargen. Aus der Technikgeschichte des 19. Jahrhunderts In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 45 (2016) 2, S. 116–120
- Brücke, Mühle und Fabrik: technische Kulturdenkmale in Baden-Württemberg. Mit Beitr. Von Hubert Krins u.a. Stuttgart 1991
- Cremer, Folkhard: Wie die Eisenbahn den Schwarzwald veränderte: Die Bedeutung der Schwarzwaldbahn für Sozial-, Wirtschafts-, Technik-, Verkehrs- und Tourismusgeschichte. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 43, 2014, 3, S. 185–190
- Denkmale der Industrie und Technik in Deutschland. Hrsg.: Vereinigung der Landesdenkmalpfleger der Bundesrepublik Deutschland. Konzeption: Matthias Baxmann, Michael Hascher, Christine Onnen, Hubert Staroste . Wiesbaden, Berlin 2016
- Dinhobl, Günter: Die Semmeringbahn: Eine Baugeschichte der ersten Hochgebirgsseisenbahn der Welt. Wien 2018

- Eisenbahn und Denkmalpflege 3: Frankfurt am Main, 14. bis 16. April 1997, Drittes Internationales Eisenbahnsymposium des Deutschen Nationalkomitees von ICOMOS in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Industriedenkmalflege der Vereinigung der Landesdenkmalpfleger München 1998
- Erhaltung von Kulturdenkmälern der Industrie und Technik in Baden-Württemberg (Landesamt für Denkmalpflege, Arbeitsheft; 31). Mit Beitr. von Jörg Bofinger u. a. Stuttgart 2015
- Föhl, Axel: Denkmäler der Technikgeschichte. In: Martin, Dieter J.; Krautzberger, Michael (Hg.): Handbuch Denkmalschutz und Denkmalpflege. 3. Aufl. München 2010, S. 212–216; 372–375
- Friedrichsohn, Katrin: Bericht über das Projekt »Verbesserung der Datenlage von Ingenieurbauwerken«. Unveröffentlichtes Manuskript. LAD. Oktober 2011
- Friedrichsohn, Katrin; Hascher, Michael: Verbesserung der Datenlage von Ingenieurbauwerken. In: RP-Report. Mitarbeiterzeitschrift des Regierungspräsidiums Stuttgart 37, 2011, 4, S. 52f.
- Geißler, Karsten: Handbuch Brückenbau. Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung. Berlin 2014
- Gympel, Jan: Schrittmacher des Fortschritts – Opfer des Fortschritts? Bauten und Anlagen des Verkehrs, Schriftenreihe des Deutschen Nationalkomitees für Denkmalschutz, 60). 2. Aufl. Bonn 2004
- Lutz; Günther; Bernd Just; Tobias Fischer: Denkmalgerechter Umbau der König-Albert-Brücke über die Mandau im Zuge der Staatsstraße S 133 in Zittau. In: Technische Denkmale in Sachsen (Arbeitsheft / Landesamt für Denkmalpflege Sachsen; 27), Dresden 2017, S. 184–191
- Hascher, Michael: Denkmalverluste durch die Eisenbahn – Denkmalverluste bei der Eisenbahn. In: Die Denkmalpflege, 67, 2009, 2, 129–133
- Hascher, Michael: Eisenbahn und Denkmalpflege. In: Industriekultur 20 (2014) 4, S. 34–35
- Höhmann, Rolf: Weiterbauen und Denkmalwert – zwei technische Denkmale im Umbau. In: Weiterbauen am Denkmal – 77. Tag für Denkmalpflege und Tagung der Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland (Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, Arbeitsheft 14). Markkleeberg 2010, S. 190–194
- Hönes, Ernst-Rainer: Handbuch städtebaulicher Denkmalschutz. Bd. 2. Hamburg 2015
- Holzer, Stefan M.: Die Sauschwänzlebahn im Südschwarzwald (Historische Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland, 16). Berlin 2015
- Jäger, Wolfram: Brücken, Bauen im Bestand (Mauerwerk-Kalender 2018). Online-Resource, Berlin 2018
- Käpplein, Rudolf: Instandsetzung der Brücke über den Neumagen in Staufen. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke 1995, S. 289–301
- Krishnan, Govind: Nilgiri Mountain Railway (NMR), From Lifeline to Oblivion. Google Books 2018
- Kurrer, Karl-Eugen: Geschichte der Baustatik. Auf der Suche nach dem Gleichgewicht. Berlin 2016
- Krontal, Ludolf; Burkhardt, Rüdiger: Historische Eisenbahnbrücken – sind diese noch zu retten? In: Natursteinsanierung Stuttgart 2018, S. 89–102
- Massivbau im Wandel. Festschrift zum 60. Geburtstag von Josef Hegger. Berlin 2014
- Mehlhorn, Gerhard; Manfred Curbach (Hrsg.): Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten. 3. Aufl. Wiesbaden 2014
- Mölter, Tristan M.; Pfeifer, Rolf H.; Fiedler, Michael: Handbuch Eisenbahnbrücken. Planung, Bau, Instandhaltung, Brückensysteme. Hamburg 2017

- Münzenmayer, Hans Peter: Erfassung und Bewertung von Objekten der Technikgeschichte – Wege zu einer technikhistorischen Quellenkunde. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 19 (1990), 4, S. 156–161
- Münzenmayer, Hans Peter: Die Ingenieurbauten als Markenzeichen der Königlich Württembergischen Staatseisenbahnen, In: Die Welt bewegt sich – Quellen und Beiträge zur frühen regionalen Eisenbahngeschichte. Stuttgart, 2011, S. 101–113
- Patitz, Gabriele u. a.: Betoninstandsetzung: Instandsetzung des Laufenmühle-Viadukts (Bausubstanz Thema). Stuttgart 2017
- Prokop, Ines: Vom Eisenbau zum Stahlbau: Tragwerke und ihre Protagonisten in Berlin 1850–1925. Berlin 2012
- Raach, Jörg; Baxmann, Matthias: Faszination Eisenbahn: Bahnkultur in Brandenburg. Berlin 2014
- Rödel, Volker; Schomann, Heinz: Eisenbahn in Hessen (Denkmaltopographie; Kulturdenkmäler in Hessen). 3 Bde. Stuttgart 2005
- Schneider, Marie: Faszination Brücken. Denkmalwert und Erhaltung erstaunlicher Ingenieurskunst. In: RP Magazin. Hauszeitung des Regierungspräsidiums Freiburg 2012, 2, S. 8–9
- Schneider, Marie; Baxmann, Matthias: Faszination Brücken. In: Industriekultur 2012, 3, S. 28–29
- Schnellenbach-Held, Martina u. a.: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand. Bremerhaven 2010
- Supper, Walter: Denkmalpflege und Verkehr. In: Nachrichtenblatt der Denkmalpflege in Baden-Württemberg 1 (1958), 4, S. 99–102; 2 (1959), 1, S. 22–24
- Schwartz, Gerd: Die Gusseisenbrücke über den Neumagen. Staufen 2014
- Stier, Bernhard: Auf der Wasserstraße in die Moderne. Der Bau des Neckarkanals im Spannungsfeld von Technik, Ästhetik und Politik 1920–1935. In: Zeitschrift für Geschichte des Oberrheins 143, 1995, S. 287–351
- Streitt, Ute; Stadler, Gerhard A. u. a.: Die Linzer Eisenbahnbrücke 1900 bis 2016 – eine Chronik in Bildern und Texten. Weitra 2017
- Trautz, Martin; Voermann, Friedmar: Der Bau eiserner Brücken im Südwesten Deutschlands 1844 bis 1889. In: Stahlbau 81, 2012, 1, S. 57–62; 2, S. 133–141; 3, S. 233–242.
- Veihelmann, Karen; Holzer, Stefan M.: Deutschlands älteste Betonbrücken. In: Bau-technik 90, 2013, 6, S. 376–379
- Veihelmann, Karen: Gewölbte Brücken des 19. Jahrhunderts; Vom Mauerwerk zum Stampfbeton. Diss. Univ. der Bundeswehr München 2016
- Veihelmann, Karen; Holzer, Stefan M.: Die Verwendung von Gelenken im Massivbrückenbau; zur Geschichte des Dreigelenkbogens. In: Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 2, S. 99–112
- Wollenweber, Burkhard: Historische Brückenkonstruktionen – technische Bauwerke der Eisenbahn in Niedersachsen: ein Beitrag zur Geschichte des Brückenbaus im 19. Jahrhundert (Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen; 33), Hameln 2006

## Bildquellen

- Bild 1: Rolf Höhmann  
 Bilder 2, 4, 5, 6: Michael Hascher  
 Bild 3: Andrea Steudle



Stefan M. Holzer

## **UNBEWEHRTE STAMPFBETON-BOGENBRÜCKEN**

### **Geschichte, Konstruktion und Tragverhalten**

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts entsteht aus der jahrhundertelangen Tradition des Bauens mit mörtelreichem Bruchsteinmauerwerk die gänzlich neue Technologie des Einbringens einer fertigen Mischung aus Kies und hydraulischem Mörtel in eine Schalung – der moderne »Betonbau«. Die Masse wird in feuchtem, schüttfähigem Zustand eingebaut und dann durch Stampfen verdichtet (»Stampfbeton«). Von einer Eisenbewehrung ist zunächst nicht die Rede, diese setzt sich erst um 1900 durch. Dennoch eröffnet das neue Material neue Möglichkeiten, vor allem im Bau von Gewölben und Bogenbrücken. Deren Konstruktion bezieht viele Inspirationen aus dem zeitgenössischen Natursteinbau, und auch das Tragverhalten der neuartigen »Stampfbeton-Bogenbrücken« ist weitgehend mit jenem klassischer Natursteinbrücken vergleichbar.

### **1 Vom mörtelreichen Bruchsteinmauerwerk zum Stampfbeton**

Seit der römischen Antike bis weit in das 19. Jahrhundert hinein lässt sich eine ungebrochene Tradition des Bauens mit »mörtelreichem Bruchsteinmauerwerk« verfolgen: Gemeint ist eine Technik, bei der unbearbeitete, nuss- bis kopfgroße Natursteinbrocken in horizontalen Schichten abwechselnd mit satten Lagen von Mörtel in eine wie auch immer geartete »Form« eingebracht werden [1, 2]. Diese Technik wurde von den Römern im Laufe des 2. Jh. v. Chr. zur Perfektion entwickelt und dann vor allem in der Kaiserzeit für ein nahezu unbegrenztes

Spektrum an Bauaufgaben eingesetzt. Dabei stand die Verwendung des neuen Materials (»opus caementicium«) als Füllmaterial für das Innere mehrschaliger Wände im Vordergrund. Bei diesem Verwendungszweck wurde keine temporäre Schalung erstellt, sondern die Schüttung des Wandkerns schritt synchron zum Aufmauern der äußeren Wandschichten in Bauabschnitten von wenigen Dezimetern Höhe fort. Die Aussenschalen der Mauern, die als »verlorene Schalung« dienten, wurden zunächst entweder aus kleinsteinigem, jedoch mehr oder weniger sorgfältig zugerichtetem Natursteinmaterial (»opus incertum«, »opus reticulatum«) oder als sorgfältiges Werksteinmauerwerk hergestellt; später (d. h. in der römischen Kaiserzeit bis weit in die Spätantike) vorwiegend in Backstein (»opus testaceum«). Nur bei Fundamenten unter Wasser, bei Substruktionen und bei Gewölben wurden in der Antike die Bruchstein- und Mörtelschichten direkt in eine temporäre Schalung eingebbracht.

Die Verwendung des neuen Materials für Gewölbe ermöglichte schon in der frühen Kaiserzeit eine beeindruckende Vielfalt an Gewölbestrukturen im Hochbau wie z. B. heute noch an der Aula Ottagona der Domus Aurea des Nero in Rom ablesbar (Bild 1). Die Formenvielfalt war bald nur noch durch die Grenzen des Schalungstragwerks begrenzt. Auch bei Gewölben behielten die Römer das Einbringen der Stein- und Mörtelschichten in abwechselnden, horizontalen Lagen bei. Die Vielfalt der realisierbaren Gewölbeformen wurde durch sehr massive Gewölbeschalen und Widerlager ermöglicht oder erkauft. Von »Schalen« im eigentlichen Sinne kann keine Rede sein.

Die Herstellung der extrem dickwandigen Bauteile wurde allein durch die allgemeine Verfügbarkeit der Puzzolane in Italien ermöglicht. Diese bröckeligen, feinkörnigen vulkanischen Tuffe kamen anstelle normalen Sandes in den Mörteln zur Anwendung. Sie verliehen einem reinen Kalkmörtel hydraulische Eigenschaften, d. h. die Fähigkeit zur Erhärtung ohne Zutritt von atmosphärischem CO<sub>2</sub>. Außerdem erreichten die unter Beimengung von Puzzolanen hergestellten hy-



**Bild 1**  
Das Klostergewölbe  
der Aula Ottagona der  
Domus Aurea des Nero in  
Rom – frühes Meisterwerk  
der altrömischen Opus-  
Caementicum-Bauweise.  
Deutlich sind die Schal-  
brettabdrücke zu erkennen.  
(Foto: Holzer 2015)

raulischen Mörtel Festigkeiten, die zwischen jener eines reinen Kalkmörtels und denen eines modernen Zementmörtels lagen. Auch ausserhalb des italienischen Mutterlandes verwendeten die Römer in der Kaiserzeit ihre etablierte Technik. Dabei sind auch alternativ zu Puzzolanen hydraulische Zusätze entdeckt und verwendet worden. Für Brücken wurde die Opus-caementicium-Bautechnik in altrömischer Zeit bevorzugt im Inneren von Werksteinkonstruktionen oder zur Ausfüllung der Bogenwickel verwendet, und die tragenden Gewölbe der Brücken bestehen nie ausschließlich aus dem geschütteten Material. Ein eindrucksvolles Beispiel einer inwendig mit Opus Caementicium gefüllten Werkstein-Bogenbrücke ist der Ponte di Augusto in Narni (Bild 2).

Für die altrömische Baukunst waren das schichtweise Einbringen der nicht vorher miteinander vermengten Komponenten »Bruchstein« und »Mörtel«, die ausschließlich horizontale Schichtung, das Verwenden der Außenschalen der Wand als »Form« sowie – ganz primär – die Verfügbarkeit des hydraulischen Mörtels essentielle Voraussetzungen. Im Mittelalter wurde die römische Technik vielerorts rezipiert und imitiert, jedoch erzwang das Fehlen des leistungsfähigen hydraulischen Mörtels eine Reduktion der altrömischen Technik auf das bloße Ausfüllen mehrschaliger Wandkonstruktionen mit mehr oder weniger »lose« gefügten



**Bild 2**

Narni, Ponte di Augusto:  
Typisch für den römischen  
Brückenbau ist die  
Verwendung des Opus  
Caementicium nicht für die  
primäre Tragstruktur,  
sondern nur als »Füllmaterial«  
hinter einer Außenschale  
aus Werkstein.  
(Foto: Holzer 2016)

Bruchsteinen (alle Varianten vom Verguss mit Kalkmörtel über Sparversionen mit gemagerten Mörteln und Vermauern hammerrechter Bruchsteine mit wenig Mörtel lassen sich antreffen). Die Wiedergeburt der Wölbkunst im 11. Jahrhundert setzte aufgrund dieser materialtechnischen Einschränkungen nicht auf eine Kopie der altrömischen Technik, sondern war durch eine Verwendung von mehr oder weniger regelmäßigen Steinen mit radial zum Intrados orientierten Lagerfugen gekennzeichnet. Im Laufe des 13. Jahrhunderts wurden die zunächst dennoch recht massigen Gewölbe dann durch dünnchalige Konstruktionen aus handlichen Formaten (Backstein, zugerichtete Handsteine aus Natursteinmaterial) abgelöst, eine Bauweise, die konstruktiv mit der römischen Gewölbekonstruktion keinerlei Gemeinsamkeiten aufweist, in der Spätgotik zur Perfektion gebracht wurde und bis ins ausgehende 19. Jahrhundert bestimmt blieb.

Von einem eigentlichen »Beton« im modernen Sinne kann also vor dem 19. Jahrhundert nicht die Rede sein. Ein ungeregelter Einbringen einer Fertigmischung in eine Schalung war nicht üblich und die Herstellung eines Mörtels mit kontrolliert hydraulischen Eigenschaften war weitgehend unbekannt. Die Analyse von unter Wasser ohne Wasserhaltung eingebrachten altrömischen Konstruktionen (vor allem im Hafenbau) brachte jedoch ab dem 17. Jahrhundert die systematische Beschäftigung mit hydraulischem Mörtel wieder in Gang. Dieses Interesse gipfelte im ausgehenden 18. Jahrhundert in den Arbeiten John Smeatons, dicht gefolgt in den 1810er und 1820er Jahren von Joseph Vicat. Dabei wurde es deutlich, dass die Hydraulizität eines Kalkmörtels eng mit einem bestimmten Prozentsatz an Tonmineralien im Ausgangsmaterial verbunden war. Der Aufstieg der Betonbauweise vollzog sich trotz der Arbeiten Smeatons zunächst primär in Frankreich. Die wissenschaftlichen Untersuchungen Vicats auf der einen Seite und die zentral gesteuerte, systematische Suche nach geeigneten Vorkommen mergeligen Kalks hatten dafür die Voraussetzungen geschaffen.

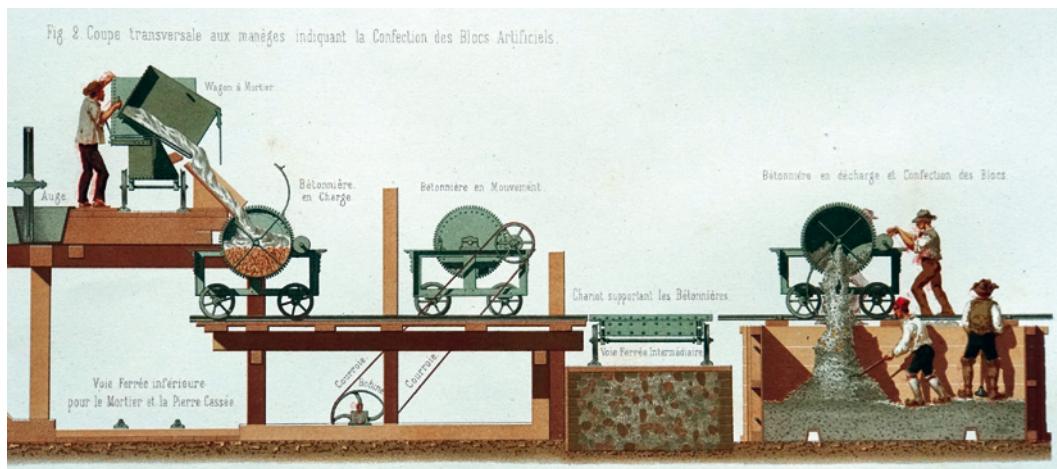
Um 1830 lag das Wissen vor, welche natürlich vorkommenden mergeligen Kalksteine direkt zu einem hydraulischen Kalk gebrannt werden konnten und



**Bild 3**  
Wellenbrecher des Hafens von Marseille aus Betonblöcken (1855–61; zeitgenössisches Modell, heute im Conservatoire des Arts et Métiers, Paris).  
(Foto: Holzer 2014)

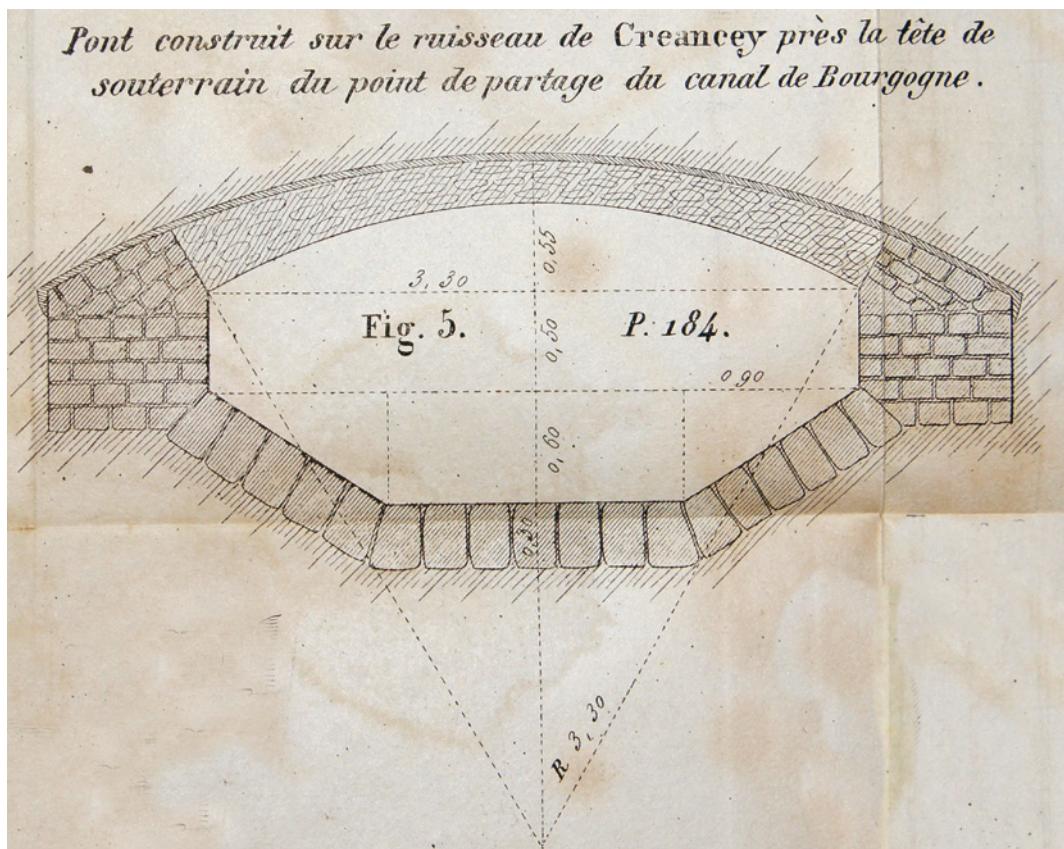
wo diese in Frankreich vorhanden waren. Um die Mitte des 19. Jahrhunderts war auch die Produktion künstlicher hydraulischer Bindemittel aus den Ausgangskomponenten Kalk und Ton in kontrollierten Bruchteilen kein Problem mehr. Gleichzeitig setzten wieder erste systematische Anwendungen von »mörtelreichem Bruchsteinmauerwerk mit hydraulischem Bindemittel« zunächst im Wasserbau ein [2, 3, 4, 5]. Eckpunkte sind die Fundamente und sogar die ganzen Tröge von Schifffahrtsschleusen (entwickelt ca. 1810–1855 [5]), die Produktion von riesigen künstlichen Steinblöcken für den Bau von Wellenbrechern (ca. 1834–67 [3]) und schließlich der Brückenbau (zunächst nur Fundamente von klassischen Natursteinbrücken [6]). Bei den Unterwasser-Anwendungen setzte sich nach zaghaften Anfängen, die eng am römischen Vorbild des lagenweisen Einbringens von Mörtel und Gesteinsbocken festhielten, bald das Betonieren mit einer fertigen Mischung durch. Dasselbe gilt für die Herstellung der großen Blöcke für Wellenbrecher. Am Land betoniert und dann in regelloser Schüttung im Meer versenkt, boten diese Betonsteine endlich die Möglichkeit, auch in extremen Situationen dauerhaft stabile Wellenbrecher zu bauen. Frankreich hatte erste Erfahrungen mit dieser Technik ab 1833 bei der Mole von Algier gesammelt. Nach zaghaften »handwerklichen« Anfängen der dortigen Betonherstellung kam insbesondere unter Jean-Baptiste Krantz ab 1843 eine voll durchorganisierte industrielle »Fertigteil«-Produktion in Gang. Nach deren Vorbild wurde dann in den Jahren ab 1856 in Marseille eine Feldfabrik für die Herstellung der Blöcke für die Wellenbrecher des neuen Außenhafens (Bild 3) eingerichtet. Die durchwegs durch Dampfkraft betriebenen Transport- und Mischeinrichtungen, die in einer prachtvollen Publikation von Latour und Gassend 1861 einer breiteren Öffentlichkeit bekanntgemacht wurden, gemahnen schon an eine moderne Betonfabrik (Bild 4).

Die ersten Bogenbrücken aus unbearbeiteten Bruchsteinen und mit natürlichem hochhydraulischen Kalk als Bindemittel hatte Alexandre Lacordaire schon 1829 am Burgundischen Kanal erbaut. Während er bei einer nur 3,30 m spannenden



**Bild 4** Maschinelles Mischen des Betons und Betonieren der Blöcke in Marseille (Latour und Gassend 1861, Tafel 29, Detail)

Überdeckelung eines Baches bei Créancey (Bild 5) am Südende des Tunnels von Pouilly-en-Auxois schon »Beton« im modernen Sinne (fertig gemischt und regellos) einbaute, wurden an dem immerhin 10 m spannenden Bogen der Brücke über den Armançon bei Éguilly die plattigen Bruchsteine noch radial in das Mörtelbett gedrückt (Bild 6), so dass aus heutiger Sicht eher von »Bruchsteinbauweise« als von »Beton« zureden sei. Dennoch war mit den beiden Brücken Lacordaires der Startschnell für die fulminante Entwicklung des Bogenbrückenbaus mit Stampfbeton gefallen. Die Nähe zum Bruchsteinbau blieb dem Betonbrückenbau aber noch lange: Auch die erste »Beton«-Brücke Deutschlands, die 1877 von Bernhard Liebold errichtete Versuchsbrücke über die Lenne bei Vorwohle, präsentierte sich wie eine direkte Kopie der ein halbes Jahrhundert älteren Brücke von Éguilly mit radial gesetzten plattigen Steinen im Bogen. Für die bekannten frühen Experimente zum Betonbau von François-Martin Lebrun in Montauban in den 1830er und 1840er Jahren boten Lacordaires Bauten die direkte Anregung. Lebrun allerdings bevorzugte von Anfang an den echten Kiesbeton im modernen Sinne. Das Mischen des Betons wurde sowohl von Lacordaire als auch von Lebrun und auch später noch (1855) von Johann Mihálik in Österreich mit relativ einfachen, manuellen Vorrichtungen bewerkstelligt, d. h. durch Umrütteln der Masse mit Rechen und Schaufeln auf einer hölzernen Plattform.



**Bild 5** Die erste echte Betonbrücken erbaute Alexandre Lacordaire 1829 am Burgundischen Kanal.  
(Journal des connaissances usuelles et pratiques, 1832)

Das Experiment Lacordaires mit den hochhydraulischen Kalken der Umgebung von Pouilly-en-Auxois blieb Episode, weil Lacordaire nach der Julirevolution von 1830 das Gebiet verließ und sich außerdem mehr der Politik widmete. Der erste große wirtschaftliche Erfolg bei der Herstellung natürlicher hydraulischer Kalke war indes wenig später der 1832 durch Honoré Gariel, Hippolyte Gariel und einen Herrn Garnier gegründeten Zementfabrik in Vassy-les-Avallon in Burgund beschieden. Die relativ gute Erreichbarkeit von Paris erlaubte es dieser Firma, ihren Zement vor allem auch dahin zu liefern. Dort vollzogen sich die entscheidenden Schritte zum Siegeszug des Betons im Brückenbau. Einer der wichtigsten war der Bau des Pont aux Doubles (1847) über einen der beiden Arme der Seine in Paris (Bild 7). Diese Brücke war immer noch nach einem ähnlichen Prinzip wie Lacordaires Brücke von Éguilly konstruiert: Ihr Bogen bestand aus radial ausgerichteten Bruchsteinen in satter Mörtelbettung. Angesichts der 31 m



**Bild 6**  
Radiale Anordnung der  
Bruchsteinplatten am  
Bogen der Brücke Éguilly  
(Lacordaire 1829;  
Foto: Holzer 2018)

Lichtweite unternahm man besondere Anstrengungen, um die Entstehung von Schäden während des Baus der Brücke zu vermeiden: Auf dem stabil konstruierten Lehrgerüst wurden zunächst die Bogenschenkel in jeweils zwei große Abschnitte aufgeteilt und ohne kraftschlüssige Verbindung miteinander gemauert. Die fertigen Bogenstücke dienten also als »Vorbelastung« des Lehrgerüstes, wie man sie schon im ausgefeilten französischen Werksteinbrückenbau des ausgehenden 18. Jahrhunderts in Frankreich praktiziert hatte, um vorzeitige Schäden am Mauerwerk durch Bewegungen des Bogens auf dem Lehrgerüst zu verhindern [7]. Die Probleme, die bei einem Werksteinbogen auftreten konnten, waren

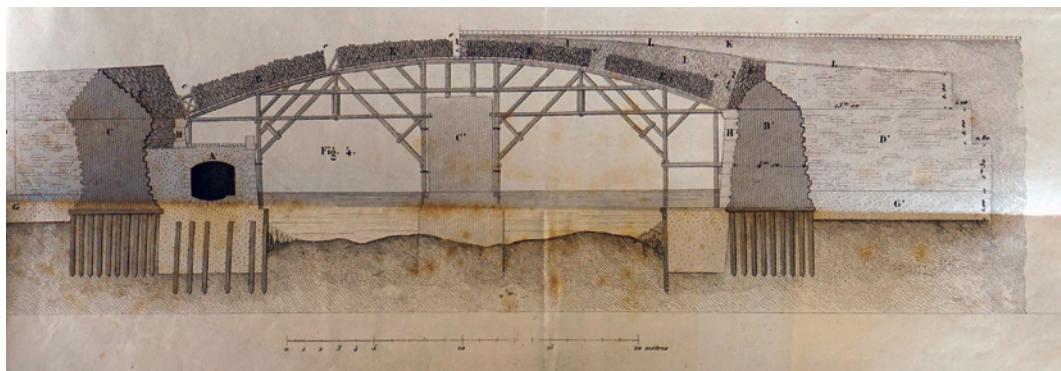


Bild 7 Bauverfahren beim Pont aux Doubles (1847) in Paris (Werbebrochure Gariel & Garnier 1853).

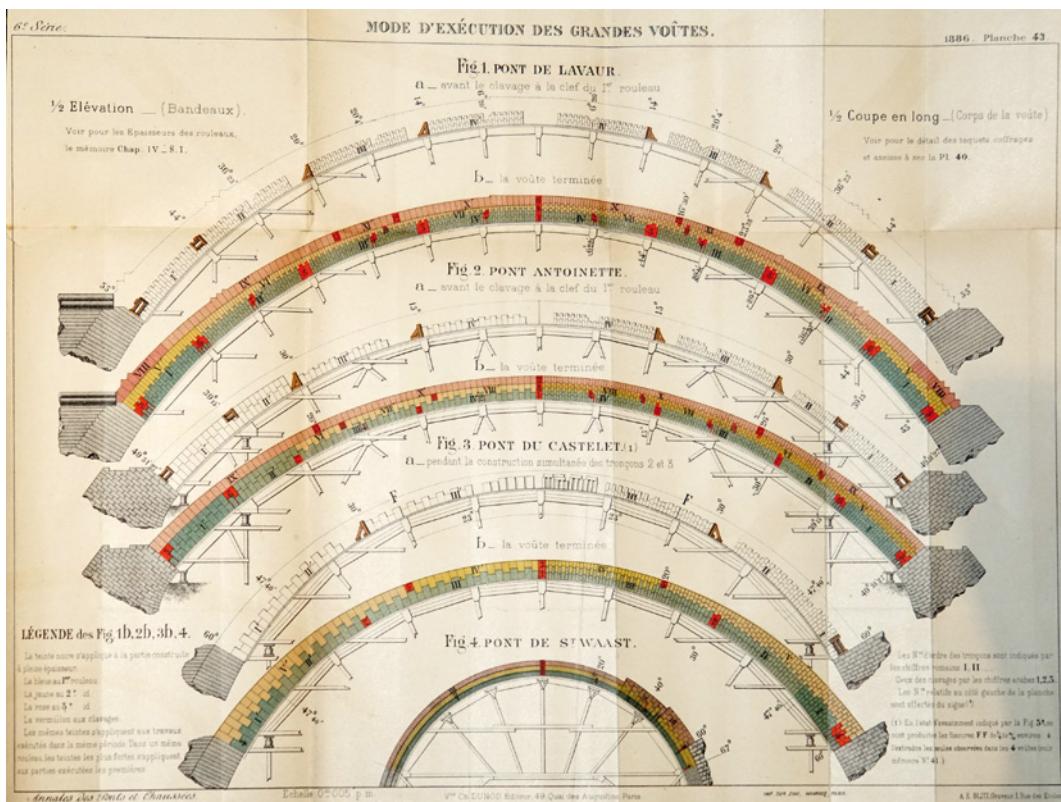


Bild 8 Bauverfahren von Werksteinbrücken in den 1880er Jahren (Paul Séjourne; Annales des Ponts et Chaussées 1886). Die einzelnen Phasen des Baus des Bogens sind farblich gekennzeichnet.

bei einem Bruchsteinbogen mit extrem schnell fest werdenden hydraulischem Kalk wie jenem von Vassy verschärft, weil der Mörtel im Gegensatz zu einem langsam erhärtenden Luftkalkmörtel etwaige Verformungen nicht durch plastische Verformungen ausgleichen konnte. Jede Bewegung führte unweigerlich zu Rissen.

Nach der Fertigstellung der vier Bogenabschnitte wurden die vorher abgeschalteten Lücken dazwischen ausgefüllt und schließlich der Bogen, der nunmehr selbst als verlorener Lehrbogen der fertigen Brücke fungieren konnte, auf seine endgültige Stärke gebracht. Dieses komplizierte Bauverfahren eroberte in den Folgejahren auch den konventionellen Werkstein-Brückenbau und wurde durch Paul Séjourné in den 1880er Jahren bei seinen weitgespannten, ebenfalls mit Zementmörtel hergestellten Eisenbahn-Bogenbrücken zur Perfektion weiterentwickelt (Bild 8). Séjourné konnte die Spannweite von Werkstein-Bogenbrücken für die Eisenbahn auf bis deutlich über 40 m steigern, indem durch das Bauverfahren und der Wahl außerordentlich stabiler Lehrgerüste die Bewegungen der Brücke auf dem Lehrgerüst und beim Ausrüsten auf ein Minimum reduziert wurden.

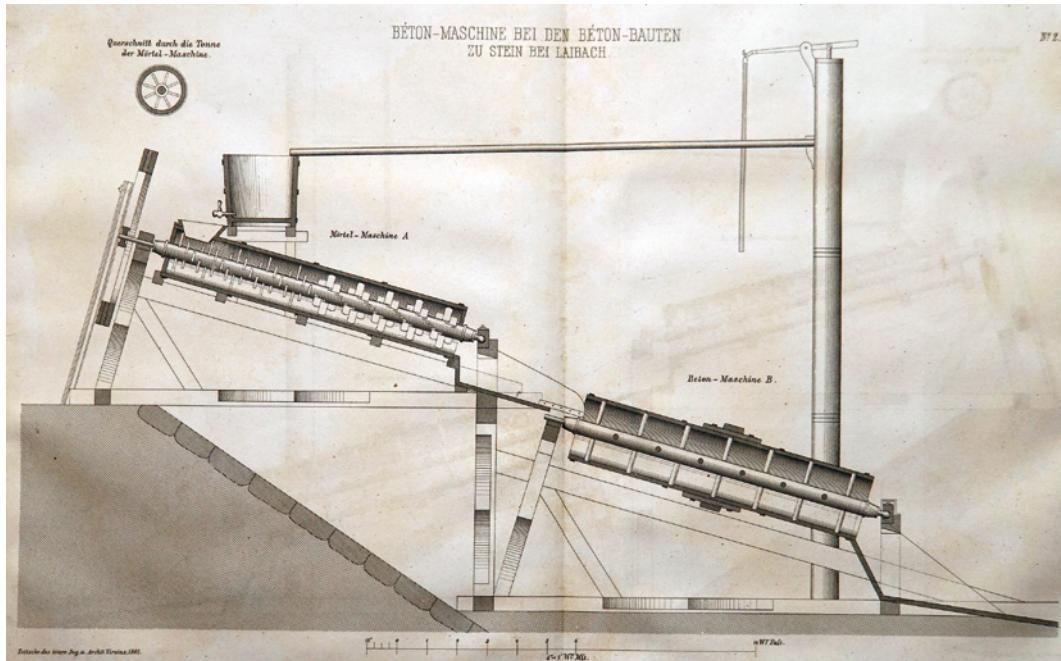
## 2 Beton im Brückenbau ab 1847

Nach Frankreich war Österreich das wichtigste Experimentierfeld des frühen Betonbrückenbaus. Johann Mihálik, der in den 1850er Jahren die erste ganz aus Beton bestehende, monolithisch unter Wasser betonierte Schifffahrtsschleuse im Anschluss an die Donau bei Bezdan errichtete, hatte nebenan in einem Versuchsbau eine aus vorgemischtem Kiesbeton bestehende Brücke mit 10 m Spannweite erbaut und deren Belastbarkeit getestet [6]. Wenig später machte Johann Salzmann beim Bau der k. k. Munitionsfabrik in Stein an der Feistritz (heute Kamnik, Slowenien) ausgiebigen Gebrauch von dem neuen Material für alle möglichen Bauaufgaben, darunter auch mehrere Brücken von 6 m Spannweite. Salzmann setzte nun bevorzugt Maschinen zur Betonzubereitung ein [1]. Typischerweise verfügten die Mischmaschinen dieser Zeit über zwei Stufen: zunächst eine Mörtelmischeinrichtung, nachfolgend dann eine zweite Mischtrommel zum Einmischen der Gesteinskörnung in den Mörtel (Bild 9). Beide Mischtrommeln wurden im Durchlaufprinzip betrieben, so dass eine kontinuierliche Betonproduktion möglich war.

Beim Bau weiter gespannter Brücken blieb man bezüglich des Einsatzes des neuen Materials trotz früher Erfolge zunächst sehr zurückhaltend. Die Gründe dafür sind vor allem darin zu suchen, Angst vor den während des Bauablaufs entstehenden Schäden zu haben und dass bei einem reinen Betonbau die Bauverfahren der Bruchstein-Mörtel-Konstruktion nur mit deutlichen Komplikationen übertragbar waren. Wollte man den Bogen abschnittsweise ohne kraftschlüssigen Verbund auf dem Lehrbogen betonieren, so waren aufwendige Abschaltungen notwendig. Das komplizierte, beim Pont aux Doubles in Paris verwen-

dete abschnittsweise Herstellverfahren in Sektoren und Ringen wurde trotz der sich daraus ergebenden Schwierigkeiten des Bauablaufs schließlich auch auf reine Kiesbetonbrücken übertragen. Diese Technologie ist zunächst vor allem in Frankreich durch Eugène Belgrand beim Bau der Wasserversorgungs- und Entsorgungsanlagen in Paris (mit Vassy-Zement) sowie von einem seiner wichtigsten Generalunternehmer, François Coignet, weitergetrieben worden (Aquädukte der Dhyus- und Vanne-Wasserleitungen in den ausgehenden 1860er und frühen 1870er Jahren). Dabei wurden schon Spannweiten von 40 m erreicht (Aquädukt über die Yonne bei Pont-sur-Yonne), doch um den Preis größerer Probleme beim Bau und sogar mehrfacher Einstürze während des Baus [6].

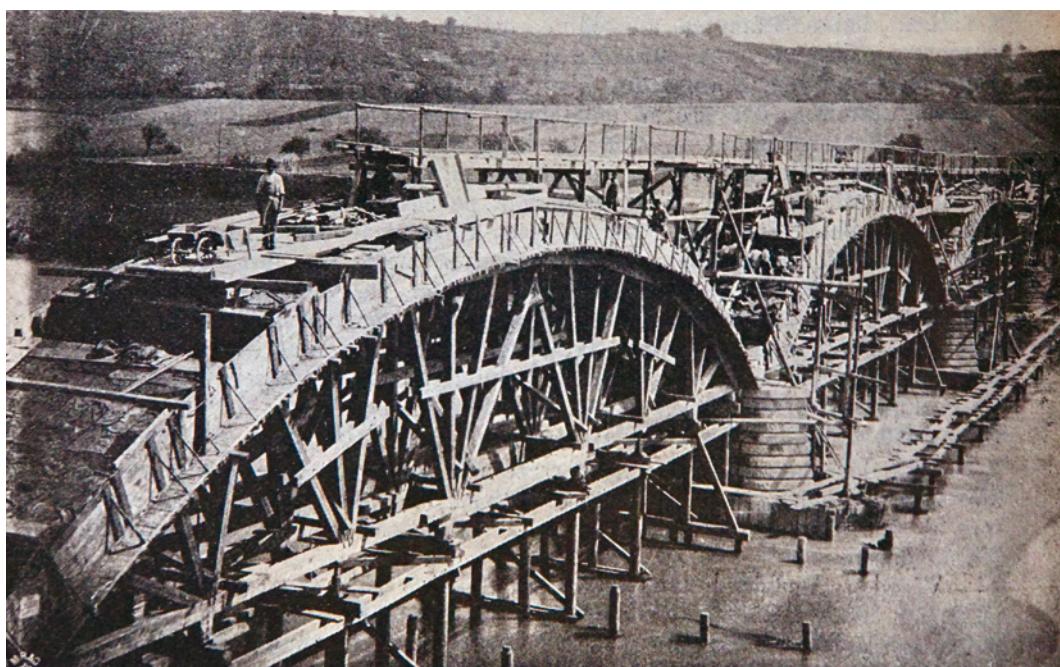
Im deutschen Sprachraum folgten die ersten großen Betonbögen erst in den 1880er Jahren. Auch hier ist mit Brücken für Wasserleitungen begonnen worden (Aquädukt Langenbrand/Murg, 1885; Teufelsgraben-Aquädukt bei München, 1890; zu allen erhaltenen Beispielen sind umfassende weitere Informationen im Katalogband von [8] zu finden). Bei allen diesen Bauten kam das Betonieren in Sektoren und Ringen zum Einsatz. Erst nach diesen positiven Experimenten ist der Einsatz der neuen Technologie auch bei Straßen- und Eisenbahnbrücken gewagt worden (Bild 10). Bei der Analyse und Probennahme bestehender Bauten muss unbedingt beachtet werden, dass man wegen des immer noch relativ hohen Zementpreises an unterschiedlichen Abschnitten des Tragwerks Beton unterschiedlicher Qualität einbaute. Während für die eigentliche Bogenkonstruktion möglichst hochwertiger Beton eingesetzt wurde, kamen für das Ausbetonieren der Bogenwickel und auch für Widerlager und andere massive Bauteile gerne gemagerte Mischungen zum Einsatz, die natürlich auch geringere Festigkeiten



**Bild 9** Maschinelles Mischen des Betons bei den Betonbauten von Stein an der Feistritz  
(Zs. d. österr. Ingenieur- und Architekten-Vereines XVII, 1865)

aufweisen. Außerdem stellen die temporären Abschalungen im Bogen »Sollbruchstellen« dar, die nicht mit lastinduzierten Rissen oder Brüchen verwechselt werden dürfen. Neben den echten Betonbrücken blieben »Zementmörtel-Bruchstein-Brücken« bis zum Ersten Weltkrieg eine wichtige Alternative. Manche Firmen wie z. B. in Deutschland Bernhard Liebold aus Holzminden setzten vorwiegend auf diese Technologie. Besonders bemerkenswert ist die 1903/1904 von Liebold errichtete Brücke über das Syratal bei Plauen mit 90 m Spannweite (auch diese in Sektoren auf dem Lehrgerüst hergestellt).

Mit der Anwendung des neuen Materials auf weitgespannte Tragwerke rückte das Tragverhalten der Betonbögen stärker in den Fokus. Die Planung der Betonbogenbrücken konnte von den gleichzeitigen Entwicklungen im Stahlbau und Mauerwerksbau profitieren. Seit den Arbeiten von Alberto Castiglano (1879) und Heinrich F. B. Müller-Breslau (1881, 1893) stellte die Statik des statisch unbestimmten, eingespannten Bogens kein Problem mehr dar. Castiglano hatte sogar schon den Werksteinbogen des Ponte Mosca bei Turin in einem nicht-linearen Modell unter Berücksichtigung klaffender Fugen nachgerechnet (*Theorie de l'équilibre des systèmes élastiques*, 1879, S. 458–478). Beim Entwurf von Mauerwerksbrücken setzten sich allerdings um dieselbe Zeit Entwurfsverfahren durch, die unter Eigengewicht und gleichzeitiger Verkehrslast bei beliebiger Laststellung einen Verlauf der Stützlinie im Kern des Querschnitts des Bogens (mittleres Drittel der Dicke) garantierten (z. B. G. Tolkmitt 1885 u. a.) und somit eine linear-elastische Berechnung ermöglichten (zu den Gewölbetheorien des 19. Jahrhunderts [11]).



**Bild 10** Übernahme des Bauverfahrens des Wölbens in Abschnitten in den reinen Betonbau (Neckarbrücke Kirchheim, 1895; Büsing 1905, S. 310)

Alternativ war es möglich, das Bogentragwerk durch Einführung künstlicher Gelenke statisch bestimmt zu machen. Diese Idee aus dem Stahlbau setzte sich vor allem in den 1890er Jahren auch im Massivbrückenbau durch, wenn auch nicht ohne Widerstände [9, 10]. Die Anordnung künstlicher Gelenke im Scheitel und an den Widerlagern der Brücke, jeweils in der Mitte der Dicke des Brückenganges, reichte allein schon fast aus, um ein Heraustreten der Stützlinie aus dem Querschnittskern auf den beiden Bogenschenkeln zu verhindern. Ein Übriges tat eine »bananenförmige« Ausbildung der Bogenschenkel, also eine Verdickung in der Mitte (d.h. in den Viertelpunkten der Spannweite der Brücke). Trotz der gelenkigen Ausbildung des Bogens hielt man allerdings bis zum Ersten Weltkrieg an den Verfahren des abschnittsweisen Betonierens auf dem Lehrgerüst fest.

### 3 Eisenbahnbrücken aus Stampfbeton

Die letzte Domäne, die der Bau von Bogenbrücken aus Stampfbeton eroberte, bevor der Stampfbeton zugunsten des Eisenbetons bis zum Ersten Weltkrieg das Feld räumen musste, war der Eisenbahnbrückenbau. So enthielt ein Werbe-prospekt, den die Firma Liebold (Holzminden) um 1895 veröffentlichte, noch keine einzige Eisenbahnbrücke aus Beton. Das sollte sich allerdings bald ändern. Mit der Brücke der Nebenbahn Memmingen-Legau bei Lautrach über die Iller [8, S. 246–253] entstand 1903 unter Liebold eine knapp 60 m weit spannende Betonbogenkonstruktion, die alle Register der bis dahin etablierten Betonbrücken-technologie zog (Bilder 11 und 12): äußerst stabil konstruiertes, direkt von unten vertikal gestütztes Lehrgerüst für den flachen Brückengang, Anordnung von drei Gelenken aus Gussstahl, abschnittsweises Betonieren.

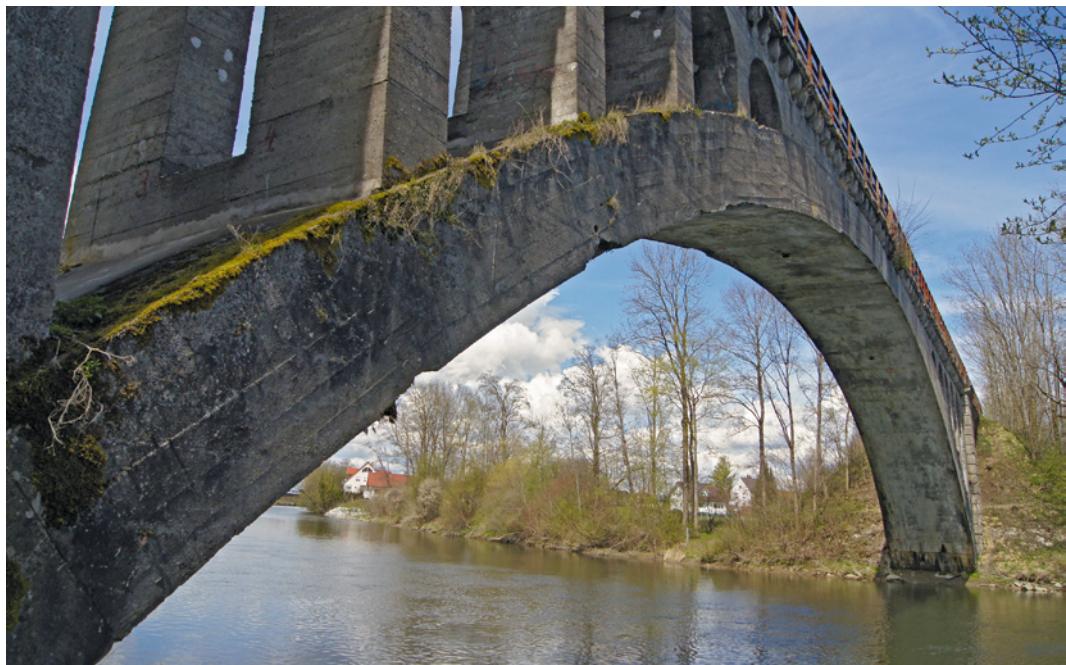


Bild 11 Die 1903 von Liebold errichtete Eisenbahnbrücke über die Iller bei Lautrach (Foto: Holzer 2012)

Neben Liebold waren um dieselbe Zeit – also dicht um die Jahrhundertwende von 19. zum 20. Jahrhundert – auch weitere Protagonisten des Betonbaus mit unbewehrten Stampfbeton-Eisenbahnbrücken mit drei Gelenken hervorgetreten. Je nach Firma wurden dabei Eisengelenke wie in Lautrach oder aber Gelenke aus Granitsteinen bevorzugt. Die wichtigsten Beispiele dieser frühen Eisenbahnbrücken und die zugehörigen Firmen sind: Dyckerhoff & Widmann – Inundationsviadukt der Marienbrücke Dresden (1894), Chemnitztalviadukt Chemnitz (1898), Illerbrücke Kempten (1903), Pegnitzbrücke Nürnberg-Schniegling (1909), Beton- und Monierbau AG – Eisenbahnviadukt Altenburg-Langenleuba (1899), Sager & Woerner – Eisenbahnbrücke Garching/Alz (1907)[8]. Die Aufzählung zeigt, dass es sich nicht um ein großes Œuvre handelt. Umsomehr sollte bei diesen wichtigen Zeugnissen sorgfältig auf eine möglichst unverfälschte Erhaltung des Bestandes geachtet werden. Dazu zählt neben der Erhaltung des Tragwerks als solches auch die Erhaltung der Spuren des Herstellungsvorgangs: Schichtung der lagenweisen Einbringung des Stampfbetons, Spuren der Abschalung für das Betonieren in Sektoren, Abdrücke der Schalbretter. Sorgen über eine mangelhafte Betonqualität sind meist unangebracht. Wie bei Werksteinbögen, sind auch bei Stampfbetonbögen die effektiven Druckspannungen im Tragwerk gering. Überdies wurde der beste Beton in der Regel im Haupttragwerk angebracht. Schlechte Betonqualität in Zwickeln oder Ausfüllungen ist kein Grund zur Sorge. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte können die frühen Zeugnisse des Betonbaus genauso lange erhalten bleiben wie die gleichzeitigen Natursteinbrücken.



Bild 12 Aus Gussstahl hergestelltes Gelenk am Widerlager der Brücke Lautrach (Foto: Holzer 2012)

## Literatur

- [1] Holzer, S.: Mixing concrete – remarks on the early history of modern concrete.  
In: Campbell, J.W.P., et al. (Hg.): Proceedings of the first conf. of the Construction History Society, Queen's College, Cambridge, 11–12 April 2014, S. 219–230.
- [2] Holzer, S.: Frühgeschichte des modernen Konstruktionsbetons. Teil 1: Molen und Wellenbrecher (1597–1850). In: Bautechnik 91 (2014), Heft 12, S. 884–891.
- [3] Holzer, S.: Building breakwaters with precast concrete blocks (1834–67).  
In: Wouters, I., et al. (Hg.): Building knowledge, constructing histories. Proc. of the sixth international congress on Construction History, Brussels 9–13 Juli 2018. Leiden: CRC Press/Balkema, 2018. Bd. 1, S. 123–130.
- [4] Holzer, S.: Frühgeschichte des modernen Konstruktionsbetons. Teil 2: Schleusen und Docks. In: Bautechnik 92 (2015), Heft 3, S. 230–237.
- [5] Holzer, S.: Canal locks and concrete, 1800–1860. In: Construction History. International Journal of the Construction History Society, 31 (2016), Heft 2, S. 133–155.
- [6] Holzer, S.; Veihelmann, K.: Frühgeschichte des modernen Konstruktionsbetons. Teil 4: Bögen und Gewölbe (1782–1877). In: Bautechnik 92 (2015), Heft 12, S. 837–845.
- [7] Holzer, S.: Innovation in 19th century vaulted bridge construction. In: Carvais, R.; Guillerme, A.; Nègre, V.; Sakarovitch, J. (Hg.): Nuts and bolts of Construction History. Paris: Picard, 2012, S. 589–597.
- [8] Veihelmann, K.: Gewölbte Brücken des 19. Jahrhunderts. Vom Mauerwerk zum Stampfbeton. Diss. Univ. d. Bundeswehr München, 2015 (3 Bde.).
- [9] Holzer, S.; Veihelmann, K.: Hinges in historic concrete and masonry arches.  
In: Engineering history and heritage, 188 (2015), S. 55–64.
- [10] Veihelmann, K.; Holzer, S.: Die Verwendung von Gelenken im Massivbrückenbau. Zur Geschichte des Dreigelenkbogens. In: Beton- und Stahlbetonbau, 111 (2016), Heft 2, S. 99–112.
- [11] Holzer, S.: Statistische Beurteilung historischer Tragwerke. Bd. 1: Mauerwerkskonstruktionen. Berlin: Ernst und Sohn, 2013.

## Bildquellen

- Bilder 1, 2, 3, 6, 11, 12: Foto Stefan M. Holzer
- Bild 4: Latour, Esprit; Gassend, Auguste: Travaux hydrauliques maritimes. Marseille: Barile, 1861; Tafel XXIX, Detail.
- Bild 5: Journal des connaissances usuelles et pratiques, Jg. 8 (1832), Bd. 15, Nr. 85, Taf., Detail.
- Bild 7: Dessins et notices relatifs à divers constructions en ciment de la fabrique de Vassy-lès-Avallon (Yonne) appartenant à M. Gariel, successeur de Gariel et Garnier. Paris: Bonaventure et Ducessois, 1853, Taf. 3, Detail.
- Bild 8: Séjourné, Paul: Construction des ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette. Annales des Ponts et Chaussées, Reihe 6, Jg. 6 (1886), Bd. 12, S. 409–549, Taf. 43.
- Bild 9: Salzmann, Johann : Über Béton-Bau, insbesondere über die im k. k. Pulver-Erzeugungs-Etablissement zu Stein bei Laibach hergestellten Beton-Bauten. Zeitschrift des österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereins, Jg. XVII (1865), S. 25–27 u. 49–53, Taf. 2.
- Bild 10: Büsing, F.W.; Schumann, C.: Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen. 3. Aufl. Berlin: Kommissions-Verlag der Deutschen Bauzeitung, 1905, S. 310.

Marcus Assing  
Falk Hoffmann-Berling

## **EIN FORSCHUNGSPROJEKT ZU EINEM »BRÜCKENSCHLAG«**

Die Deutsche Bahn AG hat in ihrem Bestand eine Vielzahl historischer, zum großen Teil denkmalgeschützter Brückenbauwerke. Unter anderem im Zuge von Streckenausbauten mit Geschwindigkeits- oder Lasterhöhungen kommt es häufig zum Rückbau und Neubau solcher in vielen Fällen umgebungsprägenden Bauwerke. Planungsabstimmungen zu den daraus resultierenden Eingriffen in die historische Bausubstanz erfolgen zwischen der DB AG und den Denkmalbehörden oft zu spät. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und werden in einem Forschungsprojekt »Entwicklung einer praxisorientierten Arbeitshilfe zur denkmalgerechten Instandsetzung und ressourcenschonenden Instandhaltung umweltgeschädigter historischer Eisenbahnbrücken« untersucht. Zur Vermeidung der Konflikte zwischen der Deutschen Bahn und der Denkmalbehörde werden Lösungen entwickelt, die sowohl die Belange des Denkmalschutzes als auch die mit dem Eisenbahnverkehr im Zusammenhang stehenden besonderen betrieblichen Anforderungen berücksichtigen.

### **Die Konflikte zwischen der Deutschen Bahn und der Denkmalbehörde**

Mit dem Aufkommen der Eisenbahn in Deutschland entstand in enorm kurzer Zeit ein umfassendes Eisenbahnnetz. Auch wenn die meisten der heute noch in Betrieb befindlichen Eisenbahnbrücken in den Jahren von 1900 bis 1920 erbaut wurden, so stammen die Gewölbe- und Mauerwerksbrücken, die mit etwa 28 %

den größten Anteil am Gesamtbrückenbestand der DB AG ausmachen, zum Großteil sogar aus der Zeit zwischen 1850 und 1880. Diese bis zu 150 Jahre alten Tragwerke bilden noch heute das Rückgrat des Streckennetzes in Deutschland und sind Gegenstand des Forschungsprojektes (Bild 1).

Die Bahn betreibt ihre Brückenbauwerke nach wirtschaftlichen und technischen Kriterien. Eine Brücke soll solange genutzt werden, wie es ihr Zustand, ihre Tragfähigkeit und Tragsicherheit sowie die Wirtschaftlichkeit im Bauunterhalt zulassen. Alter und Konstruktionsart allein sind dabei bereits heute keine ausreichenden Kriterien mehr, eine Brücke zu ersetzen. Damit stimmen die wirtschaftlichen Grundsätze der Bahn im Prinzip mit den Zielen der Denkmalpflege zur Erhaltung historischer Bahnbrücken überein. Dennoch werden häufig auch denkmalgeschützte Eisenbahnbrücken durch Neubauten ersetzt. Aktuelle Recherchen ergeben, dass beispielsweise in den letzten zehn Jahren etwa 400 Gewölbe- und Mauerwerksbrücken abgebrochen wurden. Auf Grundlage ihres gesellschaftlichen Auftrages wachen die Denkmalbehörden über den Schutz und die Pflege historischer Bausubstanz im Zusammenhang mit ihrer geschichtlichen, städtebaulichen, wissenschaftlichen oder künstlerischen Bedeutung. In der Praxis des Brückenbaus zeigt sich, dass diese Behörden in die sehr spezifischen Planungsprozesse der Bahn erst spät und wenig intensiv einbezogen werden. Die Planungen der Bahn sind meist bereits so weit fortgeschritten, dass Umplanungen nur mit einem erheblichen zeitlichen und finanziellen Aufwand möglich sind. Daher tritt spätestens dann, wenn bei den Denkmalbehörden ohne weitere vorangegangene Abstimmungen die Rückbaugenehmigung beantragt wird, ein heftiger Konflikt zu Tage.



Bild 1 Die alte Allerbrücke bei Verden (1860) wurde 2016 durch einen Neubau ersetzt.

## Das Forschungsprojekt

Warum kommt es immer wieder zu diesen Konflikten und wie können sie verhindert werden? Diese Fragen waren Anlass für das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungsprojekt »Entwicklung einer praxisorientierten Arbeitshilfe zur denkmalgerechten Instandsetzung und ressourcenschonenden Instandhaltung umweltgeschädigter historischer Eisenbahnbrücken«. Gemeinsam mit den Projektpartnern wird eine praxisgerechte Arbeitshilfe entwickelt, welche die Methodik der Herangehensweise bei der Bewertung und Instandsetzungsplanung von historischen Brücken beschreibt und dabei sowohl die Belange des Denkmalschutzes als auch die mit dem Eisenbahnverkehr im Zusammenhang stehenden besonderen Anforderungen berücksichtigt. Um das zu schaffen sind das Niedersächsische und das Sächsische Landesamt für Denkmalpflege und die DB Netz AG in der Projektgruppe vertreten.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der Planungs-, Genehmigungs- und Bauablauf der Bahn anhand verschiedener laufender bzw. bereits abgeschlossener Projektbeispiele analysiert. Dabei sind insbesondere auch die Art und der Zeitpunkt der Einbeziehung der Denkmalbehörden in die Planungsprozesse betrachtet worden. Im Hochbau werden die Denkmalbehörden in aller Regel mit Feststellung des Denkmalstatus bereits in der Grundlagenermittlung, spätestens aber in der Vorplanung, mit an die Planung angeschlossen. Der Planungsprozess für Eisenbahnbrücken ist im Unterschied zum Hochbau stark durch weitere Aspekte wie den Bauablauf, der Baubetriebsplanung und der Koordinierung des Bahnbetriebes, der so genannten Sperrpausenplanung, beeinflusst. Die möglichst weitgehende Aufrechterhaltung des Zugverkehrs während der Baumaßnahmen (»Bauen unter Rollendem Rad«) sind entscheidend für den Projektverlauf. Die Planung von Bauzuständen und Zwischenzuständen prägen häufig den gesamten Planungsprozess. Gesichtspunkte wie die Bauwerksgestaltung im Endzustand und insbesondere die denkmalrechtlichen Aspekte sind in der Vergangenheit oft in den Hintergrund gerückt und Abstimmungen mit der Denkmalbehörde hierzu erfolgten erst zum Zeitpunkt der Entwurfs- oder Genehmigungsplanung. Aus diesem Grund wird in dem Forschungsprojekt eine Methodik für den Umgang mit historischen Brücken entwickelt, die in den Planungsablauf der Bahn integriert werden soll, um künftig die frühzeitige Einbeziehung der Denkmalbehörden als Grundlage für eine denkmalverträgliche Planung sicherzustellen (Bild 2). Ziel ist die Abstimmung zu denkmalpflegerischen Zielstellungen bereits in der ersten Planungsphase. Die Erhaltungswürdigkeit und die Erhaltungsmöglichkeit der historischen Eisenbahnbrücken oder einzelner Bauteile sollen so bereits zu Beginn des Planungsprozesses diskutiert und festgestellt werden.

## Eine Frage der Finanzierung?

Ein weiterer Grund, dass es bei Projekten der DB AG so häufig zur Planung eines Abbruchs historischer Brücken und zum Ersatz durch einen Neubau kommt, hängt mit der Finanzierung der Baumaßnahmen zusammen. Zwischen der DB AG und dem Bund regelt eine Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung Rechte und Pflichten hinsichtlich der Erhaltung des Bestandsschienennetzes. Bisher ist darin verankert, dass Instandhaltungen und Instandsetzungen aus Eigenmitteln der DB AG finanziert werden. Neubauten als Investitionen dagegen werden durch den Bund finanziert. Kriterien für die Aktivierung einer Brücke im kaufmännischen Sinne, das heißt für die Definition einer Investition, sind neben dem Neubau beispielsweise eine Last- oder Geschwindigkeitserhöhung oder eine wesentliche Verbesserung der Sicherheitsstandards.

Last- und Geschwindigkeitserhöhungen können in der Regel nicht allein durch Instandhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen, dafür aber mit Ersatzneubauten erreicht werden. Wirtschaftlich gesehen ist es daher nachvollziehbar, dass sich die DB AG eher für den Neubau einer Brücke entscheidet. In einer bauwerksbezogenen gesamtwirtschaftlichen Betrachtung sind jedoch der Erhalt und die Ertüchtigung einer Eisenbahnbrücke im Vergleich zum Neubau in vielen Fällen günstiger. Insbesondere bei den theoretisch nahezu unbegrenzt haltbaren Gewölbebrücken ist daher die Entscheidung für einen Neubau für Ingenieure, die



**Bild 2** Die Eisenbahnüberführung Hermann-Löns-Park in Hannover ist ein Beispiel für den gelungenen Brückenschlag zwischen der Deutschen Bahn und der Denkmalbehörde

auch die Begrenztheit der natürlichen Ressourcen und nachhaltige Konzepte der Erhaltung und Ertüchtigung im Blick haben, nur schwer nachvollziehbar (Bild 3).

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird an konkreten Projekten untersucht, wie durch wirtschaftliche Erhaltungsmaßnahmen auch nachhaltige Investitionen nachgewiesen werden können. Beispielsweise ist der Einbau einer neuen Fahrbahnwanne eine Möglichkeit, langfristig den Erhalt einer historischen Gewölbebrücke sicherzustellen.

Die zeitparallel stattfindenden Verhandlungen zur neuen Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung zwischen DB AG und Bund bieten die Chance, die in dem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse und Ableitungen bei künftigen Planungs- und Finanzierungsprozessen zu berücksichtigen. Daher sollen, befördert durch einen Beirat, die Erkenntnisse aus dem Projekt maßgeblichen Entscheidungsträgern vorgestellt und gemeinsam diskutiert werden.

Geplant ist die Arbeitshilfe zur denkmagerechten Instandsetzung und Instandhaltung von Eisenbahnbrücken 2019 zu veröffentlichen und einzuführen.

### Bildnachweis

Alle Abbildungen MKP GmbH



**Bild 3** Das Bahrmühlenviadukt bei Chemnitz (1872) steht ebenfalls exemplarisch für die gelungene Zusammenarbeit der Deutschen Bahn und der Denkmalbehörde.



Andreas Bruschke

## **ANWENDUNG DER 3D-FOTOGRAMMETRIE ZUR DOKUMENTATION UND VERMESSUNG VON NATURSTEINBRÜCKEN**

Die Photogrammetrie, die Vermessung aus Bildern, hat eine lange Tradition und reicht in das 19. Jahrhundert zurück. Durch die Leistungsfähigkeit heutiger Rechentechnik wurden in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt. Durch automatisierte Bildverarbeitung – basierend auf Methoden der Mustererkennung – können neue Qualitäten erzielt werden. Multikopter sind zur Aufnahme unzugänglicher Bauwerksabschnitte einsetzbar. Den Laserscannern ist durch die 3D-Fotogrammetrie eine ernsthafte Konkurrenz entstanden.

### **1 Architekturvermessung – ein Überblick**

Photogrammetrie und Laserscanning sind indirekte Methoden. Auswertungen finden in Bildern bzw. Punktwolken statt. Die Aufnahmeplanung für Messbilder bzw. Laserscans muss den Anforderungen an Detailerkennbarkeit gerecht werden. Die daraus abzuleitenden Erkenntnisse sind nur so gut, wie es diese Daten hergeben. Die rein geometrisch betrachtete Auflösung (die Pixelgröße in Bildern bzw. der Punktabstand eines Scans) ist ein wichtiges aber kein ausreichendes Kriterium. Durch flexiblen Einsatz von verschiedenen Brennweiten und Aufnahmeplattformen kann auf unterschiedlichste Objekt- und Umgebungsbedingungen photogrammetrisch besser reagiert werden, als mit dem an ein Stativ gebundenen Laserscanner (Bild 1).



**Bild 1**  
Einsatz eines Laser-scanners vor einer Burg-ruine mit steilem Unter-sichten



**Bild 2**  
Messung mit dem Tachy-meter mit direkter Beob-achtung am Objekt und online-Kartierung

Abbilder (virtual reality) sind aber nicht das Objekt selbst. Sie ersetzen auch bei bester Qualität nicht die Auseinandersetzung mit dem Original. Die Interaktion mit dem Objekt beeinflusst entscheidend die Informationen, die wir vom Bauwerk zu erhalten sind. Direkte Methoden sind dabei im Vorteil. Zeichnerische Auswertungen sind immer eine bewusste Interpretation und Bewertung. Traditionelle Handaufmaße bieten selbstverständlich die intensivste Möglichkeit der Beobachtung am Objekt, können aber nur in Ausnahmefällen ausgeführt werden. Dafür hat sich das tachymetrische Aufmaß zum Standard entwickelt (Bild 2). Die dreidimensionale örtliche Vermessung mit dem Tachymeter und gleichzeitiger Kartierung online am Bildschirm wird in der Regel noch mit örtlichen Beobachtungen und händischen Ergänzungsmessungen fertiggestellt. Währenddessen bedürfen Laserscandaten in aller Regel Ergebnisse einer örtlichen Prüfung und Überarbeitung.

Unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren [1] und der konkreten Anforderungen und Objektbedingungen ist ein entsprechendes Vermessungskonzept zu entwickeln. Eine Arbeitshilfe dafür wird das zukünftige WTA-Merkblatt »Bauaufnahme« darstellen [2].

## 2 3D-Fotogrammetrie

Die Photogrammetrie ist bereits seit ihrer Erfindung eine Methode zur dreidimensionalen räumlichen Vermessung auf der Basis von Bildern. Neben Grundrissen, Schnitten und Ansichten von Gebäuden wurden und werden vor allem Karten in allen Maßstäben mit Methoden der Aerophotogrammetrie hergestellt. Im Architekturbereich sind allerdings allgemein nur sogenannte entzerzte Messbilder verbreitet. Seit ca. fünf Jahren hat die Photogrammetrie durch automatisierte Verfahren der Bilddatenverarbeitung eine absolut neue Qualität und Verbreitung erreicht, was hier durch den Begriff *3D-Fotogrammetrie* ausgedrückt werden soll. Durch den Einsatz handelsüblicher Digitalkameras und entsprechender Software erlebt die Photogrammetrie eine zunehmende Anwendung. Die weitgehend automatische Berechnung und dreidimensionale Rekonstruktion der aufgenommenen Oberflächen und daraus abgeleitete Orthofotos entsprechen zwar technisch den Ergebnissen von 3D-Scannern, lassen aber bei einer hohen Wirtschaftlichkeit eine weit bessere Qualität erwarten. Sie haben Dank der sprunghaft gestiegenen Rechnerleistung Einzug in der Architektur- und Archäologiedokumentation gehalten.

Die Verfahren stammen aus dem Bereich Computer Vision (maschinelle Wahrnehmung von Bildinhalten) und sind unter dem Begriff Structure-from-Motion (SfM) bekannt geworden. Dabei wird mit »Motion« ausgedrückt, dass bei einer Serie sich stark überlappender Bilder zwischen den Bildern eine Bewegung stattgefunden hat. Die automatische Identifizierung von Referenzpunkten aus dem Vergleich von Texturmerkmalen in mehreren benachbarten Bildern ist die Grundlage für die gegenseitige Orientierung der Aufnahmen und der gleich-

zeitigen Berechnung einer Punktwolke. Deren Dichte und Genauigkeit entspricht der Auflösung der verwendeten Bilder. Daraus wird die texturierte 3D-Oberfläche bzw. das Orthofoto abgeleitet.

An dem Beispiel des Eisenbahnviaduktes soll die Vorgehensweise beschrieben werden. Die Höhe der Brücke und der teils dichte Baumbestand lassen eine Aufnahme von unten nur teilweise zu. Deshalb kommen Laserscanner hier nicht in Frage. Die oberen Abschnitte müssen aus teils geringem Abstand mit Hilfe eines Multikopters fotografiert werden. Der Einsatz dieser Technik ist heute Standard, es muss aber auf die Einsatzbedingungen und Grenzen hingewiesen werden [3] (Bild 3).



**Bild 3**  
Umgebungssituation  
des Viaduktes

Mit einem Weitwinkelobjektiv wurde durchschnittlich ein Bild pro Meter aufgenommen und damit jedes Mauerstück in mindestens drei Aufnahmen abgebildet. Mit frontaler Aufnahme position und hoher fotografische Qualität wird wertvolles Bildmaterial geliefert, welches Einsichten ermöglicht, die sonst nur unter schwierigen Umständen zu bekommen sind. Für die Erfassung der fünf Bögen, der fünf Pfeiler und des Widerlagers sind mehr als 4.000 Aufnahmen beteiligt (Bild 4).

Der erste Schritt der Berechnung von Orthofotos dient der Orientierung des Bildverbandes und erzeugt eine dichte Punktwolke (Punkte mit 3D-Koordinaten) der Maueroberfläche. Aus der Punktwolke wird durch Vermaschung, der Berechnung kleinsten Dreiecke, eine 3D-Oberfläche erzeugt. In der grauschattierter Darstellung erscheint die Maueroberfläche als Ergebnis der formgetreuen Vermessung anschaulich plastisch. Einen Maßstab, Ausrichtung und Horizontierung erhält das 3D-Modell durch die geodätische Einmessung von Passpunkten (Referenzierung) (Bild 5).

Bei der anschließenden Texturierung wird die 3D-Oberfläche mit der aus den referenzierten Bildern vorhandenen Fototextur überlagert. Jedes Pixel eines Fotos wird geometrisch exakt einer definierten Stelle in einer Dreiecksmasche zugeordnet (Bild 6).



Bild 4 Originalaufnahme vom Multikopter

Die texturierte 3D-Oberfläche – projiziert auf eine definierte Rissebene – stellt im Ergebnis das Orthofoto dar. Dieses entspricht der orthogonalen Projektion einer maßgerechten Aufrisszeichnung und kann demzufolge hochgezeichnet oder als Kartierungsgrundlage verwendet werden (Bild 7).

Die Ableitung von Verformungen – d. h. die Darstellung von Abweichungen von Regelflächen – wie z. B. von Ausbauchungen oder hier die farbcodierte Darstellung der Abweichungen eines Bogensegmentes von dem ermittelten Zylinder, lassen weitere Analysen zu (Bild 8).

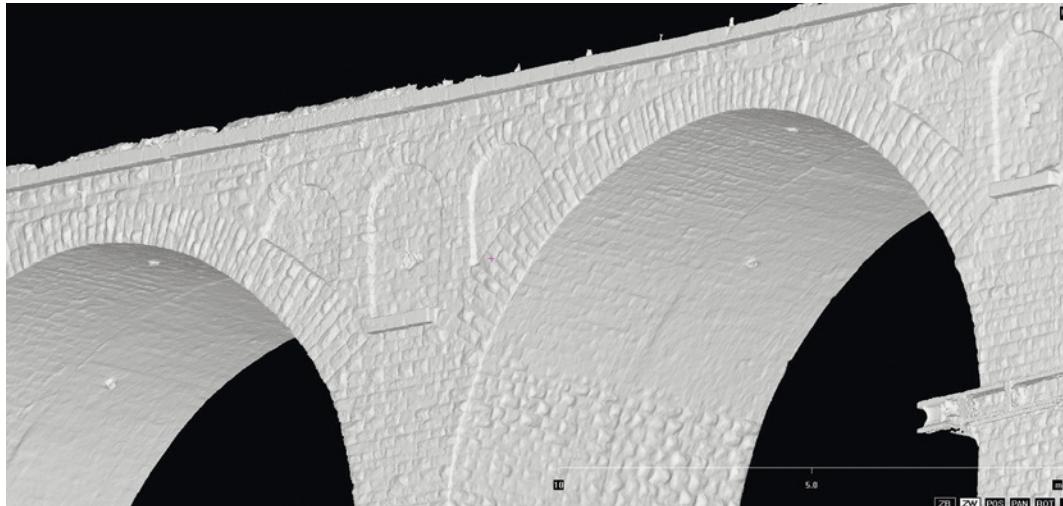


Bild 5 Grauschattiertes 3D-Oberflächenmodell

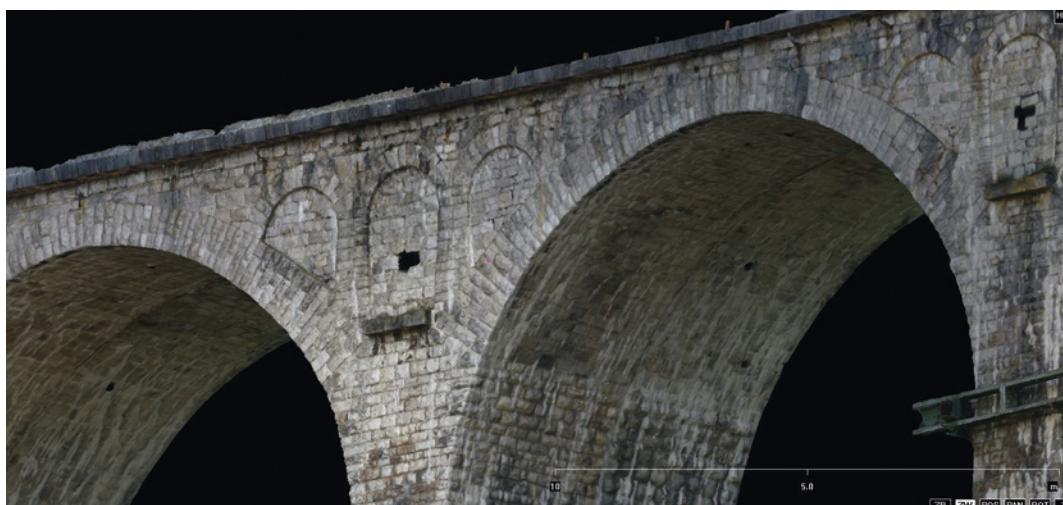


Bild 6 Texturiertes 3D-Oberflächenmodell

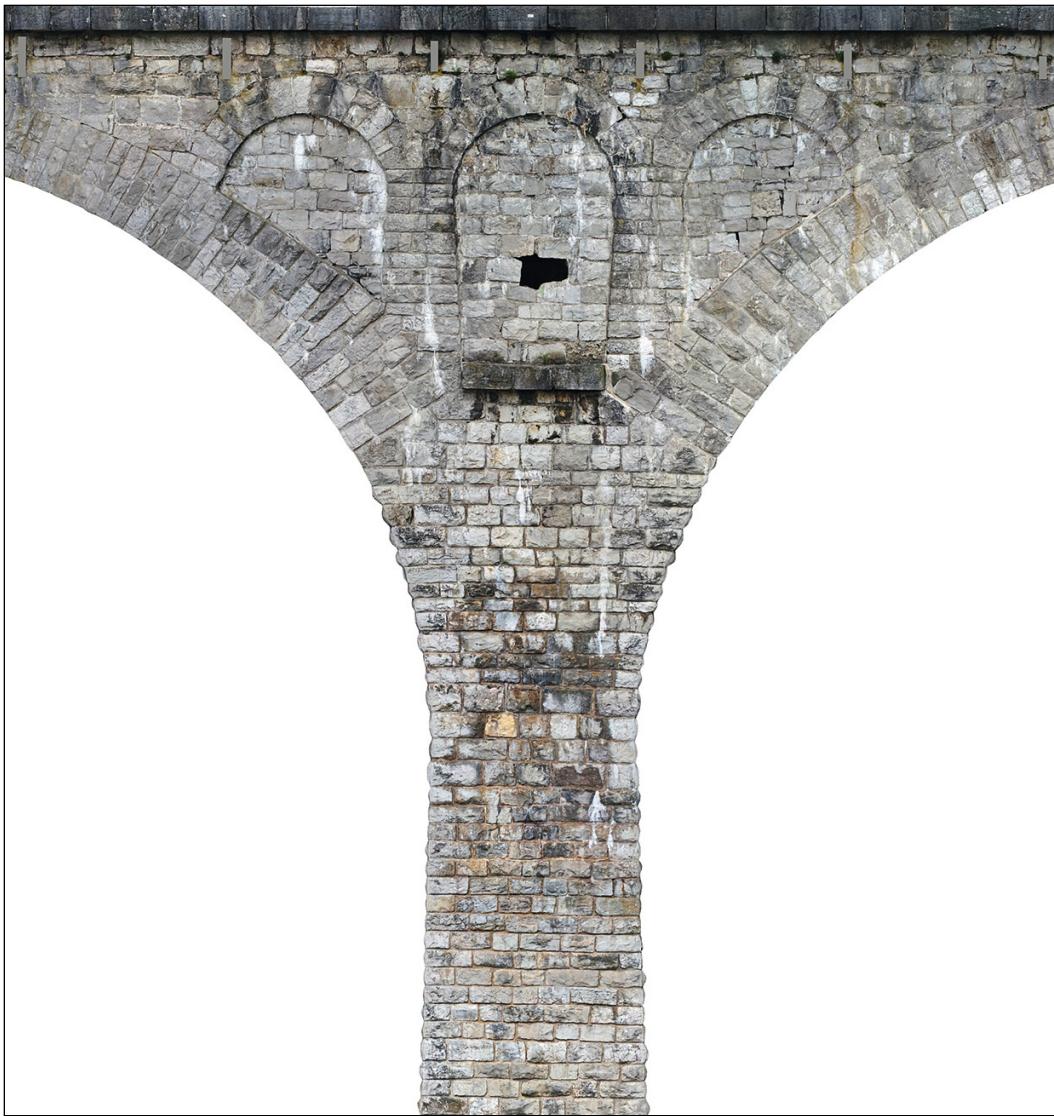


Bild 7 Ausschnitt aus Orhotofoto

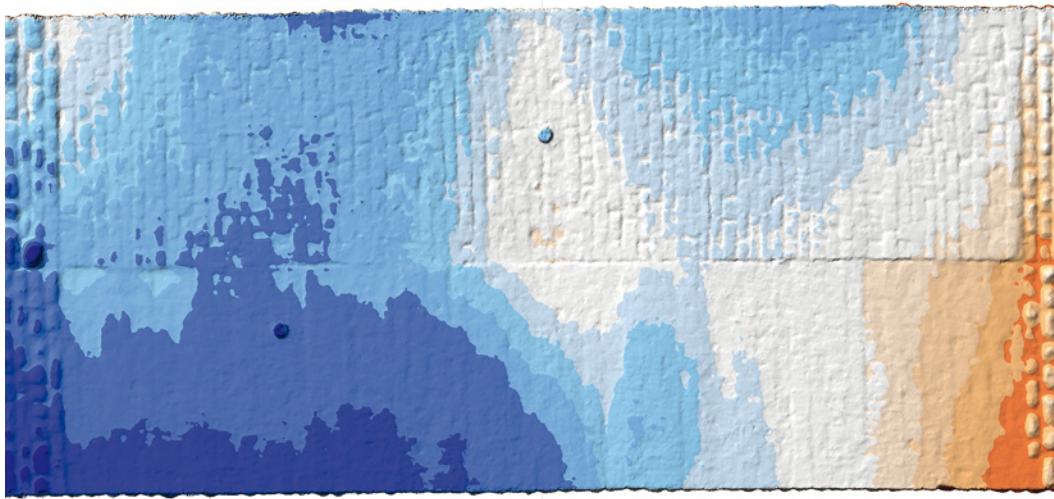


Bild 8 Abwicklung Bogen 6 mit Radius 7,50 m mit Darstellung der Abweichungen von der Zylinderfläche

### 3 Aufnahmeplanung und Sensorplattformen

Das Verfahren ist durch flexible Aufnahmedispositionen vielseitig einsetzbar, von kleinsten Objekten aufgenommen mit Makroobjektiven zur Erfassung von Oberflächenstrukturen bis zu Geländeaufnahmen. Durch beliebige Aufnahmeabstände in Kombination mit variablen Objektivbrennweiten lassen sich verschiedenste Genauigkeiten bzw. Objektauflösungen erreichen. Das einzige Aufnahmegerät ist die Digitalkamera mit einigen Objektiven – preiswert im Vergleich zu den 3D-Scannern. Sensorgrößen von 36 MPixel und mehr sind heute üblich. Die Qualität der verwendeten Objektive muss damit allerdings korrespondieren. Wahllos geschossene Fotos werden jedoch keine guten Ergebnisse bringen. Einige wichtige Regeln sind:

- ausreichende Bildüberdeckung für jeden Fassadenabschnitt mit mindestens drei Aufnahmen,
- keine Aufnahmen vom gleichen Standpunkt; zwischen jeder Aufnahme muss eine Bewegung stattgefunden haben,
- möglichst gleicher Bildmaßstab/gleiche Aufnahmeentfernung,
- ähnliche Perspektiven, keine starken Konvergenzen
- Bildauflösung/Pixelgröße am Objekt im Verhältnis zur gewünschten Detailerkennbarkeit des späteren Ergebnisses,
- möglichst frontale Aufnahmeposition zur Fassade,
- optimale ausgeglichene Lichtverhältnisse: keine Schlagschatten, kein Gegenlicht.

Allein die Photogrammetrie ist durch den Einsatz von Arbeitsbühnen, Hubschraubern und Multikoptern, also bewegten Objekten, in der Lage, sonst unzugängliche Bauteile in guter Abbildungsqualität zu erreichen. Die Aufnahme ist nicht wie bei allen anderen Methoden an ein Stativ gebunden (entsprechend kurze Belichtungszeit, d. h. ausreichend Licht vorausgesetzt).

Heute werden den Mulikoptern, Flugrobotern bzw. ferngesteuerten Drohnen alle Möglichkeiten zugeschrieben. Oft sind sie auch die einzige Alternative und haben ihren Nutzen schon vielfach unter Beweis gestellt. Es wäre aber falsch, nicht auch hier die konkreten äußereren Bedingungen und die Wirtschaftlichkeit abzuwagen und zu vergleichen.

- Eine hohe Bildauflösung oder verwickelte Bauteile erzwingen oft einen kurzen Abstand der Drohne zur Fassade. Schwierige Windverhältnisse in Straßen und an Türmen gefährden die Sicherheit.
- Die max. erlaubte Flughöhe beträgt 100 m.
- Der Pilot muss immer eine Sichtbeziehung zum Fluggerät haben.
- Die Position der Drohne wird durch GPS gesteuert oder stabil gehalten. Der GPS-Empfang kann durch eng stehende Gebäude unterbrochen werden.

- Start, Landung in der Nähe von oder der Flug über Menschengruppen stellen eine Gefährdung dar.
- Große Bauwerke mit gezielten Aufnahmepositionen abzufliegen erfordert wegen der begrenzten Akkuladung eine Vielzahl von Starts.

Hier angedeutete und andere rechtliche Voraussetzungen für den Einsatz von sogenannten unbemannten Fluggeräten sind in [4] festgeschrieben.

Der Einsatz von Helikoptern kann durchaus eine wirtschaftliche Alternative sein zum Beispiel an Burgen oder besonders hohen Türmen. Allerdings ist ein genügender Abstand über Dächern oder benachbarten Gebäuden zu gewährleisten. Bei der Planung von Arbeitsbühnen ist nicht nur deren erforderliche Höhe und Gelenkigkeit, sondern auch Gewicht und Platzbedarf zu berücksichtigen.

## 4 Anwendungen und interdisziplinäre Zusammenarbeit

Die Photogrammetrie ist ein indirektes Messverfahren. Die zeichnerische Auswertung und Interpretation findet eben in Bildern und nicht am Objekt statt. In der Regel wird es notwendig sein, zusätzlich örtliche Erkundungen und Ergänzungen vorzunehmen. Eindeutig definierte Absprachen zu Darstellungsinhalten und eine organisierte Zusammenarbeit mit anderen Fachdisziplinen sichern die Qualität.

Orthofotos werden durch die fotografische Qualität definiert. Insbesondere die Bildauflösung (in mm) entscheidet darüber, ob Befunde sicher interpretiert werden können. Typische Anwendungen und Bildauflösungen sind:

- Putz-, Steinoberflächen: Verwitterungsschäden und Steinbearbeitung (< 2mm)
- Betonoberflächen: Körnung und Rissbildung (< 1mm)
- Wandmalerei, Fresken: Schäden und Maltechnik (< 1mm bis 0,5mm)
- Sicherungsdokumentation und Rekonstruktion von Skulpturen (< 1mm)
- Verformungsanalyse

Orthofotos können Bauaufnahmezeichnungen sinnvoll ergänzen. Sie erhöhen deren Aussagekraft und Informationsgehalt durch die anschauliche fotografische Wiedergabe. Aufmaß und Darstellungsinhalt beschränken sich auf Baukonstruktionen. Gegebenenfalls wird das Fugenbild in den Zeichnungen ergänzt. Verschiedene Materialien, Zustand und Schäden sind in den Orthofotos deutlich sichtbar. Der Aufwand für Aufmaß und zeichnerische Erfassung wird deutlich gesenkt. Bauaufnahmen und Orthofotos sind Bestandteil der Grundlagenermittlung. Sie dienen der Analyse des Bauwerks, werden als Kartierungsgrundlage und zur Kalkulation, Ausschreibung und Abrechnung benötigt. Die konkreten Anforderungen an Bauaufnahmen leiten sich aus diesen Aufgabenstellungen ab und werden idealerweise in interdisziplinärer Zusammenarbeit konzipiert.

## Literatur

- [1] Bruschke, Andreas: Methoden der Bauaufnahme – ein Überblick. In: Natursteinbauwerke. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag und Theiss Verlag, 2015, S. 17–24
- [2] Bruschke, Andreas: Vorschläge zur Qualitätssicherung von Bauaufnahmen am Beispiel der Porta Nigra in Trier. In Tagungsband Natursteinsanierung Stuttgart 2018, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 2018
- [3] Bruschke, Andreas: Bauwerke erkunden – vermessen – verstehen. Was können Vermessungsdrohnen leisten? In: Special 2015 – Messtechnik im Bauwesen, Berlin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2015, S. 27–30
- [4] Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten, Bundesgesetzblatt 2017 Teil I Nr. 17, Bonn 06.04.2017

## Bildquellen

Alle Abbildungen vom Verfasser

Gabriele Patitz

## **ZUSTANDSERFASSUNG UNSANIERTER UND SANIERTER BRÜCKENBAUWERKE MIT BAURADAR**

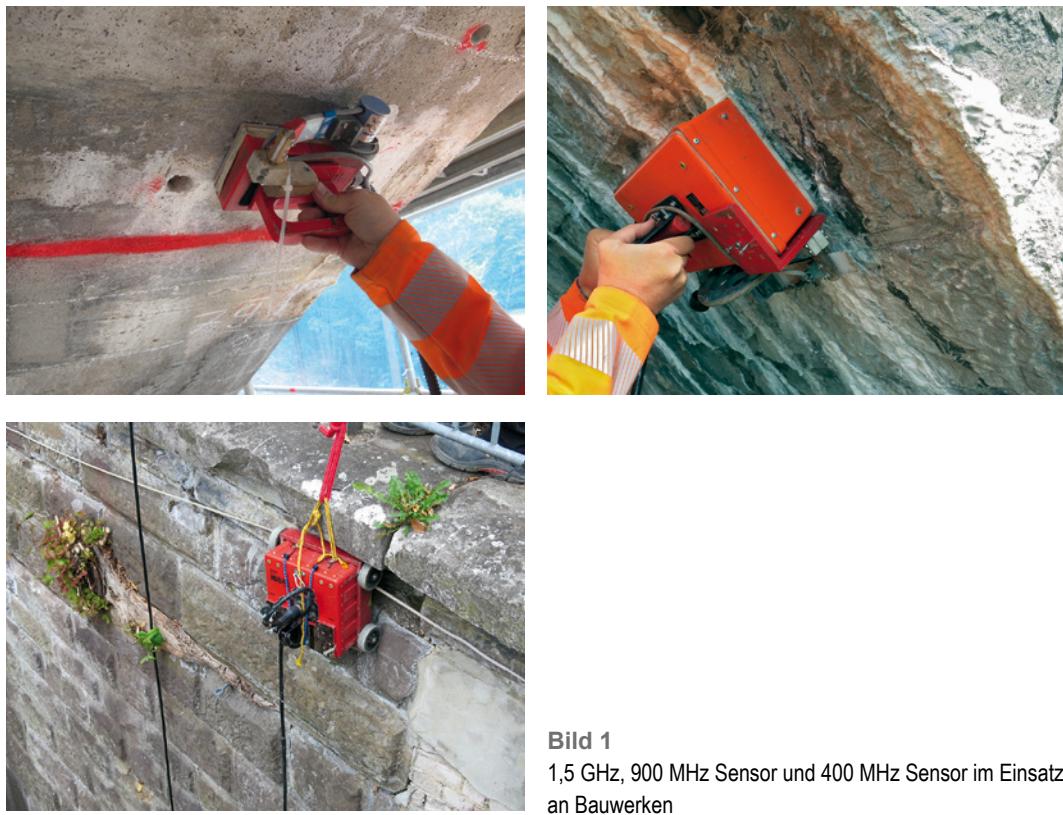
### **Beispiele Laufenmühle-Viadukt und Falkenbach-Viadukt**

Bauradar ist ein Verfahren aus der Geophysik, das seit Jahren erfolgreich im Bauwesen zum Einsatz kommt. Meist wird es herangezogen, wenn im Vorfeld von Planungen und Entscheidungen hinsichtlich der möglichen Erhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen möglichst zerstörungsfrei Klarheit über den aktuellen Zustand des Objektes erforderlich ist. Allerdings lassen sich damit auch die Qualität und der Erfolg ausgeführter Bauleistungen im Neubau kontrollieren. Für die beim Bauen im Bestand auftretenden Fragestellungen ist eine leistungsfähige und baustellengerechte Gerätetechnik vorhanden. Der erfolgreiche Einsatz dieses geophysikalischen Verfahrens liegt aber in der professionellen Anwendung erfahrener Spezialisten aus den Fachdisziplinen Bauingenieurwesen und Geophysik. Erst durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit können die Radarergebnisse in die erforderlichen baubezogenen Informationen übersetzt und weiter verarbeitet werden.

Bei der Bestandserfassung und Bewertung eines Bauwerkes greifen üblicherweise zahlreiche Fachbereiche ineinander. Der Einsatz des Radarverfahrens ist dabei ein unterstützender Baustein. Die Erfahrungen in der Praxis zeigen, dass insbesondere bei großen und komplexen Projekten eine hohe Flexibilität sowohl in der Radardatenaufnahme als auch in deren Verarbeitung und Auswertung erforderlich ist. Dies soll am Sanierungsbeispiel eines betonierten Eisenbahnviaduktes unter laufendem Betrieb sowie am Beispiel eines Natursteinviadukts im Rahmen der bewertenden Bestandsuntersuchungen beschrieben werden.

## Das Radarverfahren im Bauwesen

Die zu erkundenden Bauteile müssen verkleidungsfrei zugänglich sein, wobei dies nur von einer Seite ausreichend ist. Mit den Sensoren wird auf der Oberfläche in parallelen horizontalen oder vertikalen Messprofilen gefahren (Bild 1). In die zu untersuchenden Bauteile werden elektromagnetische Wellen eingebracht, die an Materialien unterschiedlicher Dielektrizität u. a. reflektiert und gebrochen werden. Je stärker dieser Leitfähigkeitskontrast ist, umso stärker werden die Reflexionen. Neben der Reflexionsstärke werden deren Form und Tiefenlage im Bauteil sowie die Signalabsorption erfasst und bewertet. An einer Grenzfläche Beton oder Stein zu Luft oder Stahl treten die höchsten Reflexionen auf. Die unterschiedlichen Reflexionsstärken werden in den Radardaten farbcodiert dargestellt. Für die messtechnische Erfassung der gewünschten Objekte wie Hohlräume, Bewehrung, Mauerschalen und gelöste Mauerinnenfüllungen sind die Wahl der geeigneten Sensoren sowie die Wahl der Messprofillage und Dichte entscheidend und werden bauteilspezifisch festgelegt. Die erfassten Messdaten sind vor Ort hinsichtlich Plausibilität und Qualität zu kontrollieren und ggf. ist eine Anpassung des zunächst geplanten Messkonzeptes erforderlich. Auf der Baustelle erfolgt eine Datensichtung in Form von unverarbeiteten Radargrammen. Dabei handelt es sich um einen Schnitt entsprechend der Messprofillinie in das Bauteil (Bilder 7, 8). Hier lassen sich i. d. R. neben der Bauteilrückseite einzelne Bewehrungsseisen sofort erfassen. Sollen Bauteilbereiche hinsichtlich Hohlräumen, Schalenablösungen oder inhomogener Abschnitte erkundet werden,



müssen in Folge einer vollflächigen Messwertaufnahme die Radardaten als Tiefenhorizonte berechnet und dargestellt werden. Für die fragliche Bauteiltiefe, wie z. B. die zu erwartende Schalengrenze bei Mauerwerk, werden die erfassten Reflexionen unterschiedlicher Stärke über die Messfläche farbcodiert abgebildet (Bilder 3, 5, 11).

Bei den Radarergebnissen handelt es sich zunächst um physikalische Messwerte, die gezielt und strukturiert erfasst worden sind. Für die Beurteilung der baulichen Situation erfolgt im nächsten Schritt deren Interpretation und Bewertung. Dazu sind alle vorhandenen Informationen, Pläne und Bilder aus der Bau- und Lebensgeschichte des Objektes wichtig und können u. U. ausreichend sein. Nicht selten ergibt sich aber der Bedarf an kalibrierenden Bohrungen oder lokalen Öffnungen. Deren Positionierung erfolgt aber auf Basis der Radarergebnisse sehr gezielt und stark reduziert auf eine Mindestanzahl [1–4].

## Anwendungsbeispiel Laufenmühle-Viadukt

Das Laufenmühle Viadukt ist als Teil der Wieslauftalbahn das größte eines Ensembles von drei Viadukten (Strümpfelbach-Viadukt und Igelsbach-Viadukt) (Bild 2). Es gehört zu den ersten Bauwerken dieser Art in Deutschland und steht daher seit 1992 unter Denkmalschutz. Die eingleisige und nicht elektrifizierte Eisenbahnstrecke wird durch die Württembergische Eisenbahngesellschaft (WEG) bedient. Das 160 m lange Laufenmühle-Viadukt besteht aus acht



Bild 2 Laufenmühle-Viadukt bei Welzheim

betonierten Bögen unterschiedlicher Konstruktion und Stützweite. Als Teil des Eisenbahnnetzes ergaben sich die folgenden Anforderungen hinsichtlich einer nicht nur denkmalgerechten Instandsetzung.

- Instandsetzung soll unter Verkehr erfolgen
- Anpassung an die modernen Anforderungen des Eisenbahnverkehrs
- Kompatibilität zu in der Vergangenheit durchgeführten Instandsetzungen mit unterschiedlichen Konzepten und Materialien
- Denkmalgerechter Nachweis der Standsicherheit, Tragfähigkeit (Statik)
- Erhalt des technischen und ästhetischen Bezugs zur Umgebung bzw. Umwelt
- Deutliche Verlängerung der Restlebensdauer (>>10 a)
- Wirtschaftlichkeit der technischen Maßnahmen

Für die weitere Betriebssicherheit und Nutzung als Eisenbahnbrücke mussten die vorhandenen Schadensbilder an den Bögen und Pfeilern erfasst, beurteilt und der Baubestand begutachtet und bewertet werden. Aufgrund einer interdisziplinären Zusammenarbeit und flächiger Radarerkundung eröffnete sich die Möglichkeit, ein an die tatsächlichen Verhältnisse angepasstes Sanierungskonzept zu entwickeln. Es erfolgte eine gezielte und minimierte Sanierung, deren Qualität mittels Radaruntersuchungen während des laufenden Bauprozesses kontrolliert worden ist. Mit dieser Herangehensweise konnten erhebliche Kosten von etwa 1,3 Mio Euro im Vergleich zu den bereits vorliegenden Konzepten eingespart werden. Das gesamte Projekt und die erfolgte interdisziplinäre Zusammenarbeit sind im Sonderheft Bausubstanz 1/2017 beschrieben. Hier werden im Folgenden nur die Radaruntersuchungen vorgestellt [5].

### **Untersuchungskonzept und Ausführung der Radarmessungen vor der Sanierungsplanung**

Ziel der Radaruntersuchungen war es, die Betonstrukturen der Brückenbögen vollflächig zu bewerten. Neben Gefügestörungen sollten Bereiche geringerer Betonqualität erfasst werden. Die gewünschte Eindringtiefe wurde unter statischen Aspekten in Abstimmung mit dem Ingenieurbüro Rothenhöfer Karlsruhe auf ca. 70 cm festgelegt. Für die Auswahl des geeigneten Sensors hinsichtlich der erreichbaren Eindringtiefe bei möglichst hoher Auflösung erfolgten zunächst Testmessungen. Für das vollflächige Abscannen der Bogenuntersichten erwiesen sich horizontale Messprofile mit einem 1,5 GHz Sensor als schnell und effektiv ausführbar (Bild 1). Zur Kalibrierung der Radarergebnisse wurden Entnahmestellen für Kernbohrungen in den Radardaten auskartiert. Im FPI Forschungs- und Prüfinstitut Steine und Erden Karlsruhe e. V. sind neben der Rohdichte auch die Betonfestigkeiten bestimmt worden. Die Bohrkernansprache erfolgte durch die IONYs AG Karlsruhe. Weiterhin wurden die Bogenuntersichten visuell und fotografisch erfasst sowie sämtliche oberflächensichtige Schäden und die Lage und der Zustand der oberflächennahen Bewehrung dokumentiert.

## Ergebnisse der Radaruntersuchungen

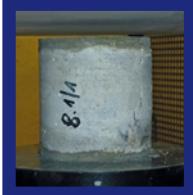
Für die Bewertung des Betonzustandes wurden für folgende Tiefenbereiche die Radarergebnisse als Zeitscheiben berechnet und die Reflexionsstärken farbcodiert dargestellt:

- Bauteiltiefe ca. 2–10 cm – die vorhandene Bewehrung ist erkennbar
- Bauteiltiefe ca. 5–20 cm – Bereiche oberflächennaher Abplatzungen und Verwitterungen, Bereich hinter der Bewehrung
- Bauteiltiefe ca. 15–35 cm – tiefer liegende Betonbereiche

Das Bild 3 zeigt exemplarisch die Radarergebnisse am Bogen 5. Die Bewertung der farbcodierten unterschiedlichen Reflexionsstärken erfolgte auf der Basis der Baustoffprüfungen an den entnommenen Bohrkernen aus dem Bogen 3 (Tabelle 1).

Bis in die Tiefe von ca. 35 cm kann am Bogen 5 von einem weitgehend homogenen Beton (B 25) ausgegangen werden. Lediglich in den beiden umrissenen Randbereichen ist ein größerer Hohlräumanteil und lokal ein B 10 vorhanden (Bild 3). Im Vergleich mit den Ergebnissen an den anderen Bögen wurde weiterhin deutlich, dass der Beton am Bogen 5 in einem besseren Zustand ist. Es war also sinnvoll und gegeben, ein an den tatsächlich vorhandenen Schadensgrad der einzelnen Bögen angepasstes Instandsetzungskonzept zu entwickeln und somit den Sanierungsaufwand kostensparend und effektiver zu planen. Es erfolgten gezielte Injektionen der mit Radar auskartierte inhomogenen Bereiche (Bild 4).

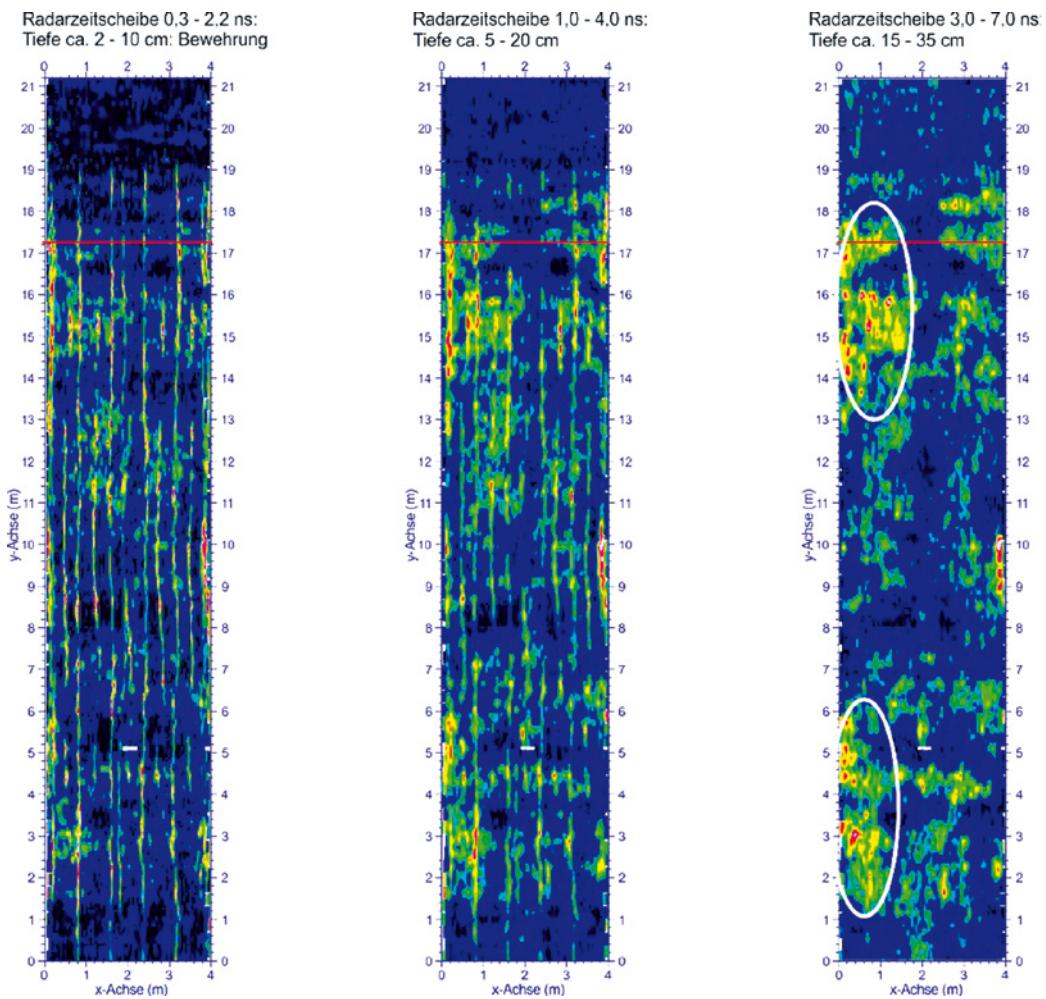
**Tabelle 1** Kalibrierung der Radarreflexionsstärken mittels Bohrkerne

Kalibrierungsbohrkerne aus Bogen 3	Farbcodierung der Reflexionsstärken	Betonqualität
	Farbkodierung Blau: geringe Reflexionsstärke, homogene kompakte und einheitliche Betonstruktur	Kalibrierungsbohrkern – homogener Beton, entspricht hier einem B 25
	Farbkodierung Grün: erhöhte Reflexionsstärke, inhomogene uneinheitliche Betonstruktur, lokale Fehlstellen	Kalibrierungsbohrkern – inhomogener Beton, entspricht hier einem B 10 bis B 15
	Farbkodierung Gelb: stark erhöhte Reflexionsstärke, sehr inhomogene uneinheitliche Betonstruktur mit zahlreichen Hohlräumen, sehr grobkörniger Beton mit fast keinem Feinkornanteil	Kalibrierungsbohrkern – sehr inhomogene uneinheitliche Betonstruktur, entspricht hier einem B 10

## Radarmessungen zur Qualitätskontrolle der Verpressarbeiten

Von der IONYS AG Karlsruhe wurden verschiedene Verpressmaterialien hinsichtlich Eignung und Verarbeitung getestet und deren Ausbreitung im Bauwerk mittels Radar kontrolliert. Ein bedeutender Bestandteil des entwickelten Konzepts zur Sicherstellung der Standfestigkeit und Dauerhaftigkeit ist die Homogenisierung des Betongefüges der Bögen unter Berücksichtigung der statischen Belastungen auch während des Bauprozesses. Es gelang Dank der Zusammenarbeit aller Beteiligten, den Bahnbetrieb während der Sanierungsphase aufrecht zu erhalten [5, 6].

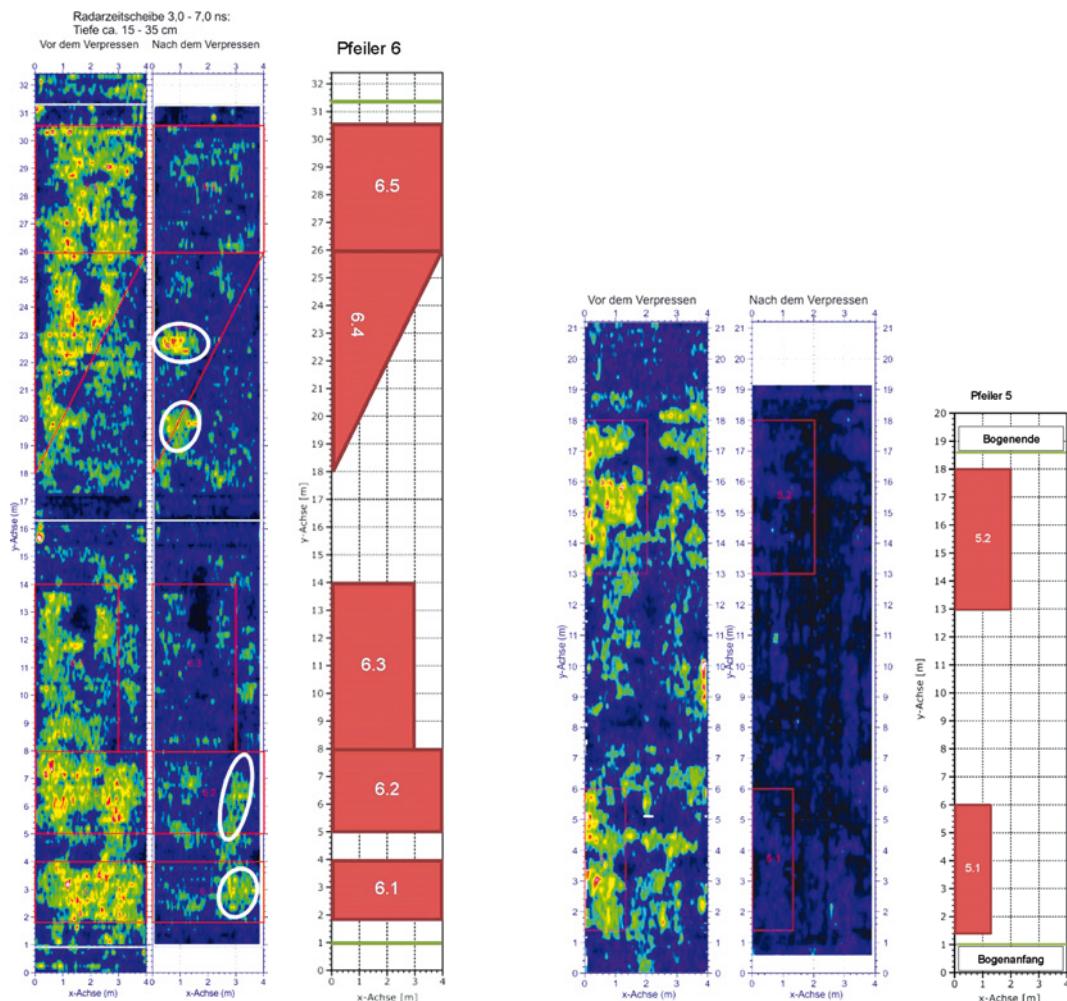
Aufgrund dessen, dass der Verpressumfang auf das wirklich nur notwendige Maß reduziert worden ist, musste dessen Erfolg dokumentiert und kontrolliert werden (Bild 4, 5). Es war sicher zu stellen, dass an allen statisch relevanten Bereichen die erforderliche Betonqualität erzielt werden konnte. Daraufhin erfolgten nach



**Bild 3** Radardaten am Bogen 5 als Zeitscheibe für die Tiefenbereiche ca. 2–10 cm, ca. 5–20 cm und ca. 15–35 cm. Die einzelnen Bewehrungsstäbe zeichnen sich durch lineare starke Reflexionen deutlich ab. Im Tiefenbereich bis ca. 20 cm ist ein weitgehend homogener Beton (B 25) vorhanden. Dies trifft auch auf den Tiefenbereich bis ca. 35 cm und tiefer zu. Nur lokal sind kleinere Bereiche mit leichter und stärkerer inhomogener Betonstruktur (B 10) vorhanden. Sollte hier aus statischen Gründen ein Bedarf an Verpressarbeiten bestehen, sind nur die umrissenen Abschnitte relevant.



**Bild 4**  
Es erfolgten gezielte  
Injektionen der mit Radar  
auskartierte inhomogenen  
Bereiche.



**Bild 5** Kontrolle des Verpresserfolges mittels Radaruntersuchungen für einen Tiefenbereich von ca. 15–35 cm, Grün-/Gelbfärbung = Hinweise auf Kiesnester, Blaufärbung = kompakter dichter Beton, Braun = Verpressfelder

Bild 5a: Bogen 6 Radarergebnisse links vor dem Verpressen mit Hinweisen auf Kiesnester, rechts nach dem Verpressen – Kiesnester nur noch lokal vorhanden.

Bild 5b: Bogen 5 Radarergebnisse links vor dem Verpressen mit Hinweisen auf Kiesnester, rechts nach dem Verpressen – keine Kiesnester vorhanden.

dem gezielten Verpressen ausgewählter Bereiche erneut Radarmessungen mit identischen Geräteeinstellungen basierend auf dem vorherigen Messraster der Bestandserkundung. Vorbereitend erfolgten Testmessungen an gut zugänglichen Bereichen, die mit unterschiedlichem Verpressmaterial verfüllt worden sind sowie verputzte und unverputzte Oberflächen aufwiesen. Kalibrierungsbohrungen ermöglichten die erzielbare Betonvergütung sowie die Verteilung des Verpressgutes in den Versuchsfeldern zu beurteilen.

Im Bild 5a links sind als Zeitscheiben für den Bogen 6 die mit Radar auskartierten inhomogenen Betonbereiche mit erhöhtem Kiesnestanteil in der Tiefe von ca. 15–35 cm mittels Gelb- und Grünfärbung dargestellt. Bei den dunkelblauen Bereichen handelt es sich um einen kompakten Beton. Im rechten Zeitscheibenbild, Radardaten nach dem Verpressen, zeigt sich, dass in den verpressten Flächen 6.1 bis 6.5 gut bis sehr gut die Hohlstellen bzw. Kiesnester verfüllt worden sind. Lediglich in den Flächen 6.1, 6.2 und 6.4 zeichnen sich lokal noch kiesnesthaltige Bereiche aufgrund lokal erhöhter Reflektivität ab. Diese wurden nachgearbeitet. Am Bogen 5 wurden nur die Flächen 5.1 und 5.2 verpresst. Im Bild 5b zeigen die Radardaten den Anteil hohlraumreichen Betons vor und nach den Verpressarbeiten.

### **Zusammenfassung Laufenmühle-Viadukt**

Veränderungen in der ansonsten recht homogenen und kompakten Betonstruktur wie z.B. Verdachtsstellen auf Hohlräume, Kiesnester und Entmischungen lassen sich in den Radardaten bis in Tiefen von ca. 35 cm erkennen. Deutliche Veränderungen in der Betonstruktur tiefer als 35 cm sind hier nicht vorhanden gewesen. Bei dem inhomogenen Beton handelt es sich um Bereiche mit schlechter Verdichtung und große Zuschläge sind ohne Feinkorn und Bindemittel unsystematisch verteilt vorhanden. Mit der Kenntnis über den tatsächlichen Zustand des Betons in den einzelnen Bögen erfolgte ein erneuter statischer Nachweis der Standsicherheit durch das Ingenieurbüro Rothenhöfer Karlsruhe. Zusätzliche Verstärkungsmaßnahmen für die Brückenbögen waren nicht mehr erforderlich um den geplanten Eisenbahnbetrieb weiter zu gewährleisten. Es erfolgte eine gezielte Verpressung relevanter Bogenbereiche, deren Erfolg unmittelbar nach den Verpressarbeiten mit Radar dokumentiert wurde.

Auftraggeber:

Schwäbische Waldbahn GmbH Welzheim

## Anwendungsbeispiel Falkenbach-Viadukt

Für die geplante Nutzung der Bahnstrecke Stolberg-Walheim muss der Zustand und der mögliche Instandsetzungsaufwand für das Falkenbach-Viadukt bekannt und bewertbar sein (Bild 6).

Durch den Einsatz des Radarverfahrens sollte der Zustand des Gewölbemauerwerks der fünf noch erhaltenen und zugänglichen Brückenbögen vollflächig erkundet und beurteilt werden. Aufgrund des vorhandenen dreilagigen Kalksteinquadermauerwerks sind potentielle Schwachstellen in einer Tiefe von ca. 30–40 cm möglich. Es sollte nach Hinweisen auf Schalenbildung, Hohlräume und Ablösungen zwischen den Steinlagen des Bogenmauerwerks sowie anderen möglichen baulichen Veränderungen innerhalb eines Tiefenbereichs bis ca. 70 cm gesucht werden. In statischer Hinsicht war abzuklären, ob von einem monolithisch wirkenden Bogenquerschnitt oder sogenannten Multiringen im Gewölbe ausgegangen werden muss [7].

Die Erkenntnisse aus dem Einsatz zerstörungsfreier indirekter Verfahren müssen kalibriert und hinsichtlich Plausibilität kontrolliert werden. Dies ist sowohl über die Sichtung vorhandener Bauakten, alter und neuer Planunterlagen als auch über gezielte Öffnungen oder Bohrungen möglich.

Eine substanzschonende Bestandserfassung und Bewertung erfordert eine ineinander greifende und sich ergänzende interdisziplinäre Zusammenarbeit von entsprechenden Fachleuten. Unter Leitung des Ingenieurbüros IGP Bauwerksdiagnostik und Schadensgutachten Karlsruhe waren folgende Fachbereiche und Spezialisten tätig:



Bild 6 Falkenbach-Viadukt bei Kornelimünster

<b>Projektleitung und Gesamtgutachten Dr.-Ing. Gabriele Patitz IGP Ingenieurbüro Karlsruhe</b>	
Erstellung von Orthofotos und einer Formanalyse	Messbildstelle GmbH Dresden Dr. Andreas Bruschke
Bauradar, vollflächig an den Bögen Kalibrierung / Bohrlochvideoendoskopie	IGP Ingenieurbüro für Bauwerksdiagnostik und Schadensgutachten Dr.-Ing. Gabriele Patitz Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH (GGU) Karlsruhe Dipl.-Geophys. Markus Hübner
Untersuchung des Tragverhaltens der Mauerwerksbögen in Ergänzung zu den Radaruntersuchungen	Bewer Ingenieure Andreas Bewer Neuhausen a.d.F.
Kalibrierungsbohrungen, Bohrlochvideoendoskopie	Betzold+Maak Baumanufaktur GmbH&Co.KG Nahetal-Waldau
Bewertung der Kalibrierungsbohrungen, Instandsetzungsempfehlungen für das Bogen- und Stirnmauerwerk	Ronald Betzold Sachverständiger für Bauwerkserhaltung Schmiedefeld am Rennsteig

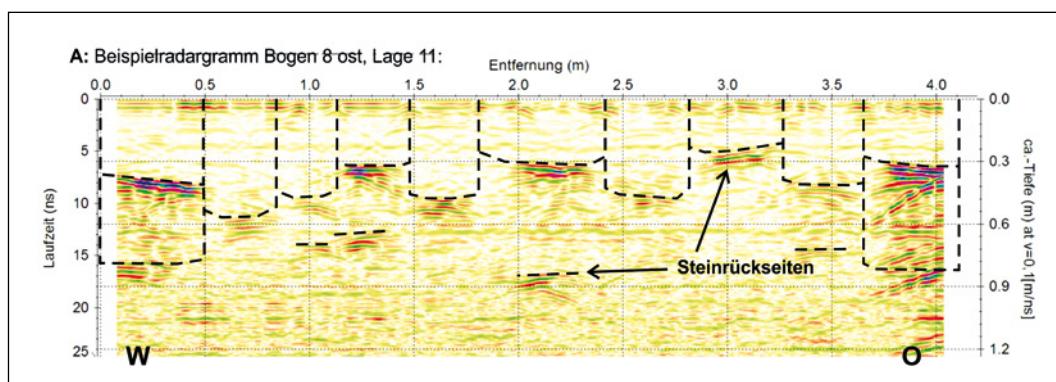
### **Radarerkundung zur Abklärung einer möglichen Multiringbildung**

Für diese Mauerwerksuntersuchungen mit einer erforderlichen Eindringtiefe bis ca. 70 cm stehen verschiedene Sensoren zur Verfügung. Dabei gilt: Je tieferfrequenter ein Sensor ist, desto größer wird die Eindringtiefe, aber zu Lasten einer geringeren Auflösung. Feuchte- und Salzbelastungen wirken sich beim Kalkstein im Vergleich zu Sandstein weniger deutlich auf die Datenqualität aus. Auf der Basis eines Datensatzvergleiches verschiedener Sensoren wurden hier sämtliche Bogenuntersichten mit dem 1,5 GHz Sensor flächig untersucht.

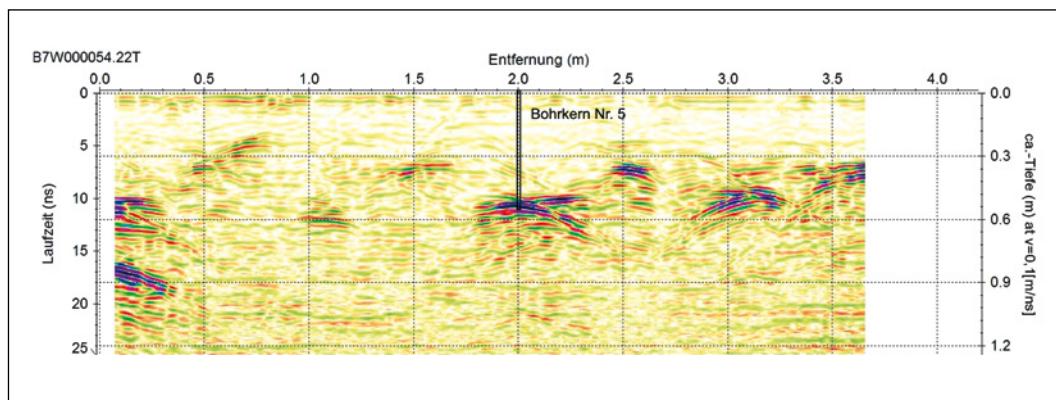
Für eine Beurteilung der Homogenität des Mauerwerks und der Ausdehnung möglicher Schwachstellen und Hohlräume über eine große Bogenfläche wurden Zeitscheiben berechnet. Diese liefern eine Bereichsgliederung sowie – zusammen mit anderen Informationen wie dem sichtbaren Zustand – eine Einschätzung der Bogenbereiche. Zeitscheiben (Ergebnisdarstellung als Tiefenhorizont) wurden bei dem Leibungsmauerwerk aufgrund des dreilagigen Mauerwerks für den Gewölbebereich von ca. 25 bis 60 cm berechnet (Bild 11). Um die unterschiedlich starken Reflexionen zu bewerten, erfolgte eine gezielte Kalibrierung mittels Bohrungen und Bohrlocherkundung, ausgeführt von der Firma Betzold+Maak Baumanufaktur, Hinternah.

Das Beispielradargramm (Schnitt in eine Steinreihe) in Bild 7 ist typisch für einen unauffälligen Normalzustand des Bogenmauerwerks. Die Rückseiten der Steinquader sind erkennbar. Aufgrund der unterschiedlichen Steinlänge ist eine gute Verzahnung vorhanden und die vergleichsweise geringen Reflexionsstärken weisen auf eine geschlossene, gut vermörtelte rückwärtige Fuge hin.

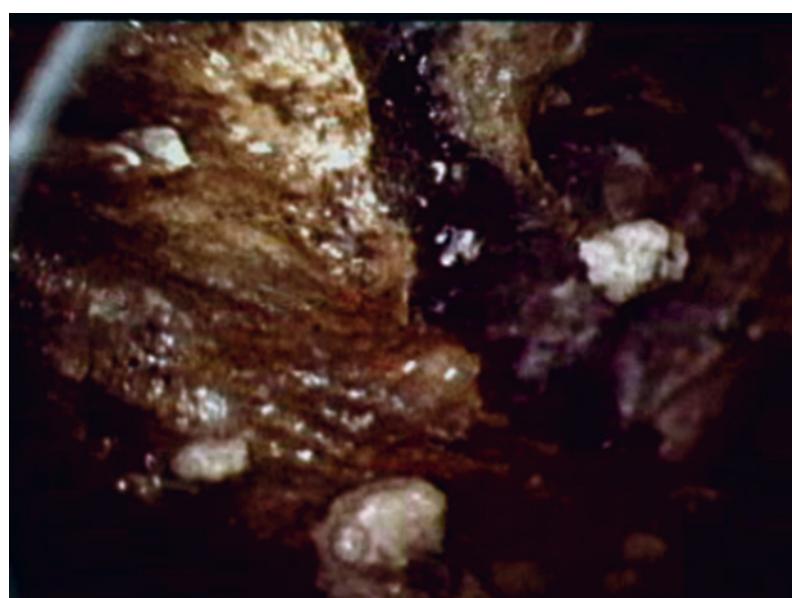
Verdachtsstellen auf Hohlräume hinter der ersten Steinlage zeigen die hohen Reflexionsstärken im Bild 8. Dieser Verdachtsfall und dessen Ausmaß wurde mittels Kernbohrungen und Videoendoskopie kalibriert und bestätigt (Bild 9).



**Bild 7** Bogen 8 Ost: Beispielradargramm für den »unauffälligen« Normalzustand, hohlraumfreie Verzahnung zwischen der äußeren und mittleren Steinreihe des Bogenmauerwerks um bis zu ca. 20 cm, rechts und links sind die Quader der Stirnmauern aus gut bearbeiteten Randsteinen erkennbar.



**Bild 8** Beispielradargramm für den Verdachtsfall: Netzaufbau an offenen Rissen und Fugen oder Schalenbildung im Tiefenbereich der ersten rückwärtigen Stoßfuge (ca. 30 - 50 cm), Position der Kalibrierungsbohrung Nr. 5



**Bild 9**  
Bohrung 5, Riss bzw.  
Steinende bei ca. 48 cm,  
Übergang Stein in Mörtel,  
hier sind Hohlräume im  
Video sehr gut erkennbar.

Basierend auf den neun Kalibrierungsbohrungen müssen die sehr hohen Reflexionen an den Steinrückseiten mit einem Hohlraum bzw. einer offenen Mörtelfuge interpretiert werden. Bei den in unauffälligen Bereichen eingebrachten Bohrungen konnte ein Kraftschluss zwischen Stein und Mörtelfuge dokumentiert werden.

### Erfassung des Mauerverbandes

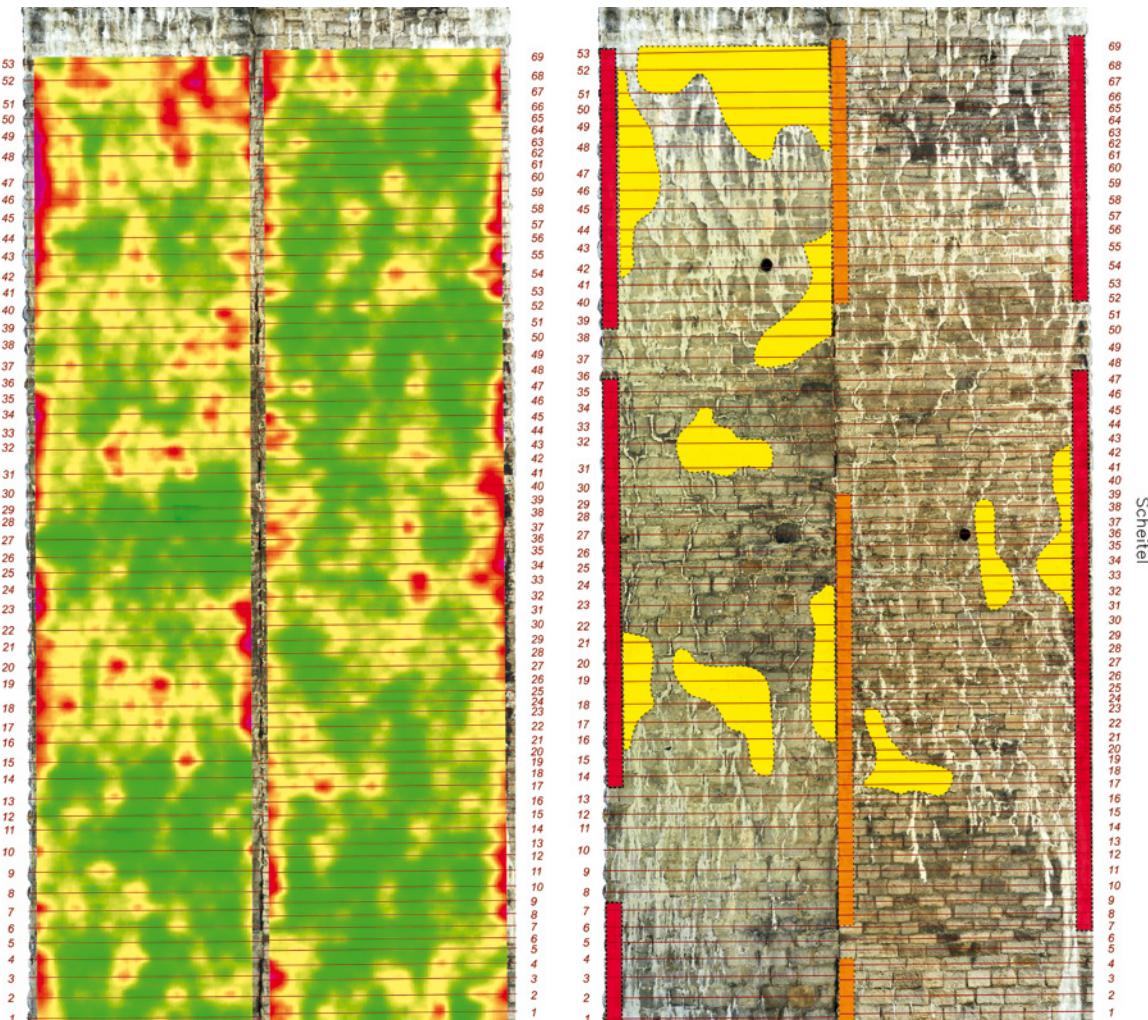
Aufgrund der steinlagenweisen Radarmessungen können in den Radargrammen die einzelnen Steinquader und deren Länge erfasst werden. Dadurch ist es möglich, den Mauerwerksverband sowie die Verzahnung zwischen den einzelnen Steinreihen und Steinlagen in Quer- und Längsrichtung zu beurteilen. Exemplarisch erfolgte diese Auswertung für einen Teilbereich des Bogens 7 westseitig. Im Bild 10 sind je Stein die Steinlängen eingetragen. Rote Zahlen korrelieren mit einer offenen, hohlraumhaltigen rückwärtigen Stoßfuge.



Bild 10

Steinlagenweise exemplarische Erfassung der Steinlängen, wodurch eine Beurteilung der Verzahnung der Mauerringe möglich ist. Position von Kalibrierungsbohrungen

Um größere zusammenhängende Verdachtsflächen auf Hohllagen zwischen der ersten und zweiten Steinlage zu erfassen, wurden aus den Radardaten Zeitscheiben berechnet und ausgewertet. Für den interessierenden Tiefenbereich von ca. 25–60 cm sind die unterschiedlichen Reflexionsstärken farbcodiert dargestellt. Bild 11 zeigt eine typische Radarzeitscheibe für den Bogen 6. In der Tabelle 2 ist die Farbcodierung der Reflexionen sowie deren Interpretation enthalten. Basis für diese Radardateninterpretation sind die Erkenntnisse aus den Kalibrierungsbohrungen. Die Ergebnisse der Radarmessungen am Bogen 6 sind lagegenau an der Bogenuntersicht auskartierte.



**Bild 11** Bogen 6 – Radarergebnisse als Zeitscheibe in einem Tiefenbereich von ca. 25–60 cm

**Bild 12** Bogen 6 – In den gelb markierten Flächen sind die Reflexionen erhöht. Dabei handelt es sich um offene Stoßfugen zwischen der ersten und zweiten Steinlage. Die Bogenrandsteine sind orange und rot markiert, hier sind verspringende Risse in ca. 30–70 cm ursächlich. Vermutlich handelt es sich um Frostschäden.

**Tabelle 2** Farbcodierung der Reflexionsstärken, Ergebnisinterpretation auf der Basis der kalibrierenden Bohrungen (Bild 12)

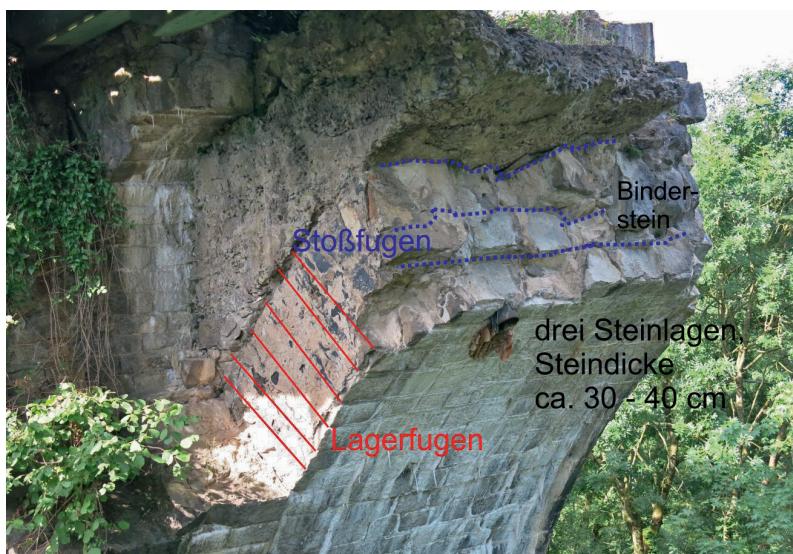
Farbgebung	Interpretation
Keine Farbgebung	unauffälliges homogenes Leibungsmauerwerk, Verzahnung von bis zu ca. 20 cm zwischen der äußeren und mittleren Steinreihe vorhanden
Gelb	auffälliges Leibungsmauerwerk, Bereiche mit offenen Stoßfugen hinter der ersten Steinreihe
Orange	Randsteine des westlichen Bogenmauerwerks der älteren Ostbrücke, Verdacht auf Bogenrandsteine mit hohem Rissanteil und offenen Fugen
Rot	Randsteine des Bogenmauerwerks ost- und westseitig, Mauerwerk mit hohem Rissanteil und offenen Fugen

## Ergebnisse der Radaruntersuchungen

### Bogenmauerwerk

Am Kriegsschaden des Bogens 3 ist ersichtlich, dass die Gesamtdicke des Bogenmauerwerks ca. 70 cm beträgt (Bild 13). Es sind drei Steinreihen mit Steindicken von ca. 30–50 cm vorhanden. Lokal sind Bindersteine erkennbar. Der noch anhaftende dicke Stoßfugenmörtel lässt auf eine gute Qualität und Dauerhaftigkeit schließen.

Die steinlagenweisen Radaruntersuchungen belegen, dass dieses Konstruktionsprinzip überall vorhanden ist. Alle Bögen sind identisch aufgebaut. Die äußerste Steinreihe bindet ca. 30–50 cm versetzt in die mittlere ein. Der Versatz variiert zwischen 5–10 cm und beträgt maximal 20 cm bei einem spröden Kalkstein und dicken Stoßfugen. Es gibt Bogenbereiche, bei denen diese Verzahnung weniger gut ausgeführt ist. Größere und tiefer einbindende Steine sind selten vorhanden.



**Bild 13**  
Erkennbarer Aufbau  
des Bogenmauerwerks  
am Kriegsschaden

In den Radardaten zeigen sich aufgrund stärkerer Reflexionen Verdachtsstellen von Hohllagen hinter der ersten Steinreihe. Diese wurden auskariert und in den Ergebnisbildern gelb angelegt (Bild 12). Mittels Bohrungen und Endoskopie wurde abgeklärt, dass es sich hier um hohlraumreiche Fuge zwischen der ersten und zweiten Steinlage handelt.

Es muss in den gelb auskarierten Flächen von einem hohlraumreichen Mauerwerk hinter der ersten Steinreihe ausgegangen werden. Das bedeutet bei diesem Bogenmauerwerk, dass es sich um offene Stoßfugen und somit potentielle Stellen für Schalenbildung oder bereits vorhandene Mauerschalen handelt. Es besteht der Verdacht auf lokale Ringseparation [7].

Ursächlich für diese offenen Stoßfugen ist vermutlich eine mangelhafte Bauausführung während der Aufmauerung der Gewölbebögen. Trotz dieser Schwachstellen und der erfahrenen hohen Belastung der Brücke sind keine Verformungen an den Bogenuntersichten, die dazu im Bezug stehen, vorhanden. Das ergab eine Formanalyse auf Basis der Orthofotos, erstellt von der Messbildstelle Dresden [8].

#### Stirnmauerwerk – Bogenrandmauerwerk

Fast alle Bogenrandsteine weisen am östlichen und westlichen Stirnmauerwerk verspringende Risse oder offene Fugen bei ca. 30–50 cm auf. In den Radardaten zeigt sich das an den starken Reflexionen (Rotmarkierung), die am Objekt bereits kalibriert werden konnten. Ursächlich können Auswirkungen von Temperaturspannungen und Frosteinwirkungen des eher spröden Kalksteins sein.

Das bedeutet, dass zumindest in den Randbereichen von ca. 70 cm mit einer lokalen Schalenablösung des Bogenmauerwerks gerechnet werden muss.

### **Ergebnisse der interdisziplinären Bestandserfassung und Bewertung des Falkenbach-Viadukts für die geplante eingleisige Bahnnutzung**

- Die Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen ergaben keine Hinweise auf Formänderungen.
- Konstruktionsschäden gekoppelt mit Hinweisen auf Materialversagen aufgrund von Überbelastungen (klaffende Fugen usw.) sind nicht erkennbar.
- Kalibrierte Radaruntersuchungen ergaben, dass bis auf wenige auskarierte Bereiche ein weitgehend unauffälliges ungeschädigtes bauarttypisches Bogenmauerwerk vorhanden ist. Die Bereiche lokaler Hohlstellen in ca. 25–60 cm Tiefe sind höchstwahrscheinlich herstellungsbedingt und nicht nutzungsbedingt.
- Statische Betrachtungen ergaben, dass die vorliegende Graphostatik als Vergleichsgrundlage herangezogen werden kann und bei der geplanten einglei-

- sigen Nutzung in Brückenmitte eine wesentlich geringere Beanspruchung des Bauwerkes erfolgen wird [7].
- Bei den bisher nur konservativ abgeschätzten Materialfestigkeiten von Naturstein und Mörtel sind mit der geplanten eingleisigen Nutzung weitere Tragreserven vorhanden.

Das Viadukt ist prinzipiell in der Lage, der geplanten Nutzung und Beanspruchung gerecht zu werden.

Geeignete partielle Erhaltungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen sind erforderlich und müssen geplant werden.

Auftraggeber:

EVS EUREGIO Verkehrsschienennetz GmbH  
Rhenaniastrasse 1  
52222 Stolberg

## Quellen und weiterführende Literatur

- [1] Patitz, Gabriele: Zerstörungsfreie Untersuchungen an altem Mauerwerk, Beuth Verlag Berlin, 2009
- [2] Patitz, Gabriele: Altes Mauerwerk zerstörungssarm mit Radar und Ultraschall erkunden und bewerten. Bauphysik-Kalender 2012, Verlag Ernst & Sohn Berlin
- [3] Patitz, Gabriele; Grassegger, Gabriele; Wölbert, Otto (Hrsg.): Natursteinbauwerke Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen. Arbeitsheft 29 des Landesamtes für Denkmalpflege Baden-Württemberg, Fraunhofer IRB Verlag und Theiss Verlag, 2014
- [4] Patitz, Gabriele: Erkundung und Bewertung von Stützmauern mit Bauradar. Sanierung historischer Stadtmauern, Planung – Ausführung – Wartung & Pflege, Bauer, Christine; Patitz, Gabriele (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart 2016
- [5] BAUSUBSTANZ Betoninstandsetzung, Instandsetzung des Laufenmühle-Viadukts, Sonderheft 1, 2017
- [6] Gerdes, Andreas; Bürkle, Tobias; Patitz, Gabriele; Rombach, Lorena: Nachhaltig erhalten und nutzen, Substanzzorientiertes, kostenoptimiertes Instandsetzungskonzept für das Laufenmühle-Viadukt erarbeitet. In: B+B, Heft 6/2018
- [7] Bewer, Andreas: Untersuchungen zum Tragverhalten von Mauerwerksbögen, Beispiel Falkenbach-Viadukt. In: Historische Eisenbahnbrücken, Tagungsband 2019, Verein Erhalten Historischer Bauwerke e. V., Fraunhofer IRB Verlag
- [8] Bruschke, Andreas: Anwendung der 3D-Fotogrammetrie zur Dokumentation und Vermessung von Natursteinbrücken. In: Historische Eisenbahnbrücken, Tagungsband 2019, Verein Erhalten Historischer Bauwerke e. V., Fraunhofer IRB Verlag

## Bildquellen

Bilder 3, 5, 7, 8, 11, 12: GGU mbH Karlsruhe

Bild 5: IONYs AG Verpressflächen

Bild 9: Ronald Betzold

Bild 10: Messbildstelle Dresden GmbH

Alle anderen Abbildungen: Gabriele Patitz

Andreas Bewer

## **UNTERSUCHUNGEN ZUM TRAGVERHALTEN VON MAUERWERKSBOGEN**

### **Beispiel Falkenbach-Viadukt**

Die Untersuchung zum Tragverhalten des Falkenbach-Viadukts war ein Prozess der Annäherung an das Bestandsbauwerk, der die Radaruntersuchungen, Bau teiluntersuchungen und Materialuntersuchungen begleitet hat. Zwischenergebnisse wurden frühzeitig interdisziplinär erörtert, damit diese bei der Auskartierung der Radarergebnisse sowie der Videoendoskopie methodisch berücksichtigt werden konnten. In intensiver Kommunikation stellte sich die Bewertung des Risikos einer Ringseparation als die zentrale Aufgabenstellung heraus. Ganz konkret ergab sich daraus die Frage, ob die vorgefundenen Hohlräume injiziert werden müssen, um so an allen Stellen einen Verbund zwischen den Bogen ringen sicherzustellen, oder ob trotz eines partiellen Ausfalls der Kraftschlüssigkeit zwischen den Mauerwerksringen immer noch die erforderliche Tragfähigkeit gegeben ist.

### **Das Falkenbach-Viadukt**

Das Viadukt besteht aus zwei bündig aneinander gebauten Bogenbrücken mit acht Öffnungen über eine Gesamtlänge von ca. 145 m. Der Pfeilerabstand beträgt ca. 18 m und die Höhe ca. 23 m. Die erste Brücke wurde 1889 eingeweiht. Für einen zweigleisigen Ausbau der Bahnstrecke ist 1907 ein zweites Viadukt in gleicher Bauweise westlich angebaut worden. Als Baustoff kam der örtlich anste hende Kalkstein zur Anwendung (Bild 1).

Die beiden nördlichen Pfeiler sowie die Bögen 3, 2 und 1 sind zum Ende des Zweiten Weltkrieges zerstört worden. Um den Bahnverkehr nach Kriegsende wieder zu ermöglichen, wurden die fehlenden Bauteile durch US-amerikanische Pioniere durch eine Stahlkonstruktion ersetzt.

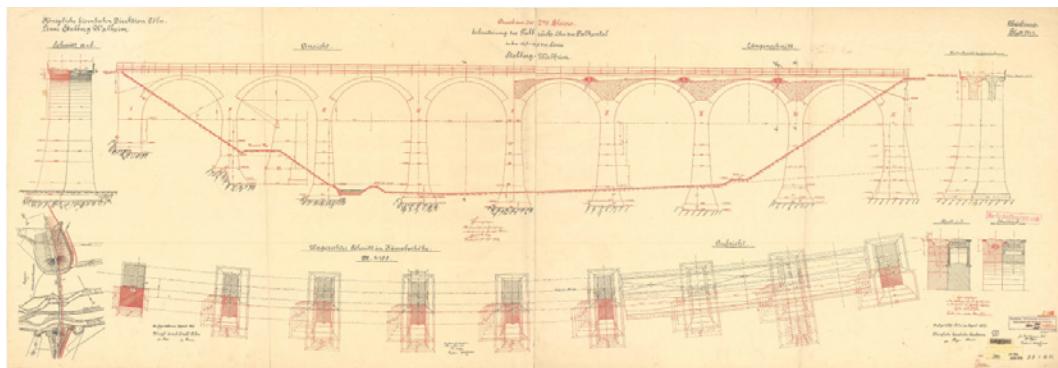


Bild 1 Plan der Westbrücke (M1:100) für das zweite Gleis 1907 [Quelle Auftraggeber Bild: 1907\_Längenschnitt\_farbig]

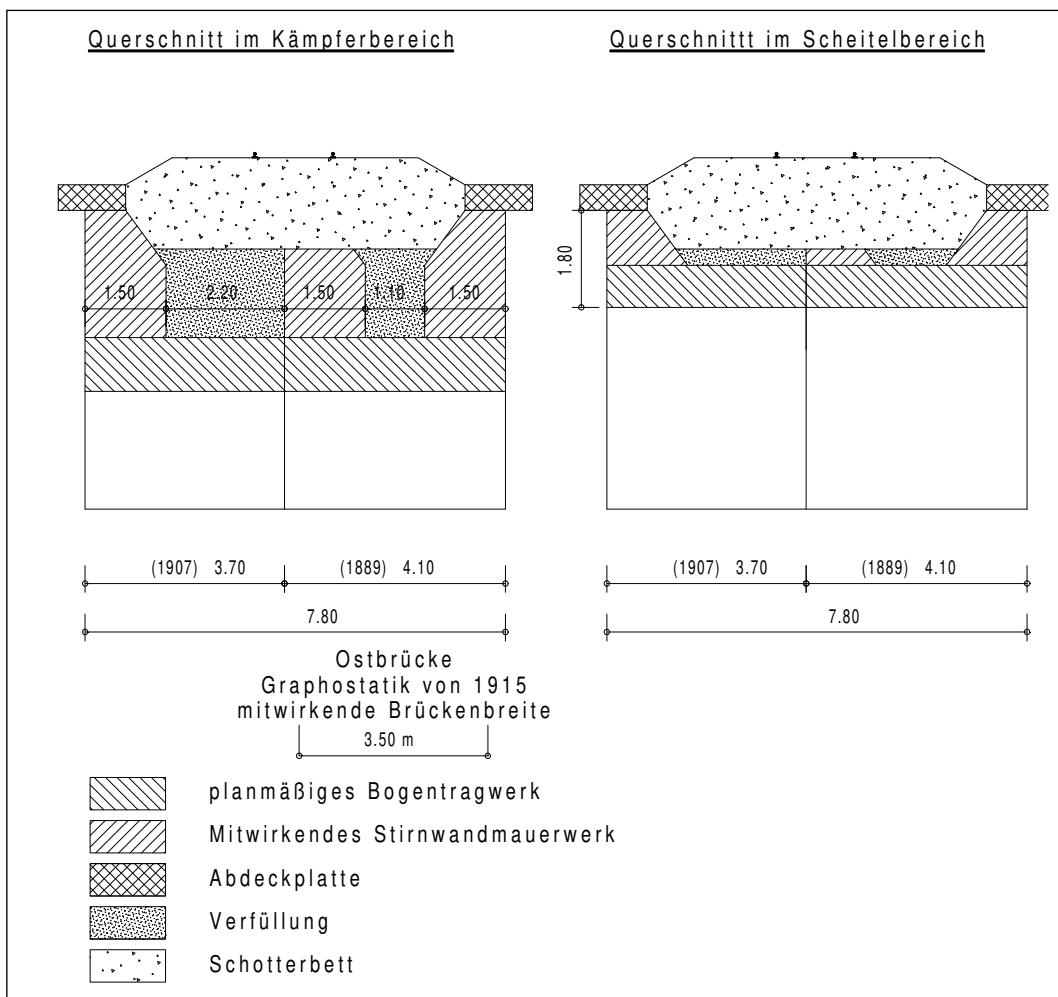


Bild 2 Umsetzung der Angaben zur Querschnittsgeometrie in der Planung von 1907 in eine CAD-Zeichnung.  
Schotterbett und Gleis entsprechen der jetzigen Situation

Vom Erstlingsbau liegen keine bautechnischen Unterlagen vor. Die vorhandenen Ausführungszeichnungen erfassen die Erweiterung von 1907. Im Jahr 1915 wurde eine Graphostatik aufgestellt, vermutlich um nachzuweisen, dass eine höhere Belastung der Brücke als ursprünglich angenommen möglich ist.

Die Bogengeometrie ist ein Halbkreisbogen mit einem Radius von 7,5 m. Das statisch wirksame Bogentragwerk ist ein Bogensegment mit einer lichten Spannweite von 13 m und einem lichten Stich von 3,75 m (Bild 3).

In der vorhandenen Systemgeometrie wurden Formabweichungen gegenüber der planmäßigen Ausgangslage von 1907 im Bereich von  $\pm 3\%$  festgestellt. Weder das Ablassen der Lehrgerüste noch die Nutzung und auch nicht die Kriegseinwirkungen haben demnach zu bleibenden und feststellbaren Formänderungen geführt. Es handelt sich hierbei um normale Imperfektionen bei der Ausführung.

## Das Bogenmauerwerk

Das Bogenmauerwerk besteht aus mehrlagigem Quadermauerwerk aus Kalkstein mit einer vom Scheitel zum Kämpfer von 0,8 m auf 1,4 m zunehmenden Bogendicke (Bild 3). Der Begriff des mehrlagigen Bogenmauerwerks ist dem Regelwerk von M 2010 805.0203:1997 [102] der DB entnommen. Er beschreibt anschaulich, dass hier mehrere Lagen an Mauerwerksbögen übereinander

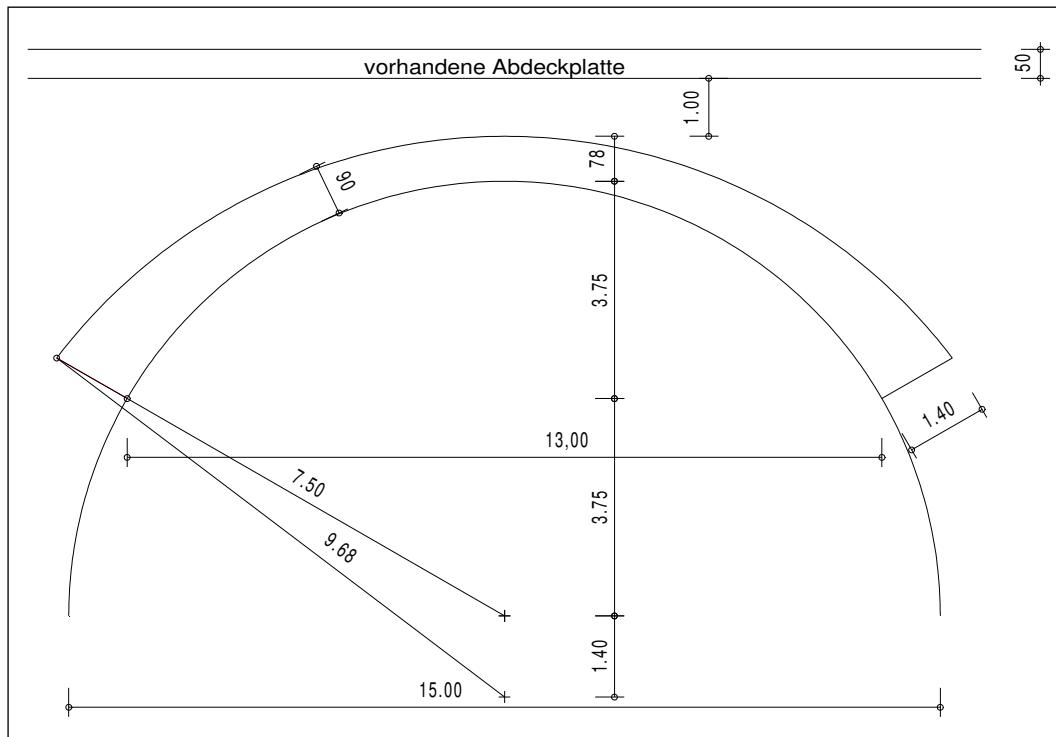


Bild 3 Umsetzung der Angaben zur Bogengeometrie in der Planung von 1907 in eine CAD-Zeichnung

angeordnet sind. Die Fuge zwischen diesen Lagen ist jedoch im statischen Sinn nicht die Lagerfuge, sondern die Stoßfuge. Die Lagerfuge im statischen Sinn sind hingegen die radial angeordneten Fugen (Bild 4). Die zulässige Druckspannung wurde auf der Grundlage der Materialprüfungsergebnisse mit  $1,4 \text{ N/mm}^2$  ange setzt (DIN 1053-1:1996-11, Tabelle 14, Bruchsteinmauerwerk Gütek lasse N1, Mörtelgruppe 3). Die zulässige Spannung entspricht der bauzeitlichen Ausnutzung. Auf der Grundlage der Kartierung von Patitz [205] wurde die Störung der Kraftübertragung in den Stoßfugen auf maximal 50 % der Kontaktfläche abgeschätzt.

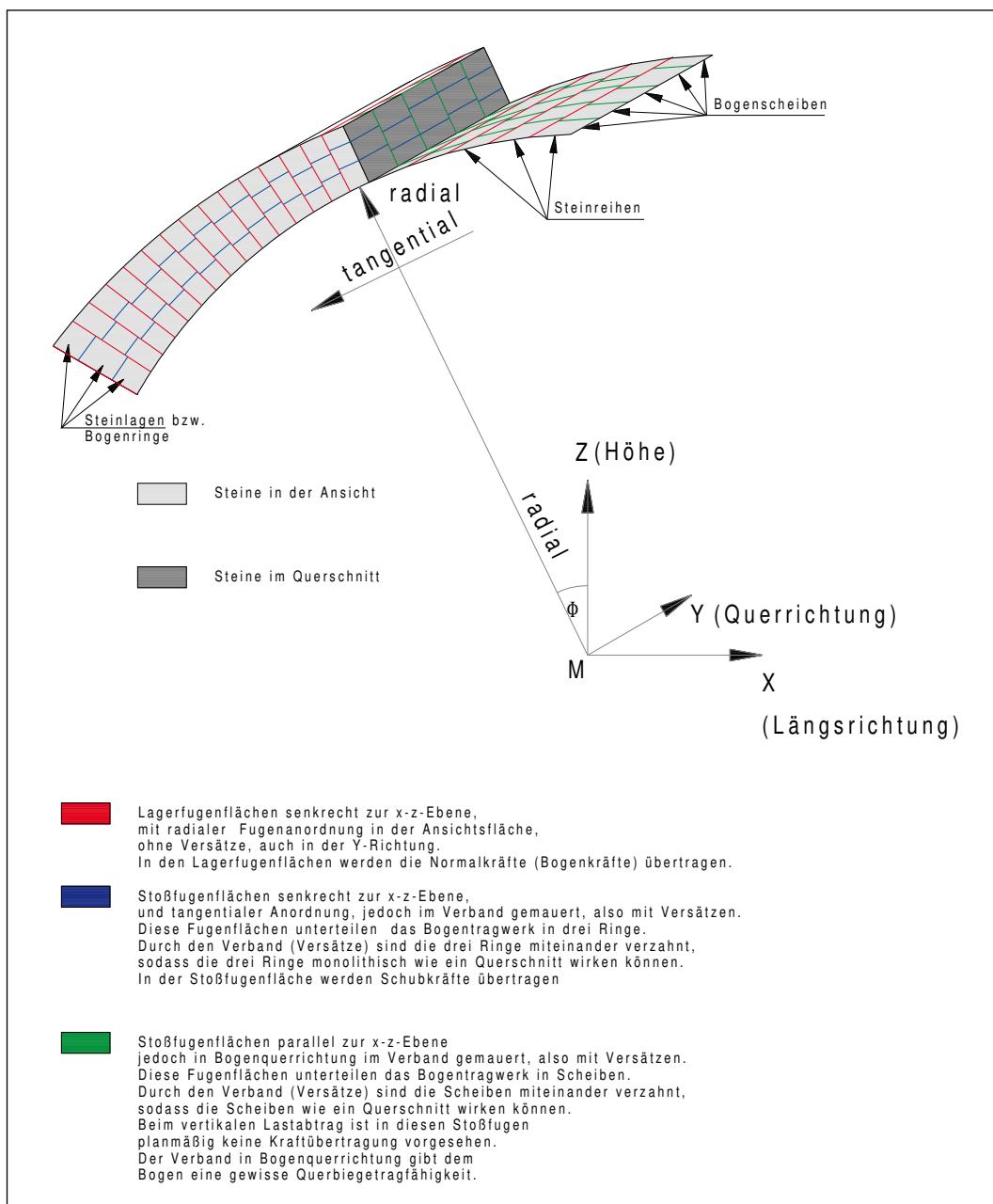


Bild 4 Fugenmodell für das mehrlagige Bogenmauerwerk

## Informationen aus der Bestandsstatik

Die Graphostatik des Bestandes ist aus dem Jahr 1915, also nicht ganz aus der Bauzeit der beiden Brücken. Anlass für diese Statik war vermutlich der Erste Weltkrieg. Es wird davon ausgegangen, dass nachgewiesen werden musste, dass die Brücke für die Versorgung der Westfront höhere Belastungen aufnehmen kann, als ursprünglich vorgesehen. Die Statik wurde für die ältere Ostbrücke aufgestellt, die aufgrund ihrer Bauweise eine geringere Tragfähigkeit aufweisen muss. Im Unterschied zur jüngeren Westbrücke sind bei der Ostbrücke über den Pfeilern und dem ersten Bogenviertel sogenannte Sparbögen (Entlastungsbögen) angeordnet worden. Daher ist die Ostbrücke leichter als die Westbrücke und kann deshalb auch nur geringere Verkehrslasten aufnehmen als die Westbrücke. Die Tragfähigkeit der Ostbrücke wurde für einen sogenannten Lastenzug B überprüft, der halbseitig auf der Brücke angeordnet wurde.

Als Randbedingungen hat der damalige Konstrukteur bei der Formfindung der Stützlinie (Bild 5) am linken Kämpfer eine Exzentrizität von  $d/12$ , am Scheitel keine Exzentrizität und am rechten Kämpfer eine Exzentrizität von  $d/6$  angenommen. Mit diesen drei festgelegten Punkten gelang es ihm, eine Form für die Stützlinie zu finden, bei der die maximale Exzentrizität im Bereich des Viertelpunktes nicht über 15 cm liegt und damit bei einer Bogendicke von 90 cm der Grenzwert von  $d/6$  für die sogenannte erste Kernweite nicht überschritten wird. Mit der so konstruierten Stützlinie wurde der Nachweis erbracht, dass der Bogen unter den angesetzten Lasten an jeder Stelle immer überdrückt ist und sich an keiner Stelle eine klaffende Fuge einstellt. Da der Bogen mit einer zum Kämpfer zunehmenden Dicke ausgestattet ist, liegt die Stelle mit der größten in der Graphostatik ermit-

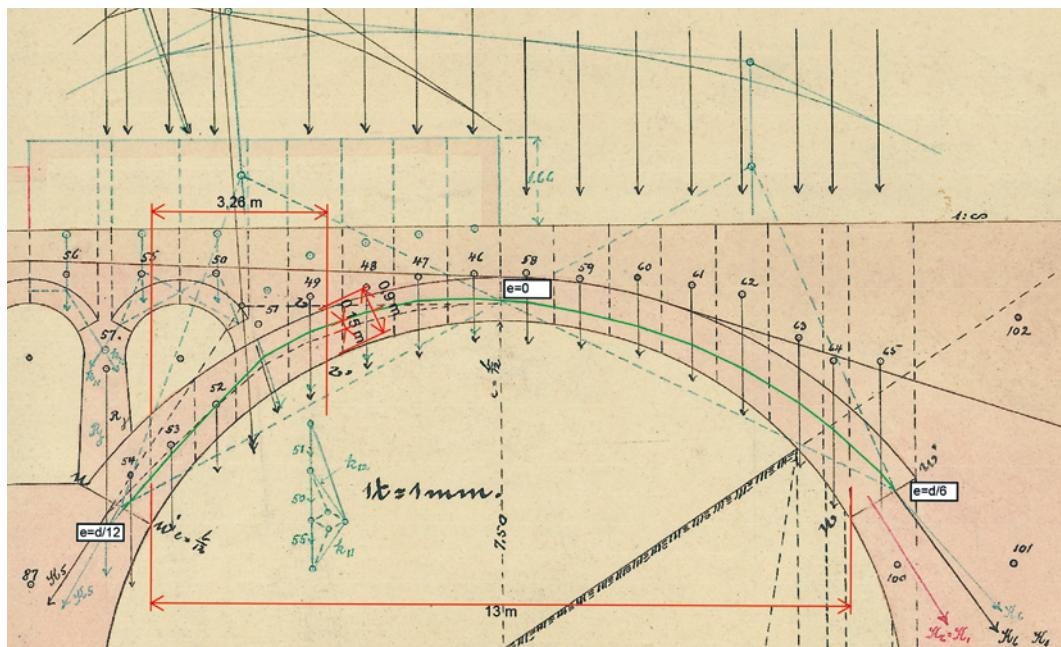


Bild 5 Stützlinienkonstruktion in der Graphostatik von 1915 für das einseitig belastete Gewölbe in grün nachgezeichnet [Quelle: Auftraggeber Bild: 1915\_1\_Cremona.pdf]

telten Spannung von  $1,356 \text{ N/mm}^2$  im Bereich des sogenannten Viertelpunktes und nicht an der Stelle der größten Bogenkraft, dem Kämpfer.

## Vergleich der alten mit der neuen Belastung

Die Statik von 1915 ging von zwei unabhängig wirkenden Brücken mit jeweils einem Gleis aus. In der Graphostatik von 1915 wurde eine Verkehrslast von  $127,75 \text{ kN/m}$  und eine mitwirkende Brückenbreite von  $3,5 \text{ m}$  angesetzt. Die geplante zukünftige Nutzung geht von einem eingleisigen Betrieb aus, wobei das Gleis in der Mitte der beiden Brücken angeordnet wird. Die Verkehrslast (Lastbild UIC 71) [103] von  $160,0 \text{ kN/m}$  [102] kann daher von zwei gemeinsam wirkenden Brücken mit einer Gesamtbreite von  $7,8 \text{ m}$  aufgenommen werden. Der reine Lastvergleich lieferte einen Ausnutzungsgrad durch die geplante Nutzung von 56 % gegenüber des Standsicherheitsnachweises von 1915. Das Verhältnis der halbseitigen Verkehrslast zur ständigen Last als gleichförmige Linienlast hat sich von 39 % auf 22 % verändert (Bild 6). Schwingbeiwerte blieben nach [102] unberücksichtigt.

## Berechnungen an einem parabelförmigen Ersatzbogen

Parabelförmige Ersatzsysteme in Form von Dreigelenkbögen oder Hängeseilen reduzieren die Komplexität von gemauerten Bogentragwerken und sind daher hilfreich für eine qualitative und quantitative Annäherung an das nichtlineare Tragverhalten von Mauerwerksbögen. Die Beanspruchung im Bogen aus einer

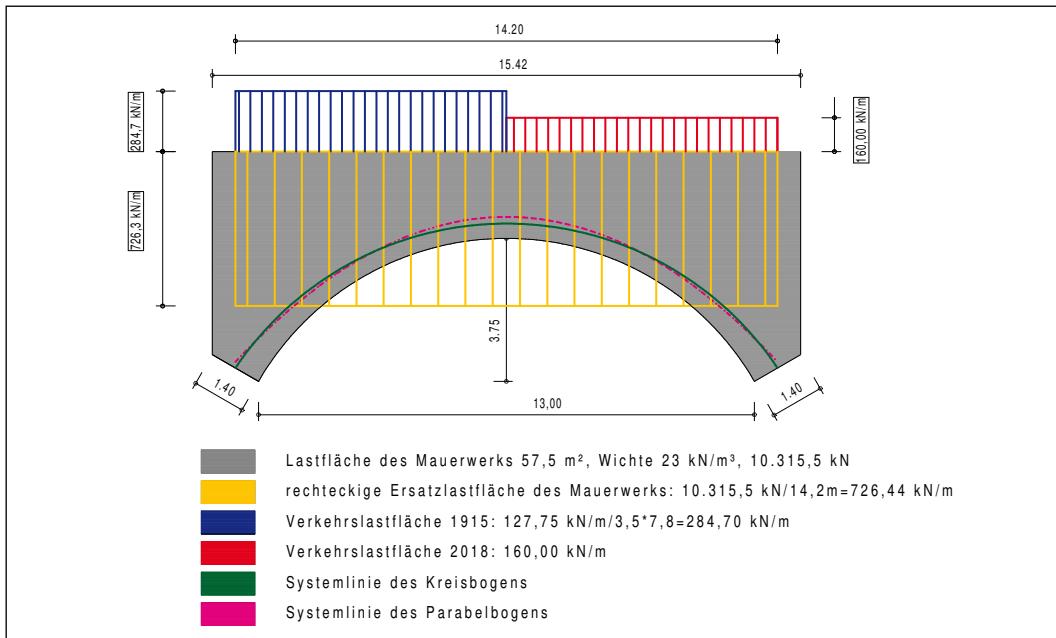
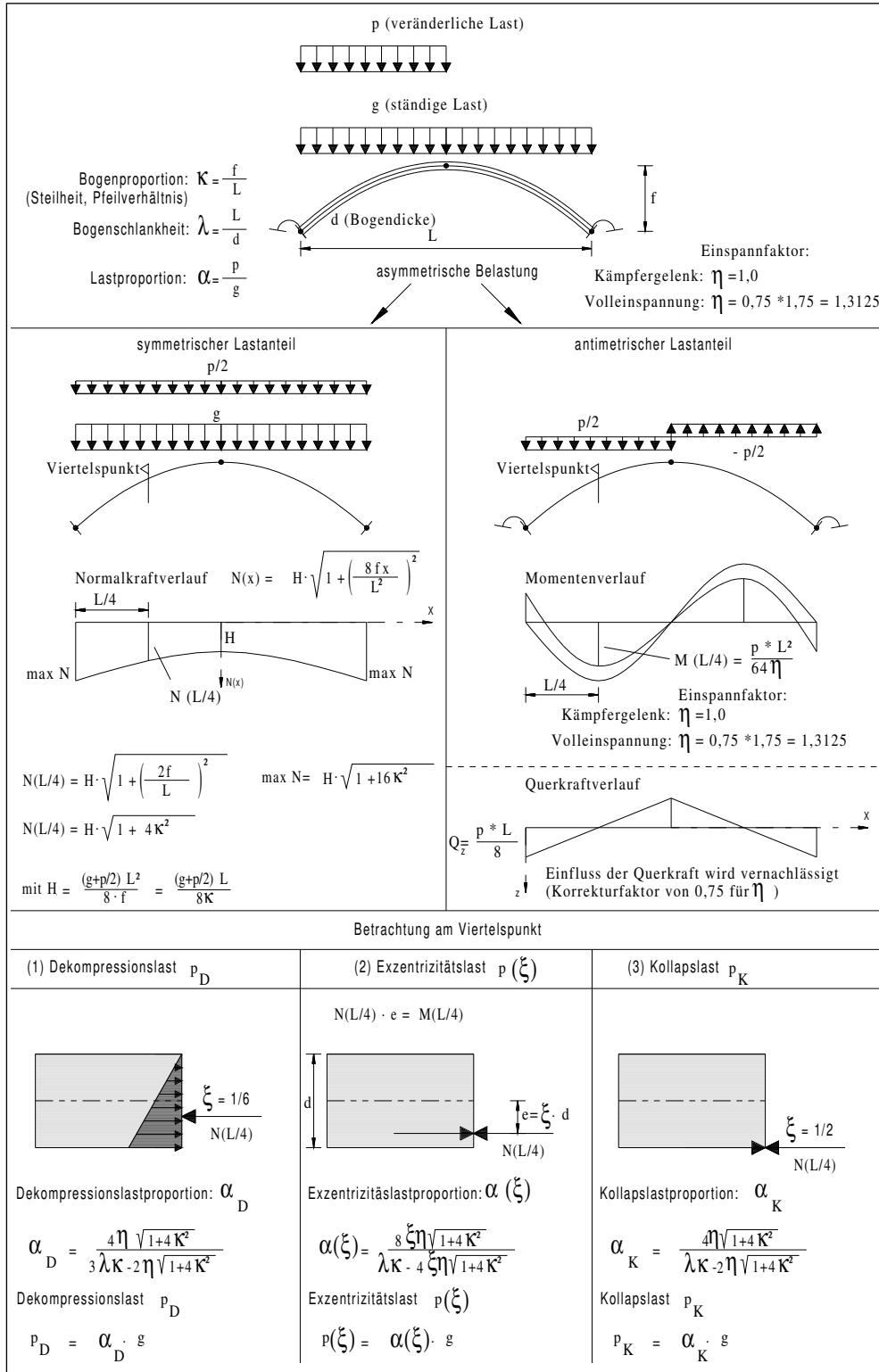


Bild 6 Maßstäbliche Darstellung der Bogenbelastung

einseitig gleichmäßig verteilten Last kann durch die Aufteilung der Belastung in einen symmetrischen und einen antimetrischen Lastanteil [201, 202] ermittelt werden (Bild 7).



**Bild 7** Mechanisches Modell des parabelförmigen Dreigelenkbogens für eine gleichmäßig verteilt ständige Last und eine einseitig gleichmäßig verteilt Verkehrslast

Die überschlägige statische Berechnung an einem Parabelbogen unter Ansatz der alten Verkehrslast bestätigt näherungsweise das damalige Ergebnis der Graphostatik. Die bauzeitliche Statik ist daher eine geeignete Bezugsgröße zur Bewertung der gegenwärtigen Standsicherheit. Unter der neuen Verkehrslast liegt die Exzentrizität mit 5–8 cm weit unter der ersten Kernweite von 15 cm, die maximale Fugenpressung beträgt ca. 1,00 N/mm<sup>2</sup>.

## Die besondere Problematik der Ringseparation

Aufgrund der Radaruntersuchung und der Ausbildung des Stirnmauerwerks des Bogens konnte davon ausgegangen werden, dass das mehrlagige Mauerwerk der Bogenleibung größtenteils verzahnt ausgebildet wurde. Es gab jedoch Flächen im Mauerwerk, in den Ergebnisbildern des Radars (Kartierungen von Patitz [205]) gelb markiert, an denen die Kraftübertragung in der Fuge beeinträchtig war, sei es durch Hohlräume und fehlenden Mörtel in der Stoßfuge oder auch durch fehlende Verzahnung. Konservativ betrachtet war hier eine lokale Klaffung in der Stoßfuge anzunehmen und damit der Verdacht auf eine lokale Ringseparation gegeben. Dabei wurde die Interpretation der Radarmessung durch die Kalibrierungsbohrungen mit Videoendoskopie bestätigt. Aufgrund dieses Befundes bestand die Notwendigkeit, das Risiko einer Ringseparation zu bewerten, die sich aus einer Verschiebung der Steine senkrecht zur ringförmigen Stoßfuge (Klaffung) oder Verschiebung in der ringförmigen Stoßfuge (Versatz) zusammensetzen kann.

Ein mehrlagiges Bogenmauerwerk mit Ringseparation hat ein vollkommen anderes Tragverhalten als ein mehrlagiges Bogenmauerwerk ohne Ringseparation. Solange sich keine Ringseparation eingestellt hat, verhält sich ein mehrlagiges Mauerwerk wie ein einlagiges Mauerwerk und die radial übereinander angeordneten Keilsteine wirken monolithisch.

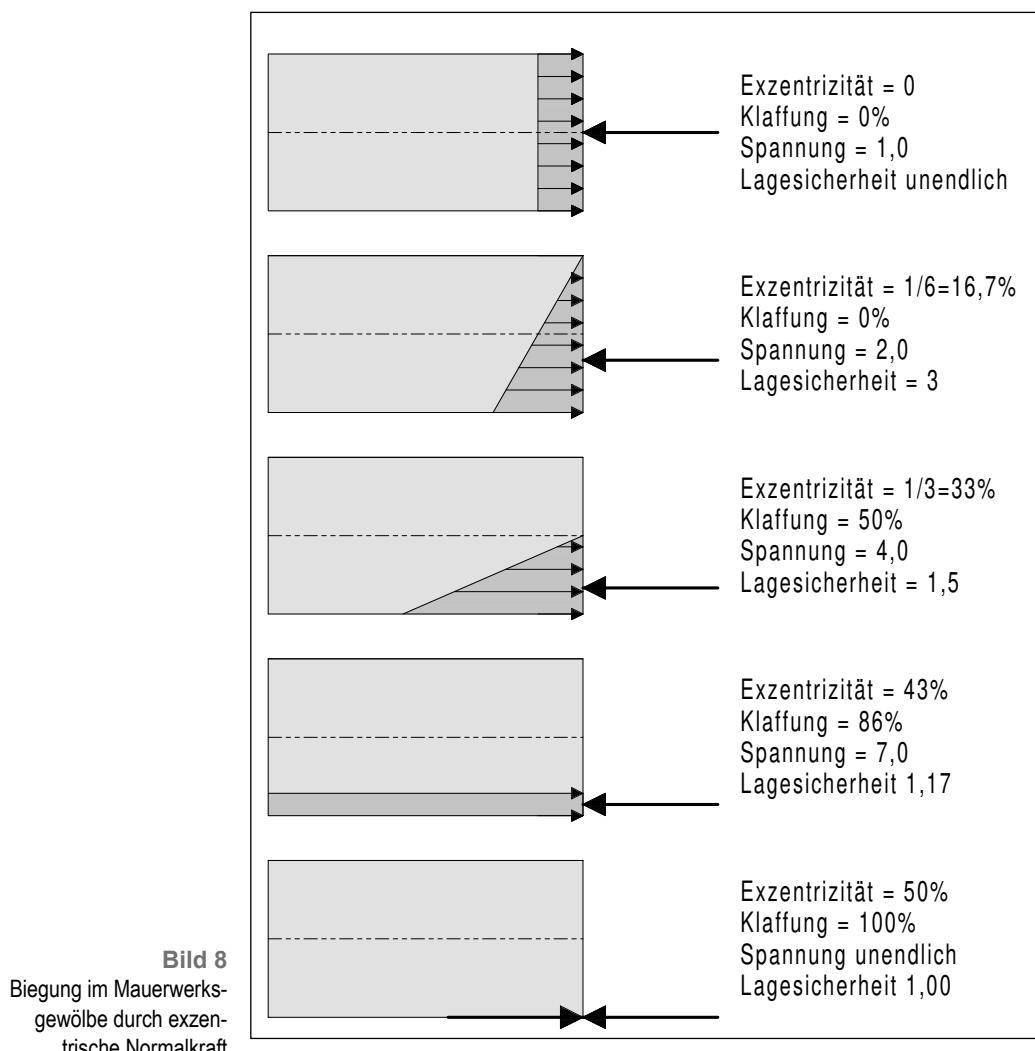
Sobald sich die Ringe vollständig separieren, wirkt jeder Ring wie ein getrennter Bogen. Da sich sowohl die stabilisierende Bogenkraft als auch das destabilisierende Biegemoment gleichmäßig auf alle Ringe verteilen, verändert sich das Verhältnis zwischen Moment und Normalkraft nicht. Da die Bogendicke jedes Rings proportional mit der Anzahl der Ringe fällt, fällt auch die Tragfähigkeit eines mehrlagigen Bogens mit vollständiger Ringseparation proportional mit der Anzahl der Ringe ab im Vergleich zu einem mehrlagigen Bogen ohne Ringseparation.

In der Richtlinie M 805.0203,1997 (2008) [101] wurde ab einem dreilagigen Bogenmauerwerk die Klaffung unter 0,5 fachem Lastbild UIC 71 auf die Schichtdicke der untersten Lage begrenzt. Damit sollte eine Lockerung von Steinen in der untersten Reihe vermieden werden. In der aktuellen Ausgabe der Richtlinien von 2010 [102] ist diese Regel nicht mehr enthalten. Darüber hinaus gibt es in den Vorschriften der DB keine weiteren Hinweise zur Problematik der Ringseparation.

## Qualitative Bewertung des Risikos einer Ringseparation

Bogentragwerke gehören zur Gattung der vorgespannten Tragwerke. Sie weisen daher eine ähnliche Mechanik auf wie abgespannte Türme oder vorgespannte Stahlbetonbrücken. Durch die Vorspannung werden Tragwerke, die eigentlich nur in eine Richtung Kräfte aufnehmen können, in die Lage versetzt, Kräfte in entgegengesetzte Richtungen aufnehmen zu können. Mit Zug vorgespannte Seile können daher Druck aufnehmen und mit Druck vorgespanntes Mauerwerk kann daher Zug aufnehmen.

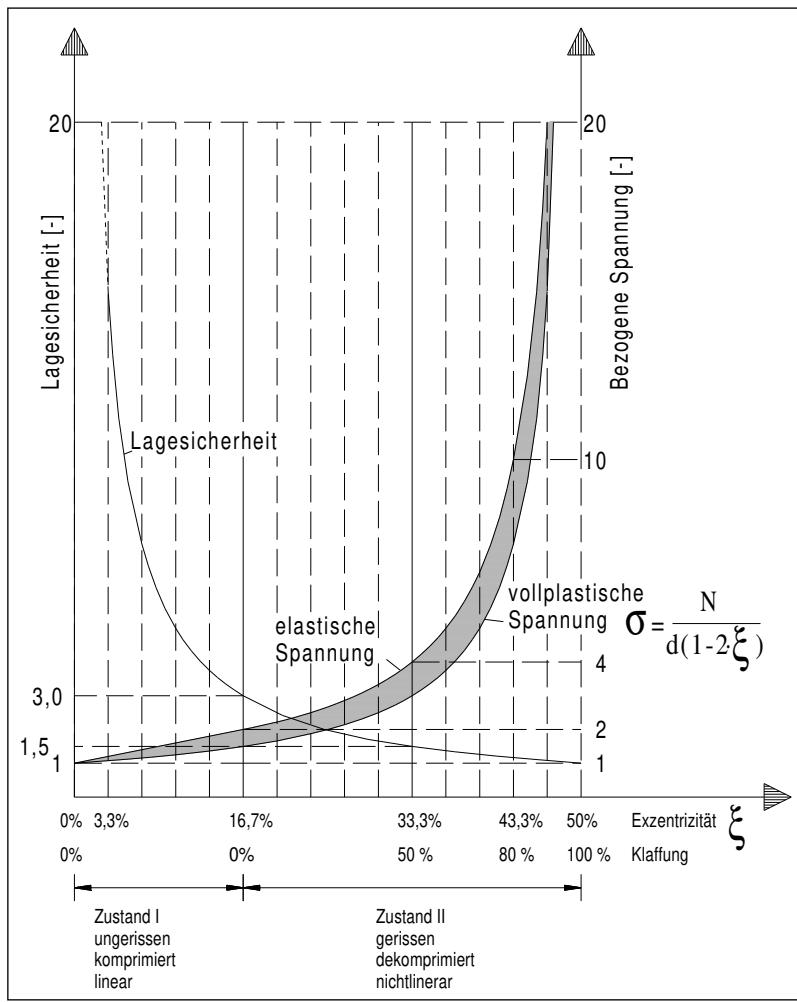
Die Vorspannung wirkt unter äußeren Lasten in dieser Art und Weise immer nur bis zu einer gewissen Grenze, der sogenannten Dekompressionslast. Die Dekompressionslast hebt die Wirkung der Vorspannung auf, sodass Seile erschlaffen oder Mauerwerk nicht mehr überdrückt ist. Sobald die Dekompressionslast erreicht ist, verändert sich das Verhalten der Tragwerke, indem die Steifigkeit abfällt und sich das statische System verändert. Sobald die dekomprimierende Einwirkung nicht mehr besteht, fällt das Tragwerk in seinen Ausgangszustand



zurück. Das Tragwerk verändert also seine Gliederung und kann daher nicht durch ein unveränderliches statisches System zutreffend abgebildet werden.

Wie bei allen vorgespannten Tragwerken gibt es auch bei Mauerwerksbögen zwei vollkommen unterschiedliche Tragwerkszustände: Zustand I mit Beanspruchungen unterhalb der Dekompressionslast (Querschnitt überdrückt und nicht gerissen) und Zustand II mit Beanspruchungen oberhalb der Dekompressionslast (Querschnitt nicht mehr überdrückt, daher gerissen) (Bilder 8 und 9).

Solange in einem mehrlagigen Bogen die Lagerfugen immer überdrückt sind, sind auch immer die Stoßfugen überdrückt. Das ist von besonderer Bedeutung für die erforderliche Kraftübertragung in den Stoßfugen. Damit nämlich ein mehrlagiges Bogenmauerwerk im Querschnitt im Verbund wirken kann, muss in der Stoßfuge eine Schubkraft übertragen werden. Dadurch wird die gegenseitige Verschiebung der Mauerwerkslagen behindert. Diese Schubkraft kann entweder durch Klebung, Reibung oder Verzahnung übertragen werden. Von baupraktischer Bedeutung ist nur Reibung und Verzahnung. Die Reibung und Verzahnung benötigen zur Schubkraftübertragung immer eine Querpressung.



**Bild 9**  
Fugenspannung in Abhängigkeit von der Klaffung

Die Berechnungen an einem einlagigen parabelförmigen Ersatzbogen haben ergeben, dass im vorliegenden Fall die zukünftige Verkehrslast immer weit unterhalb der Dekompressionslast liegen wird und daher die Möglichkeit einer Querpressung gegeben ist, um eine Schubkraft durch Reibung zu übertragen. Ob diese Schubkraftübertragung jedoch ausreichend ist, um den für die erforderliche Standsicherheit benötigten Verbund zu gewährleisten, ist ohne eine genauere Untersuchung nicht bewertbar.

## Quantitative Bewertung des Risikos einer Ringseparation

Um diese Frage beantworten zu können, wurde mit dem Programm RING [203, 204, 301] eine numerische Untersuchung an drei unterschiedlichen Modellen (Bild 11) mit jeweils unterschiedlichen Berechnungsparametern für die Mauerwerksfestigkeit, den Reibbeiwert und die Gleitsicherheit (Bild 10) durchgeführt.

Innerhalb der Modelle wurden die Festigkeit (zulässige Spannung) und der Reibbeiwert variiert. Ein Reibbeiwert von 1,0 entspricht einer Verzahnung. Ein Reibbeiwert von 0,6 entspricht einer Lagerfuge mit optimaler Reibung, ein Reibbeiwert von 0,3 entspricht einer Lagerfuge mit 50 %-igen Kontaktausfall.

Als Berechnungsergebnis liefert das Programm RING auf der Grundlage der Starrkörpermechanik die Verformungsfigur beim Versagen (Bild 12), den Verlauf der Stützlinien, der Normalkraft und der Biegung und das Verhältnis der eingegebenen Last zur aufnehmbaren Last, den  $\beta_{uic}$ -Wert. Die Modellparameter und die Berechnungsergebnisse für  $\beta_{uic}$  sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Von besonderem Interesse war die Betrachtung der Kombinationen Nr. 22\_2 (zul  $\sigma = 1,4 \text{ N/mm}^2$ ,  $\mu = 0,6$ ) mit  $\beta_{uic} = 1,8$  und Nr 23\_3 (zul  $\sigma = 1,0 \text{ N/mm}^2$ ,  $\mu = 0,3$ ) mit  $\beta_{uic} = 1,0$ .

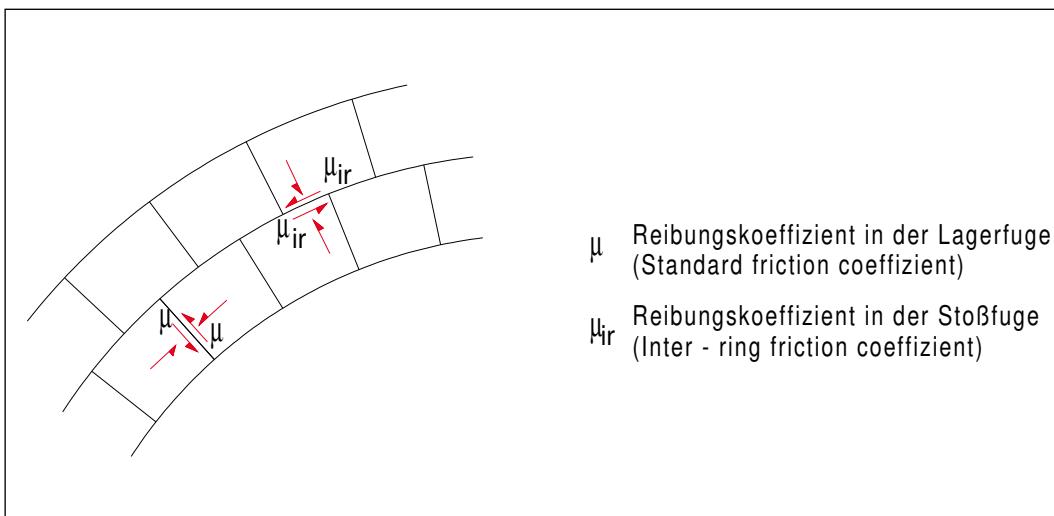


Bild 10 Mechanisches Modell im Programm RING für die Schubkraftübertragung durch Reibung in den Fugen

Im Fall Nr. 23\_3 war nämlich bei einem 50 %-igen Kontaktausfall (Reibbeiwert von 0,3) selbst bei einer ungünstigen Mauerwerksfestigkeit von  $1,0 \text{ N/mm}^2$  noch keine Überschreitung der zulässigen Ausnutzung gegeben. Und im Fall Nr. 22\_2, mit einer zulässigen Pressung gemäß der Materialprüfung von  $1,4 \text{ N/mm}^2$ , konnte der Bogen noch fast doppelt so viel Last aufnehmen wie angesetzt, was wiederum einen Kontaktflächenverlust von 50 % erlauben würde.

Es gelang also, mit zwei unterschiedlichen Modellen für eine gestörte Kraftübertragung in den Mauerwerksfugen eine ausreichende Sicherheit nachzuweisen. Daher konnte der Bedarf zusätzliche Maßnahmen wie z. B. eine Injektage der Hohlräume ausgeschlossen werden.

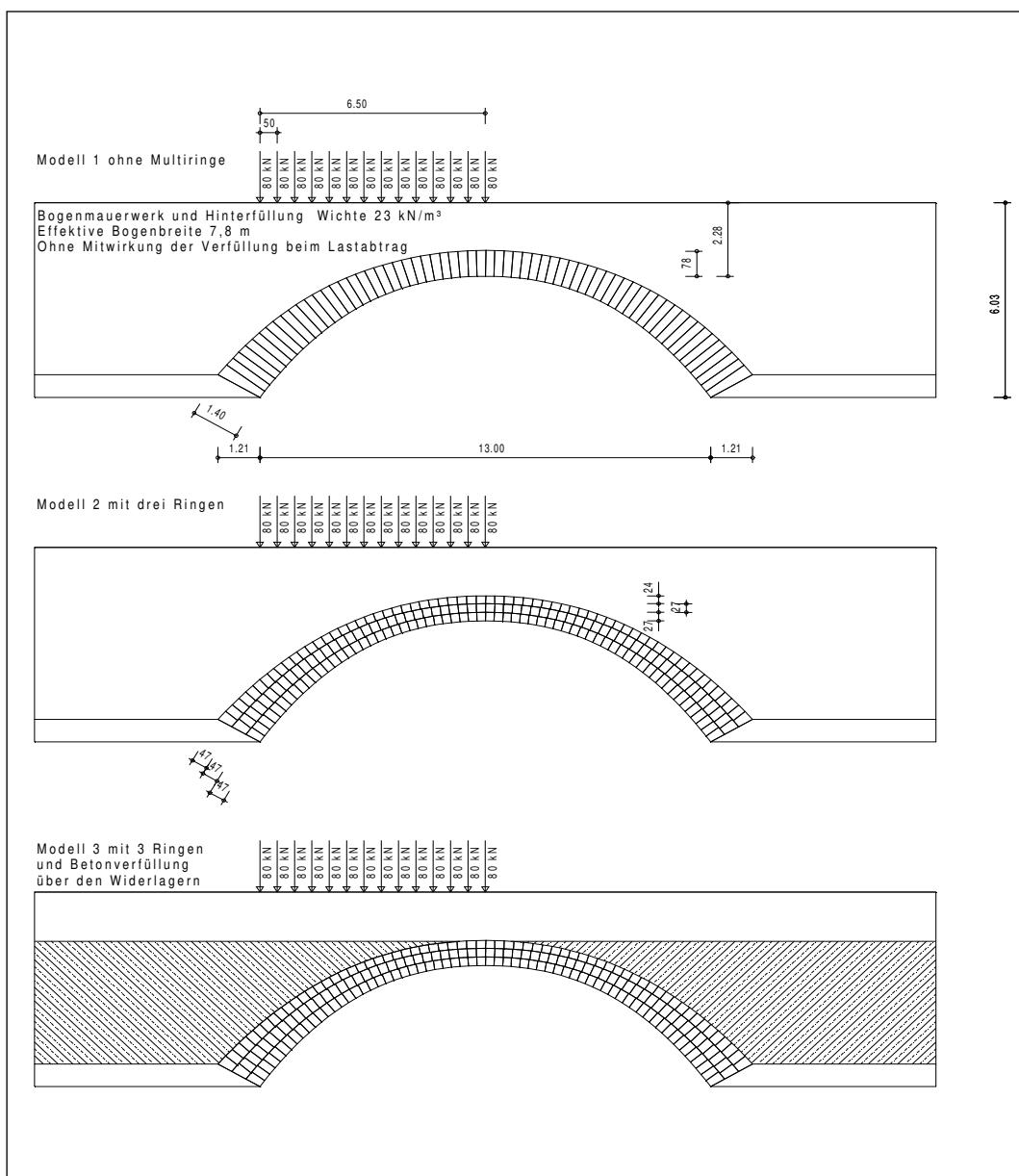
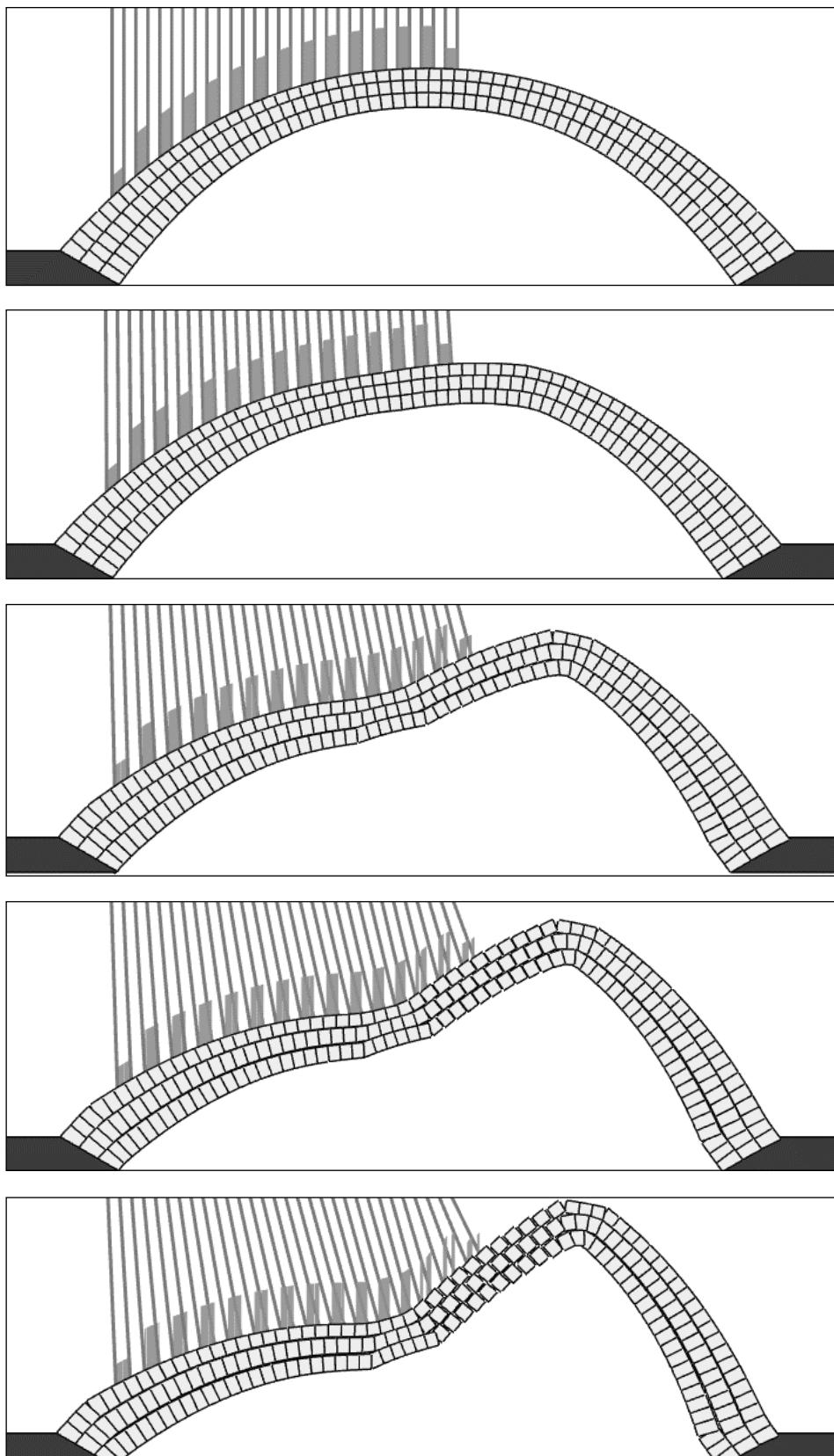


Bild 11 Untersuchung des Risikos der Ringseparation mit dem Programm RING an drei unterschiedlichen Mauerwerksmodellen, jeweils unter einer einseitig gleichmäßig verteilten Verkehrslast



**Bild 12** Verformungsmodell der Ringseparation im Programm RING mit zunehmender Überhöhung  
(Modell 2 mit drei Ringen)

**Tabelle 1** Untersuchung des Risikos der Ringseparation mit dem Programm RING von LimitState

Modell 1 – ohne Multiringe						
Modell-Nr	Zulässige Spannung	Reibbeiwert	Gleitsicherheit	$\beta_{uic}$	$\alpha = p/g$	Ausnutzung
11	$\infty$	–	–	35,90	7,91	3 %
12	1,40			3,84	0,85	26 %
13	1,00			2,25	0,50	44 %
14	0,75			1,00	0,22	100 %

Modell 2 – mit drei Ringen							
Modell-Nr	Zulässige Spannung	Reibbeiwert	Gleitsicherheit	$\beta_{uic}$	$\alpha = p/g$	Ausnutzung	
21	$\infty$	1,40	1	10,30	2,27	10 %	
22_1	1,40		1	2,20	0,48	45 %	
22_2			0,6	1,80	0,40	56 %	
22_3			0,3	1,50	0,33	67 %	
22_4			0,16	1,00	0,22	100 %	
23_1	1,00	1,00	1	1,49	0,33	67 %	
23_2			0,6	1,20	0,26	83 %	
23_3			0,3	1,00	0,22	100 %	

Modell 3 – mit drei Ringen und Betonverfüllung über den Widerlagern						
Modell-Nr	Zulässige Spannung	Reibbeiwert	Gleitsicherheit	$\beta_{uic}$	$\alpha = p/g$	Ausnutzung
32_3	1,40	0,3	1,5	4,14	0,91	24 %
33_3	1,00	0,3	1,5	2,13	0,47	47 %

maßgebende Modelle

## Zur Konstruktion des Kämpferbereichs

Im Unterschied zur älteren Ostbrücke (Bild 13) sind bei der Westbrücke (Bild 14) über dem Kämpfer und dem ersten Bogenviertel keine Sparbögen (Entlastungsbögen) angeordnet. Bei der Errichtung der Westbrücke wurden diese Bögen der Ostbrücke vermutlich zugemauert. Unter jedem der Sparbögen befindet sich jedoch ein Hohlräum. Aufgrund dieser Hohlräume sind die Bogenenden der Ostbrücke im Unterschied zur Westbrücke nicht eingezwängt. Mit dem Programm RING wurde jedoch für die eingezwängte Ausführung, wie sie die Westbrücke



**Bild 13** Auflagernaher Bereich der Ostbrücke (1889) mit Spargewölben [Messbildstelle Dresden]



**Bild 14** Auflagernaher Bereich der Westbrücke (1907) ohne Spargewölbe [Messbildstelle Dresden]

aufweist, eine fast doppelt so hohe Tragfähigkeit ermittelt (Tabelle 1, Modell 3). Um bei beiden Brücken eine vergleichbare Situation zu erreichen, wäre daher eine kraftschlüssige Verfüllung dieser Hohlräume unter den Sparbögen der Ostbrücke erforderlich.

## Zur Konstruktion des Scheitelbereichs

Unabhängig vom Lastabtrag in Längsrichtung muss jedoch dafür gesorgt werden, dass bei einer in der Mitte des Bogenquerschnitts angreifenden Einwirkung der gesamte Bogenquerschnitt mit 7,8 m Breite als Widerstand aktiviert wird.

Das Bogenmauerwerk einschließlich der Verfüllung ist jedoch nicht in der Lage, diese Querverteilung der Last an allen Stellen der Brücke zu bewerkstelligen, insbesondere nicht im sensiblen Bereich des Scheitels. Diese Querverteilung der Last muss daher von der im Entwurf sowieso vorgesehenen Fahrbahnwanne aus Stahlbeton geleistet werden. Die Fahrbahnwanne hat jedoch nicht nur eine Quertragfunktion, sondern auch eine Längstragfunktion, um die Achslasten als eine flächige Bogenbelastung abzutragen.

Die Fahrbahnwanne sollte jedoch so breit ausgebildet werden, dass sie auch auf den Stirnwänden aufliegt (Bild 15), um auch diese am Lastabtrag zu beteiligen. Nur so kann dafür Sorge getragen werden, dass sich bei der zukünftig vorgesehenen eingleisigen Belastung keine Verformungsunterschiede in Querrichtung einstellen.

## Bewertung der Standsicherheit

Trotz der besonderen Aufgabenstellung, das Risiko der Ringseparation zu bewerten, konnte mit dem Modell des Parabelbogens, dem Starrkörpermodell des Programms RING und ingeniermäßigen Betrachtungen eine belastbare Bewertung der Standsicherheit mit einem überschaubaren Aufwand vorgenommen werden.

Die Untersuchung zum Tragverhalten des Falkenbach-Viadukts entspricht einer Bewertung der Tragsicherheit in Bewertungsstufe 1 und 2 nach der Richtlinie M 805.0001,2008 der Deutschen Bundesbahn [101].

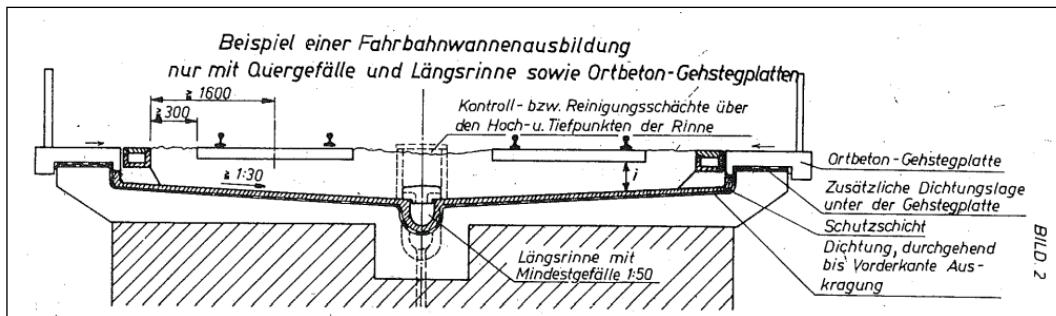


Bild 15 Beispiel einer Fahrbahnwannenausbildung [104]

Aufgrund der als Erstes durchgeföhrten generalisierenden ingenieurmäßigen Betrachtungen stand zunächst die Notwendigkeit einer Injektion der vorgefönden Hohlräume außer Frage. Die näheren Untersuchungen kamen jedoch zu dem erfreulichen Ergebnis, dass eine Injektion nicht erforderlich ist und dass die Mauerwerksbrücke nach einer üblichen Fugeninstandsetzung, verbunden mit einer Modernisierung des Überbaus, in Zukunft die Funktion einer Eisenbahnbrücke wieder erfüllen kann.

Auch wenn der noch verbleibende Aufwand für eine Fugeninstandsetzung im ersten Augenblick sehr groß erscheinen mag, so muss man sich jedoch der Nutzungszeiträume bewusst werden, die damit verbunden sind. Mehr als hundert Jahre hat das Bauwerk hinter sich und es spricht alles dafür, dass es noch weitere Jahrhunderte seine Funktion erfüllen kann. Wenn man dazu bedenkt, dass der Aufwand der Neuverfügung nur deshalb erforderlich wird, weil sowohl bauzeitlich als auch bei einer schon einmal durchgeföhrten Instandsetzung nicht fachgerecht gearbeitet wurde, relativiert sich der Aufwand doch erheblich.

Bauwerkserhalt und Funktionserhalt bedingen sich gegenseitig. Nicht Abreißen ist immer eine Option. Das zu prüfen und den Bauwerkserhalt ernsthaft in Erwägung zu ziehen ist eine soziokulturelle, ökologische und ökonomische Pflichtaufgabe der Betreiber.

## Regelwerke

- [101] Ril 805, Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken, 2008
- [102] Ril 805, Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken, 2010
- [103] Ril 804, Eisenbahnbrücken planen, bauen und instand halten, 2013
- [104] Richtlinie f. Fahrbahnwannen auf Gewölbebrücken d. Deutschen Reichsbahn von 1979
- [105] DIN 1053 Teil 1: 1996-11, Mauerwerk, Berechnung und Ausführung

## Literatur

- [201] Kurrer, Karl Eugen: Geschichte der Baustatik. Ernst & Sohn, Berlin, 2002
- [202] Herzog, Dr. Max A. M.: Kurze baupraktische Festigkeitslehre, Werner Verlag, 1996
- [203] Gilbert, M.; Melbourne, Professor C.: Rigid-block analysis of masonry structures.  
The Structural Engineer, Volume 72, no21/1, November 1994
- [204] Melbourne, Professor C.; Gilbert, M: The behaviour of multiring brickwork arch bridges. The Structural Engineer 7, Volume 73/7, February 1995
- [205] Patitz, Gabriele: Zustandserfassung unsaniertener und sanieter Brückenbauwerke mit Bauradar. In: Historische Eisenbahnbrücken, Tagungsband 2019, Verein Erhalten Historischer Bauwerke e.V., Fraunhofer IRB Verlag

## Software

- [301] RING 01 der Firma LimitState, Sheffield UK; RING Manual 3.2b 2016-11-10,  
<http://www.limitstate.com>

## Bildquellen

Falls nicht anders angegeben: Autor

Erik Meichsner

## **PRAXISBEISPIEL – EÜ TRAUN**

### **Instandsetzung einer Eisenbahnbrücke aus Nagelfluh**

Mit der Instandsetzung des rund 160 Jahre alten Eisenbahnviaduktes konnte ein Wahrzeichen Traunsteins und der Ingenieurbaukunst für die weitere Nutzung ertüchtigt werden. Mit dem neu erstellten Gleistragwerk wurden bahnbetriebliche Anforderungen umgesetzt. Die neue Abdichtung und Entwässerung ertüchtigen die Dauerhaftigkeit und beheben die Hauptschadensursache der Stein- und Fugenschäden am Natursteinmauerwerk aus Nagelfluh. Grundlage für die Planung der Instandsetzung der Mauerwerksoberfläche und des Gleistragwerkes bildeten stufenweise durchgeführte Bauwerksuntersuchungen. Durch die baubegleitend durchgeführte Fachberatung wurden die Ausführungsqualität der Mauerwerksinstandsetzung gesteuert und notwendige Ausführungsdetails festgelegt.

### **1 Geschichte des Viadukts**

Die Königlich Bayerische Staats-Eisenbahn baute die sogenannte Bayerische Maximiliansbahn als Ost-West-Verbindung zwischen Salzburg und Ulm erst vergleichsweise spät ab 1851. Auf dem 1860 eröffneten letzten Teilabschnitt Traunstein-Salzburg ist das Viadukt in Traunstein das imposanteste Bauwerk. Es wurde fünfjochig mit rustizierten Rundbogenöffnungen 1859 fertig gestellt. Die Eisenbahnbrücke ist zunächst auf trockenem Boden neben dem damaligen Flussbett gebaut worden. Nach der Errichtung der Brücke erfolgte die Umleitung des Flussbettes der Traun durch das Viadukt.

Zum Ende des Zweiten Weltkrieges wurde die Brücke zum Ziel alliierter Angriffe und entging nur knapp der Zerstörung. Nur wenige Tage später war durch eine Pioniereinheit der Wehrmacht die Beschädigung einiger Brücken in Traunstein vorgesehen. Das Viadukt war von diesen Plänen jedoch nicht betroffen.

In den 1950er Jahren wurden grundlegende Instandsetzungen der Abdichtung, Entwässerung und des Geländers durchgeführt. Mit der Herstellung neuer Stahlbetonkonsole, Geländer und durchgehender Abdichtungsebenen mit einer Schutzschicht erfolgte eine Anpassung des Bauwerkes an die damaligen Regelwerke der Bahn. Die Grenze der Dauerhaftigkeit dieser Maßnahme war jedoch spätestens in den 1990er Jahren erreicht. Bei den regelmäßigen Brückeninspektionen und Sonderinspektionen durch die DB AG konnten der Brücke aufgrund der defekten Abdichtung und Entwässerung nur schlechte Zustandsnoten gegeben werden. Die ständige Durchfeuchtung führte zur beschleunigten Verwitterung des Natursteinmauerwerkes und damit zur Einschränkung der Dauerhaftigkeit. Durch die Schäden an der Entwässerung bildeten sich Eiszapfen an den Gewölbeunterseiten, was zu erheblichen Einschränkungen der Verkehrssicherheit des am Fuß des Viaduktes parallel verlaufenden öffentlichen Steges führte. Auf Grundlage einer statischen Nachrechnung wurde die Brücke 2005 zwar als ausreichend standsicher bewertet. Aufgrund des sich verschlechternden Erhaltungszustandes und um einer Gefährdung der Standsicherheit durch die Verwitterung des Mauerwerkes vorzubeugen, musste 2010 jedoch eine Stellungnahme zur Vorplanung mit Sanierungsmöglichkeiten erarbeitet werden.

Das Eisenbahnviadukt ist als Einzeldenkmal in der Denkmalliste des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege aufgeführt und als Wahrzeichen Traunsteins liegt die Erhaltung und fachgerechte Instandsetzung im öffentlichen Interesse (Bild 1).



Bild 1 Ansicht Eisenbahnüberführung (EÜ) Traun in Traunstein, 2012

## 2 Methodik Bauwerksuntersuchungen und Fachplanung

Bereits zu Beginn des Projektes sind mit den Verantwortlichen der DB AG und den Objektplanern auf die Planung abgestimmte stufenweise Bauwerksuntersuchungen vereinbart worden. In einer ersten Stufe wurden auf Grundlage von vorwiegend visuellen Vor-Ort-Untersuchungen qualitative Aussagen zu Schadensursachen getroffen und Empfehlungen für die Planung der Mauerwerkssanierung abgeleitet. Neben Empfehlungen für die Instandsetzungsplanung und Aussagen zum Aufwand konnte für die 2. Untersuchungsstufe ein bauwerksbezogenes Untersuchungskonzept erstellt werden. In diesem Konzept ist als Grundlage für die Planung der Mauerwerksinstandsetzung und für die Planung des Gleistragwerkes die Ermittlung der Bauwerksgeometrie, des Bauteilaufbaus und der Materialeigenschaften enthalten. Die nach Art, Lage und Umfang im Konzept/Untersuchungsplanung zusammengestellten punktuellen Untersuchungen vor Ort und im Labor an jeweils repräsentativen Konstruktionen und Zuständen wurden durch eine Schadensgrobkartierung mit Aussagen zu Schadensumfängen ergänzt (Bild 2).



**Bild 2**  
Durchführung der  
Bohrkernentnahme vom  
Hubsteiger, 2013

Mit den Bauwerksuntersuchungen der 2. Untersuchungsstufe konnten Geometrien, Materialgefüge, Materialeigenschaften und Angaben zur zulässigen Mauerwerksdruckfestigkeit als Grundlage für die Planung des Gleistragwerkes ermittelt werden. Weiterhin sind in dem Gutachten zur Mauerwerksdiagnostik auf Grundlage der ausgewerteten Untersuchungsergebnisse die Arbeitsschritte und der Ablauf zur Instandsetzung des Natursteinmauerwerks aufgeführt.

Für die Entwurfsplanung wurden aufbauend auf dem Mauerwerksgutachten die Planungen der Leistungen zur Mauerwerksinstandsetzung weiter vertieft. Der Bestand und Zustand der vorhandenen Anlagen in Bezug auf das Natursteinmauerwerk sind zusammengefasst und die Hauptschadensursachen abgeleitet worden. Bezüglich der fachtechnischen Einzelplanung wurden auf Grundlage des Zustandes zur Sicherstellung von Dauerhaftigkeit, Verkehrssicherheit und Standsicherheit die Arbeitsschritte der Natursteininstandsetzung konkretisiert und gegliedert nach diesen Arbeitsschritten eine Kostenschätzung erstellt. Die Abstimmung von Schnittstellen mit der Objektplanung war eine wichtige Grundlage zur Erstellung des koordinierten Leistungsablaufes der Mauerwerks- und Natursteininstandsetzung.

Als wesentliche Zuarbeiten zur Ausschreibung wurden detailliert Baubeschreibungen und spezielle Leistungsverzeichnisse erstellt. Bei den Baubeschreibungen mussten der vorhandene Zustand, die Instandsetzungsmaßnahmen und die technische Bearbeitung der Ausführungsplanung erläutert werden. Ein Schwerpunkt der Fachplanung für die Natursteininstandsetzung lag bei der Erstellung spezieller Leistungstexte und der entsprechenden Mengenermittlung. Die speziellen Leistungstexte mussten bauwerksspezifisch entsprechend der Gegebenheiten des Bauwerks und der Instandsetzungszeile erarbeitet werden. Die im Standartleistungskatalog verfügbaren Leistungstexte sind nicht geeignet, die erforderlichen Leistungen ausreichend zu beschreiben. Die Erfahrungen beim Bauen im Bestand haben gezeigt, dass auch bei entsprechenden Voruntersuchungen und Schadensgrobkartierungen bei Ingenieurbauwerken zum Zeitpunkt der Ausschreibung keine konkrete Instandsetzungskartierung vorliegen kann. Mengenverschiebungen und Leistungsveränderungen sind bei der Ausführung baubegleitend zu planen. Zur Steuerung und Dokumentation wurde als Bestandteil der ausgeschriebenen Ausführungsplanung eine Maßnahmemarkierung am Bauwerk geplant, die nach dem Einrüsten und der Grundreinigung folgende Leistungen enthielt:

- Vierungen,
- Antragung von Steinergänzungsmörtel,
- Instandsetzung von Rissen durch Injektion oder Vernadelung,
- Fugeninstandsetzung,
- Putzinstandsetzung.

Als Bestandteil der Ausführungsplanung ist diese Maßnahmemarkierung in eine Maßnahmekartierung überführt worden. Diese Unterlage dient der Qualitäts sicherung, als Abrechnungsgrundlage und zur Dokumentation der durchgeführten Instandsetzungsleistungen.

Nach der Vergabe der Ausführungsleistungen konnte der Fachplaner im Rahmen einer baubegleitenden Fachberatung die Ausführungsqualität steuern und die Planung bei neuen Erkenntnissen fortschreiben. Neben der Erläuterung der Planung, der Begleitung der Maßnahmemarkierung und der Freigabe der verwendeten Materialien wurden Musterflächen bewertet. Durch das Anlegen von Musterflächen können die Ausführungsqualität und die detaillierte Umsetzung festgelegt werden. Gleichzeitig dienen die ausgeführten und abgenommenen Musterflächen als Referenzflächen. Durch eine baubegleitende Fachberatung in Abstimmung mit der örtlichen Bauüberwachung konnte die Ausführung der Mauerwerks- und Natursteininstandsetzung mit der Planung und den Muster flächen abgeglichen werden. Bei auftretenden Abweichungen erfolgten als baubegleitende Instandsetzungsplanung Festlegungen und die Beschreibung ergänzender Leistungen. Die Baustellenbesuche wurden als Teil der Baudokumentation von der Fachberatung protokolliert. Mit der Teilnahme an der Erstinspektion und an den fachtechnischen Abnahmen kam die Fachberatung zum Abschluss.

### **3 Konstruktion – Zustand – Instandsetzung**

Pfeiler, Widerlager, Stirnseiten und Gewölbe des Viaduktes bestehen aus einem gleichmäßigen Natursteinmauerwerk. Das Mauerwerk ist aufgrund der vergleichsweise eben bearbeiteten Steinoberflächen der Fugen ein Quader mauerwerk und kann in die Güteklaasse N4 nach DIN 1053 eingeordnet werden. Die äußere Mauerwerksstruktur ist gekennzeichnet durch großformatige Natursteinblöcke mit einer Länge von 1 bis 2 m und einer Höhe bis 50 cm. Die großen Natursteinquader sind aus dem regional typischen Konglomeratgestein Nagelfluh hergestellt. Der Naturstein wurde auch bei verschiedenen Hochbaudenkmälern in Traunstein und auf weiteren Viadukten der Maximiliansbahn verbaut. Nagelfluh ist aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften vergleichsweise häufig bei Bauwerksverkleidungen des 20. Jahrhunderts in Oberbayern anzutreffen. Für die Instandsetzung des Mauerwerkes mit Vierungen und anderen Naturstein ergänzungen wurde schonend zurückgebautes Natursteinmaterial verwendet, welches im Zusammenhang mit dem Neubau des Gleistragwerkes gewonnen werden konnte. Darüber hinaus liefert in Brannenburg am Inn ein aktiver Stein bruch Nagelfluh in der geplanten Qualität. Bei dem am Viadukt verbauten Stein wurden Steindruckfestigkeiten von durchschnittlich  $40 \text{ N/mm}^2$  ermittelt. An ebenen Steinoberflächen konnten Verwitterungstiefen von maximal 5 mm erkundet werden. An ungeschützten, horizontal auskragenden Steinen wie Gesimsen und Rustika waren stärkere Schäden in Form von Fehlstellen, Abplatzungen und Rissen vorhanden (Bild 3).

Die Werksteine sind weitestgehend passgenau bearbeitet, so dass an den Oberflächen ein Mörtel zwischen den Steinfugen kaum nachweisbar ist. Im äußeren Bereich wurden über die Fugen ein sehr bindemittelreicher, zementgebundener Antragmörtel aufgezogen und breit verstrichen. Eine Scheinfuge ist in der Regel mit dem Fugeisen eingebracht. Die physikalischen Eigenschaften des über die Fugen gezogenen bindemittelreichen und druckfesten Mörtels sind nur ungenügend an die Natursteineigenschaften angepasst. Die Oberflächenabreißfestigkeiten des Konglomeratgesteins Nagelfluh sind erwartungsgemäß gering und liegen weit unter den Druckfestigkeiten des Mörtels. In diesem Zusammenhang entstehen Spannungen und Abrisse im Kontaktbereich Mörtel zu Stein. Dieser Prozess ist mit den Ablösungen und Abschalungen einzelner Mörtelstücke verbunden.

Eine Hauptursache für die Schäden am Natursteinmauerwerk ist die langjährige starke Wassereinwirkung infolge fehlender bzw. schadhafter Abdichtung und Entwässerung. Dadurch sind vorwiegend frostbedingte Gefügeschäden, Natursteinabplatzungen und Bindemittelausspülungen aus dem Mauermörtel sowie damit im Zusammenhang stehende Bindemittelablagerungen an den Steinoberflächen entstanden.

Bei der Instandsetzung sollte keine vollständige Wiederherstellung der bauzeitlichen Oberflächen, Geometrien und Kanten erfolgen. Die zusammengestellten Instandsetzungsschritte wurden mit dem Ziel der Sicherstellung von Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit festgelegt:

- Mechanisches Entfernen von biologischem Bewuchs und Sträuchern sowie von Bindemittelablagerungen; Beseitigung loser und hohl liegender Mörtelanteile und Steine;
- Grundreinigung aller Mauerwerks- und Natursteinflächen mit oberflächenschonenden Strahlverfahren; Ermittlung technischer Detailparameter an Probeflächen im Vorfeld;



**Bild 3**  
Ansicht Natursteinquader des rustizierten Gewölbebögens mit Verwitterungsschäden, 2012

- Sicherung loser Natursteinteile; kraftschlüssiger Verschluss von Rissen durch Injektion mit geeigneten Harzen;
- Ergänzung der Deckverfugung mit mineralischem Mörtel, physikalische Eigenschaften und Ausführung sind abgeleitet aus dem Bestand;
- Auftrag von mineralischem Steinergänzungsmörtel in Einzelflächen zur Gewährleistung einer sicheren Wasserableitung; nach dem Aufbringen der Mörtelsysteme handwerkliche Anpassung der Flächen an den angrenzenden ungeschädigten Werksteinbestand;
- Ausführung von Mörtelkehlen über horizontal auskragenden Gesimsen zur Gewährleistung einer schnellen und sicheren Ableitung von Oberflächenwasser;
- Beseitigung von Steinfehlstellen, Wiederherstellung gestalterisch wichtiger Bauwerkskanten durch den Einbau von Vierungen aus Brannenburger Nagelfluh.

## 4 Instandsetzungsphase

Die Bauarbeiten am gesamten Bauwerk zur Instandsetzung und Erneuerung der Fahrbahnplatte, der Gleisanlagen und der Mauerwerksoberflächen wurden 2014 umgesetzt. Das mit Arbeits- und Traggerüsten vollständig eingerüstete Bauwerk konnte temporär nur halbseitig befahren werden, um die Arbeiten an der Fahrbahnplatte zu ermöglichen. Zur Unterstützung der örtlichen Bauüberwachung bei der Mauerwerksinstandsetzung wurde eine Fachberatung bei entsprechenden Baustellenterminen für Fragen zur Mauerwerksinstandsetzung und Sicherstellung der Ausführungsqualität einbezogen. Dabei sind Musterflächen für die Reinigung, Steinergänzung, Vierung und Verfugung geplant, begleitet und als Ausführungsreferenz abgenommen worden. Zum Erreichen des Reinigungsziel, dem Entfernen von oberflächigem Schmutz und von Krusten, kamen in Abhängigkeit der Verschmutzung beispielsweise unterschiedliche Reinigungsdrücke zum Einsatz. Die Bemusterung des Ersatzmaterials und der Vierungen war unkompliziert. Die Umsetzung des Steinergänzungsmörtels mit der typischen groben Gesteinskörnung war vergleichsweise anspruchsvoll und erforderte mehrere Durchläufe, bis die Musterflächen bezüglich Farbe, Körnung, Oberflächenbeschaffenheit und Festigkeit dem angrenzenden Bestand entsprachen. Bei den Baustellenbegehungen wurde stichprobenartig die Ausführung bezüglich der Übereinstimmung mit den Musterflächen und der Planung überprüft (Bild 4).

Ergänzend zu den geplanten Leistungen sind bei der Instandsetzung Schadensumfänge festgestellt worden, die erst nach der Reinigung, bzw. nach handnaher Begehung erkennbar waren. An den teilweise verputzten Oberflächen von Pfeilern und Gewölbebögen waren vereinzelte Hohllagen vorhanden. Hier erfolgte eine Wiederherstellung des Glattputzes. Der vereinzelt vorhandene Stirnringriss wurde zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit verschlossen. Unter der Maßgabe der Sicherstellung der Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit sind bei auskragenden Bauteilen zur Gewährleistung des Wasserabflusses Hohlkehlen ange-

ordnet worden. Steinefehlstellen wurden zur Wasserableitung und bei wichtigen Sichtkanten reprofiliert und die in exponierten Bereichen anzutreffenden gefügeschädigten Steine mit einem Hohlklang bis auf den festen Steinkern zurückgearbeitet. Die Dokumentation der gemeinsam festgelegten Maßnahmen erfolgte im Zuge der Umsetzung durch die Ausführungs firma entsprechend der Planung in einer Maßnahmekartierung.

Durch die gute Zusammenarbeit von Baufirma und baubegleitender Fachberatung konnte ein Wahrzeichen Traunsteins und der Ingenieurbaukunst für die weitere Nutzungszeit ertüchtigt werden. Dabei wurden neben den relevanten Punkten zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit auch gestalterische Aspekte berücksichtigt.

## 5 Gleistragwerk

Die wesentliche Voraussetzung für den dauerhaften Erhalt der Natursteinbrücke war die Erneuerung der Flächenabdichtung und Entwässerung. Dies erfolgte im Zusammenhang mit dem Neubau der Fahrbahnplatte, womit gleichzeitig bahnbetriebliche Anforderungen an die Verkehrssicherheit umgesetzt werden konnten. Weiterhin waren am vorhandenen Gleistragwerk aus Stahlbeton Schäden sichtbar, die eine grundhafte Instandsetzung erfordert hätten. Der Neubau der Stahlbetonplatte wurde in zwei Bauphasen geplant. Zur Aufrechterhaltung des Verkehrs durch Personen- und Güterzüge erfolgte auf der hoch frequentierten Strecke nach Österreich eine halbseitige Sperrung. Im gesperrten Gleis wurden die Arbeiten zur Herstellung der Stahlbetonplatte und der Abdichtungen durchgeführt, während im Nachbargleis der Bahnbetrieb verlief.



Bild 4 Detail ausgeführte Fugeninstandsetzung, an den Bestand angrenzend

Mit dem neuen Gleistragwerk aus Stahlbeton entspricht das Viadukt den aktuellen bahnbetrieblichen Anforderungen an Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit. Da das robuste Tragwerk aus Gewölbebögen und Natursteinpfeiler keine konstruktiven Schäden aufweist, besteht entsprechend der statischen Bewertung auch keine Einschränkung der Standsicherheit. Dem 160 Jahre alten Viadukt steht damit eine weitere Nutzungszeit bevor. Eine Voraussetzung für die Dauerhaftigkeit sind regelmäßige Inspektionen und die Durchführung erforderlicher Instandhaltungsarbeiten (Bild 5).

### Weiterführende Literatur

- [1] Jahrbuch 1996, Historischer Verein für den Chiemgau zu Traunstein
- [2] Bahrmühlenviadukt – Erhaltung und Ertüchtigung der 15-Bogen-Natursteinbrücke an der Strecke Neukiritzsch-Chemnitz, Elke Hering, Thomas Bösche, Rüdiger Burkhardt, Bautechnik, Juli 2011
- [3] Mauerwerk Kalender 2018, Brücken im Bestand
- [4] WTA Merkblatt 4-5-99/D, Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik
- [5] Historische Eisenbahnbrücken – sind diese noch zu retten?, Ludolf Krontal, Rüdiger Burkhardt, Natursteinsanierung Stuttgart 2018, Neue Natursteinsanierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele
- [6] DIN 1053, Mauerwerk

### Bildquellen

Alle Bilder: MKP GmbH



**Bild 5** Ansicht EÜ Traun nach Fertigstellung Instandsetzung und Gleistragwerk



Ralph Egermann

## **STATT SCHIENENVERKEHR FUSSGÄNGER UND RADFAHRER**

### **Aspekte zur Instandsetzung der Steinernen Brücke in Regensburg**

Die Steinerne Brücke in Regensburg ist seit 2010 behutsam instandgesetzt und im Juni 2018 wieder zur Nutzung für Fußgänger und Radfahrer freigegeben worden. Die zunehmenden Nutzungsanforderungen beeinflussten maßgeblich die Einwirkungen auf die Brücke. Anfänglich pferdegetriebene Fuhrfahrzeuge wurden später von schwereren motorisierten Fahrzeugen abgelöst, parallel dazu zwang die neue Straßenbahntrasse über die Brücke zu Umgestaltungen der Brückenzu- und -abfahrten. Am Ende der immer schwerer werdenden Transportmittel standen die Gelenkbusse, die der verbreiterten Brücke die höchsten wechselnden Lasten in ihrer langen Geschichte aufzwangen. Diese Lasten haben die Brücke nachweislich erheblich geschädigt und nach den Sanierungen in den sechziger Jahren neue umfangreiche Instandsetzungen notwendig gemacht.

### **1 Die älteste Steinbogenbrücke Deutschlands**

Als genutztes Verkehrsbauwerk verbindet die älteste Steinbogenbrücke Deutschlands den Stadtteil Stadtamhof mit der Altstadt von Regensburg. Sie ist damit ein Bestandteil des Denkmalensembles der historischen Altstadt, die zu den Welterbestätten der UNESCO zählt. Bereits bei der Planung mussten zum einen die baurechtlichen und verkehrspolitischen Anforderungen an eine innerstädtische Verkehrsverbindung berücksichtigt werden. Zum anderen waren bei der Bauausführung die Bau- und Zierelemente von der Erbauungszeit zwischen 1135 und 1146 über erste Sanierungsphasen bis hin zu Kriegszerstörungen und

verkehrstechnische Ertüchtigungen angemessen zu bewahren. Die Brücke war für Jahrhunderte der einzige Donauübergang zwischen Ulm und Wien. Auch nach dem kriegsbedingten Wegfall des Straßenbahnverkehrs und der Sperrung für den Individualverkehr im Jahr 1997 sowie für den öffentlichen Nahverkehr 2008 wurde ihre verkehrstechnische Bedeutung als Brücke, wenn auch nur noch für den Rad- und Fußgängerverkehr sowie für Rettungs- und Revisionsfahrzeuge bewahrt (Bild 1).

## 2 Konstruktionsgefüge

Die nach den Chroniken zwischen 1135–1146 erbaute Natursteingewölbebrücke spannte ursprünglich auf einer Länge von 336 m mit 16 Bögen auf 15 Pfeilern über das Donautal. Die heutige Brückenzahl zwischen der Nordfassade des Brucktors im Süden und dem nördlichsten Kämpfer am letzten Bogen im Norden beträgt 314 m.

Die Spannweiten der 5,80 m bis 7,60 m breiten Tonnengewölbe variieren zwischen 10,20 m und 16,20 m. Die Schildbögen und die darauf aufgesetzten Schildwände bestehen überwiegend aus behauenen Regensburger Grünsandsteinquadern, ganz vereinzelt auch aus Kalksteinquadern aus der Römerzeit. Die Quader verkleiden an 11 Gewölben das Gussmauerwerk, ein tragfähiges Gemisch aus Kalkmörtel, Grünsandstein- und Kalkbrocken.

Vier Gewölbe waren in den letzten Kriegstagen des 2. Weltkriegs von der Deutschen Wehrmacht gesprengt worden. Sie wurden 1967 wiedererrichtet, wobei Grünsandsteinquader nur noch als verlorene Schalungen zur Herstellung der Bögen aus Stahlbeton dienten.



Bild 1 Westansicht der Brücke

Die zwischen 1967 und 2014 mit Granitgroßsteinpflaster belegte Fahrbahn ist nach Osten gekrümmmt, steigt zur Mitte an und überwindet dabei eine Höhe von maximal 5,50 m. Betonfertigteile mit aufgesetzten Lampen bilden seit 1967 den Brückenrand aus.

Die meisten der ebenfalls aus Gussmauerwerk bestehenden Pfeiler sind auf standfestem Flusskies gegründet worden. Nach Beschreibungen sind in den wenigen Bereichen mit schlechter gelagerten Kiesen zum Ausgleich Eichenrost untergelegt worden. Um Unterkolkungen entgegenzuwirken, baute man aus hölzernen Eichenpfählen und Steinschüttungen inselförmige Beschlächte. Ihre Größe und Konstruktion wurde im Laufe der Zeit mehrmals geändert, zuletzt 1951 im Rahmen einer grundlegenden Sanierung. Bis 1962 wurden die Pfeilervorbauten beseitigt und als Schutz gegen Unterspülungen stählerne Spundwände und massive Betonkonstruktionen um die Pfeiler herum gebaut.

### **3 Gründe für die Instandsetzungen und deren Planung**

Konstruktive Mängel wie die fehlende Abdichtung unter dem Belag sowie die Fugenanordnung der im Grundriss rautenförmig ausgebildeten Tonnengewölbe in Verbindung mit Witterungseinflüssen und zunehmender Verkehrsbelastung haben zu Schäden geführt, die die Verkehrs- und Standsicherheit erheblich herabgesetzt hatten. Bei früheren Instandsetzungen ist zwar schon versucht worden, dem Schadensfortschritt Einhalt zu bieten, jedoch wurde dieser durch die Verwendung von aus heutiger Sicht ungeeigneten Baustoffen eher noch begünstigt.

Die Betonfertigteilbrüstungen von 1967 waren zwischenzeitlich gerissen, verschoben und von korrosionsbedingten Abplatzungen gezeichnet. In den ebenfalls gerissenen und verschobenen Granitgroßsteinpflasterbelag drang mit Tausalzen belastetes Regenwasser ein. Aussinterungen, Salzausblühungen und Eisbildung auf der Brückenunterseite waren die Folgen. Die damit einhergehenden physikalischen Vorgänge zerstörten nicht nur die Steinoberflächen sondern auch das Konstruktionsgefüge.

Das Abreißen der Schildbögen vom Gewölbemauerwerk, über das schon in den sechziger Jahren berichtet wird, ist zwar eine für gemauerte Bogenbrücken typische Schadensform, jedoch ist das Ausmaß der Abrisse bei der Steinernen Brücke weitaus größer als bei anderen Brücken. Die dadurch reduzierten Stand- und Verkehrssicherheiten zwangen 2005 zu Notsicherungsmaßnahmen in Form von Interimsquerverspannungen (Bild 2).

## 4 Ziele der Instandsetzungsplanungen

Das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege erwartete von der Instandsetzung der Steinernen Brücke, dass sie behutsam, nachhaltig, denkmalgerecht, unaufdringlich, selbstverständlich und ehrlich durchgeführt wird. Dies galt sowohl für den Umgang mit den vorhandenen Bauteilen und Baustoffen als auch für die Verwendung von Reparaturmaterialien sowie für den Einbau neuer Bauteile.

Für die Stadt Regensburg als Bauherr und Verantwortliche für ein Verkehrsbaubauwerk, das Teil einer Landesstraße ist, bestand die Notwendigkeit, dass bei der Instandsetzung die aktuelle Vorschriftenlage für Verkehrsbaubauwerke bzw. Brücken Berücksichtigung fand und dass die Ausführungen den Bedingungen der Wirtschaftlichkeit, der Funktionsfähigkeit und der Dauerhaftigkeit folgten. Die untere Denkmalschutzbehörde der Stadt, die als genehmigendes Organ ebenfalls Bauherrnfunktion übernahm, verfolgte das Ziel, das Bau- und Kulturdenkmal so unverändert wie möglich zu erhalten.



**Bild 2**  
Einbau der Notsicherungen  
(Querverspannungen) am  
Bogen XII, 2005

## 5 Tragwerks- und Schadensanalyse

Vor der eigentlichen Instandsetzungsplanung war zunächst die Tragstruktur zu analysieren. Hierbei waren u. a. die Beanspruchungen sowohl an den ungeschädigten als auch an den geschädigten Bauteilen zu ermitteln und den entsprechenden Bauteilwiderständen gegenüber zu stellen. Damit konnte z. B. geklärt werden, ob ein Schaden durch Überbeanspruchungen entstanden war oder ob ein geschädigtes Bauteil nicht mehr die auftretenden Beanspruchungen aufnehmen konnte.

### 5.1 Voruntersuchungen

Schon mehrere Jahre vor den eigentlichen Instandsetzungsplanungen ließ das für die Brücke verantwortliche Tiefbauamt der Stadt Regensburg Voruntersuchungen durchführen, um das Bauwerk im Hinblick auf die verwendeten Baustoffe, auf seinen Gefügeaufbau, seine Geometrie, seine thermischen und hydraulischen Beanspruchungen sowie sein Verformungsverhalten zu analysieren und diese Erkenntnisse mit bauhistorischen Untersuchungen und Schadenskartierungen in Einklang zu bringen.

### 5.2 Beanspruchungen der Brücke

#### 5.2.1 Einwirkungen aus Verkehr

Im Rahmen der Vorentwurfs- und Entwurfsplanung war zu klären, welche Nutzlasten für die Brücke angemessen sind und ob die Brücke ggf. so ertüchtigt werden kann, dass sie als Straßenbrücke für eine bestimmte Verkehrslastgruppe dienen könnte. Zeitler [1] hat die Entwicklung der Verkehrslasten auf der Brücke vom Pferdefuhrwerk über die Straßenbahn bis hin zum Gelenkbus zusammengestellt. Dabei wird deutlich, dass die Beanspruchungen durch einen Gelenkbus mit 28 t Gesamtgewicht bis zum Jahr 2008 höher lagen als beispielsweise die durch die Straßenbahn (knapp 22 t), die zwischen 1903 und 1945 auf der Brücke verkehrte (Bild 3). Die Belastungen aus dem Schwerverkehr wirken demnach erst seit einem guten Zehntel der bisherigen Gesamtstandzeit der Brücke. Die daraus resultierenden Schäden sind aber erheblich.

Bei den Einwirkungen aus Verkehr ist neben der Lastabtragung von der Fahrbahn über die Gewölbe in die Pfeiler auf die Gründung auch die Widerstandsfähigkeit der Brüstungen zu untersuchen. Je nach Art des Verkehrs müssen Horizontallasten von Personen, Radfahrern oder dem Anprall von PKWs, LKWs und Bussen von den Brüstungen aufgenommen werden können.

#### 5.2.2 Einwirkungen aus Temperatur

Zusätzlich zu den Belastungen aus Verkehr erfährt die Brücke noch erhebliche Beanspruchungen durch Temperatur. Die von der TU Darmstadt theoretisch über einen Jahreszyklus ermittelten Temperaturgänge in den Brüstungen, in den Schildwänden und im Belag fanden Eingang in die statischen Berechnungen.

So konnte z. B. errechnet werden, um welche Beträge sich die Gewölbe der Brücke im Sommer heben und im Winter senken.

### 5.2.3 Einwirkungen aus Wind, Hochwasser und Eisstoß

Bei Brücken sind auch noch Horizontalbeanspruchungen, also Einwirkungen senkrecht zur Brückenachse, aus Wind, Hochwässern und Eisstoß zu berücksichtigen.

### 5.2.4 Einwirkungen aus Gefügeveränderungen

Zu den Gefügeveränderungen zählen z. B. der Ersatz von vier gesprengten Bögen in Stahlbetonbauweise, der Einbau von Sprengkammern in die Pfeiler aber auch Bauzustände bei den Instandsetzungsarbeiten, zu deren Realisierung Baubehelfe in Form von Unterstützungskonstruktionen oder interimswise Verspannungen erforderlich wurden.

## 5.3 Bauteilwiderstände

Zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte für das Mauerwerk wurden an verschiedenen Stellen aus dem Brückenmauerwerk Bohrkerne entnommen und diese bestimmten Werkstoffprüfungen unterzogen. Direkt konnten die Materialkennwerte der Steine und der Mörtel bestimmt werden. Die Kennwerte für das Mauerwerk wurden zum einen aus den ermittelten Werkstoffeigenschaften der Steine und Mörtel abgeleitet, zum anderen erfolgte die Bestimmung zusätzlich auch indirekt

Was die Steinerne Brücke alles schon tragen musste - oder: Wie (un)erträglich sind die Busse im Vergleich?		Jahr	Fahrzeug	Besetzt-gew. (t)	Sitzpl./ Stehpl.	Federung
um 1489	Fuhrwerk???				1/-	???
1891	Pferdebus	ca. 3,0		ca. 8/2		Stahlblatt
1903 -'45	Trambahn Tramzug	9,40 14,16+7,79		14/12 16/40+16/30		Stahlblatt Stahlblatt
um 1955	Buszug Linie 10	13,80+5,60		36/45+29/11		Stahlbl. +?
heute	Bus L.4, 12,13,17	ca. 17,20		ca. 38/65		Luft
	Gelenkbus L.4,13	ca. 28,00		ca. 53/114		Luft
	Brdgas-Midibus	11,50		17/29		Luft
	Hybrid-Midibus	11,80		12/43		Luft
	Minibus-ca. Zug	ca. 6,30+3,0+3,0		28+24+24/-		Luft

Quelle: ZAHW, Archiv Arber(e) + Simola, J. Jäger, RZ, Schaffhausen, Luzern + Zürich (2008)

Bild 3 Zeitler: Entwicklung der Nutzlasten

über die Methode der Fugenbohrkerne [2], um eine höhere Aussagewahrscheinlichkeit zu erzielen.

Die über die Werkstoffprüfungen ermittelten (Kurzzeit-)Festigkeiten wurden mit den entsprechenden Sicherheitsfaktoren und der Berücksichtigung der Dauerstandfestigkeiten auf die Bauteilwiderstände umgerechnet, die dann Eingang in die statischen Berechnungen fanden. In Abstimmung mit dem Prüfingenieur ist für die Nachweisführung noch das globale Sicherheitskonzept angewendet worden, da dieses für Bestandsmauerwerk und für geringe Probezahlen hinreichend zuverlässige Werte liefert [3].

#### **5.4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den Strukturuntersuchungen**

Mit Hilfe der rechnerischen Strukturuntersuchungen, in die die im 3D-Laserscanverfahren ermittelte Brückengeometrie sowie die in Versuchen gefundenen Werkstoffkennwerte für die verschiedenen, an der Brücke zur Verwendung gekommenen Baustoffe eingeflossen sind, konnten die wesentlichen Schadenshypothesen bestätigt werden.

Ein Hauptproblem der Brücke ist ihre für eine mehrfeldrige Bogenbrücke ungewöhnliche Geometrie: einige Gewölbe bilden im Grundriss keine Rechtecke sondern Rauten aus. Die Gewölbe sind damit zu den Pfeilern verdreht. Die Fugen des Bogenmauerwerks sind dabei so angeordnet, dass sie parallel zu den Pfeilern verlaufen. Die Randsteine mussten daher schräg zugeschnitten werden. Die Hauptdruckspannungen verlaufen demzufolge nicht wie bei Bogenbrücken mit rechteckigem Grundriss üblich parallel zu den Brückenrändern sondern diagonal. Die höchsten Druckspannungen entstehen entlang der kurzen Diagonalen an den Schnittpunkten zwischen den Schildbögen und Pfeilern. Sie erreichen bei hohen exzentrischen Buslasten die Bruchfestigkeit des Mauerwerks und führten damit zu örtlichen Zerstörungen (Bild 4).

Aus diesem Lastfluss ergeben sich Horizontalkräfte senkrecht zur Brückenachse, die die Schildbögen nach außen drücken. Diese werden noch durch die unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnisse zwischen Gewölbe- und Schildmauerwerk verstärkt. Da eine Einzellast, wie sie z. B. über einen Reifen auf die Fahrbahn aufgebracht wird, immer in die Richtung abgeleitet wird, in der die größten Steifigkeiten vorzufinden sind, wird diese nach außen zu dem steifen Schildbogenmauerwerk hin umgelenkt. Dieser Kraftumlenkung müssen aus Gründen der Kräftegleichgewichte entsprechende Horizontalkräfte entgegenwirken, nämlich eine Druckkraft im Belag und eine Zugkraft im Stirnbogenmauerwerk (Bild 5). Im Belag kommt es dadurch zu Stauchungen und damit zu Verwerfungen, im Stirnbogenmauerwerk zum Abreißen vom Gewölbe (Bild 6).

Die rechnerischen Untersuchungen ergaben, dass die Brücke in dem Zustand von 2008 nicht geeignet ist, über längere Zeit den Schwerlastverkehr schadlos aufzunehmen. Sollte Schwerlastverkehr auch zukünftig über die Brücke fahren

müssen, wären Ertüchtigungen und ergänzende Bauteile in Form von Stahlbetonplatten unumgänglich geworden.

Wird die Brücke von Fahrzeugen befahren, müssen auch die Brüstungen die von den Vorschriftengebern geforderten Sicherheiten gegen Anprall aufweisen. Der Nachweis für die Betonfertigteilbrüstungen von 1967 zeigte, dass sie nicht in der Lage sind, einem Anprall eines Busses bzw. Pkws so zu widerstehen, dass das Unfallfahrzeug noch auf der Brücke gehalten werden kann.

Die Nachrechnungen mit den Einwirkungen aus Temperatur bestätigten die zyklischen Verformungsmessungen des Büros Harbauer aus den Jahren 1992/93, die ergaben, dass sich der Scheitel eines Bogens gegenüber der Ausgangsmessung um 1,5 mm angehoben und um 3,5 mm abgesenkt hat. Auch bei diesen sehr gering erscheinenden vertikalen Scheitelverschiebungen entsteht an den Pfeilerköpfen in Richtung der Brückenzentralachse Zug, der nach unten hin abklingt. Rissbildungen im Schildmauerwerk sind bei der »fugenlosen« Bauweise wie sie die Steinerne Brücke aufweist, die unvermeidbare Folge. Aufgrund der z. T. geringen Überbindemaße der Schildmauern bilden sich die Risse nicht zwingend an den Stellen der Spannungsmaxima, sondern an den in der Nähe liegenden Schwachstellen.

Für die Planung wurde aus den Ergebnissen abgeleitet, dass ein neuer Belag den temperaturinduzierten Bewegungen zwängungsarm folgen soll. Im Sommer werden die Fugen im Belag größer, es treten Dehnungen auf. Im Winter verklei-

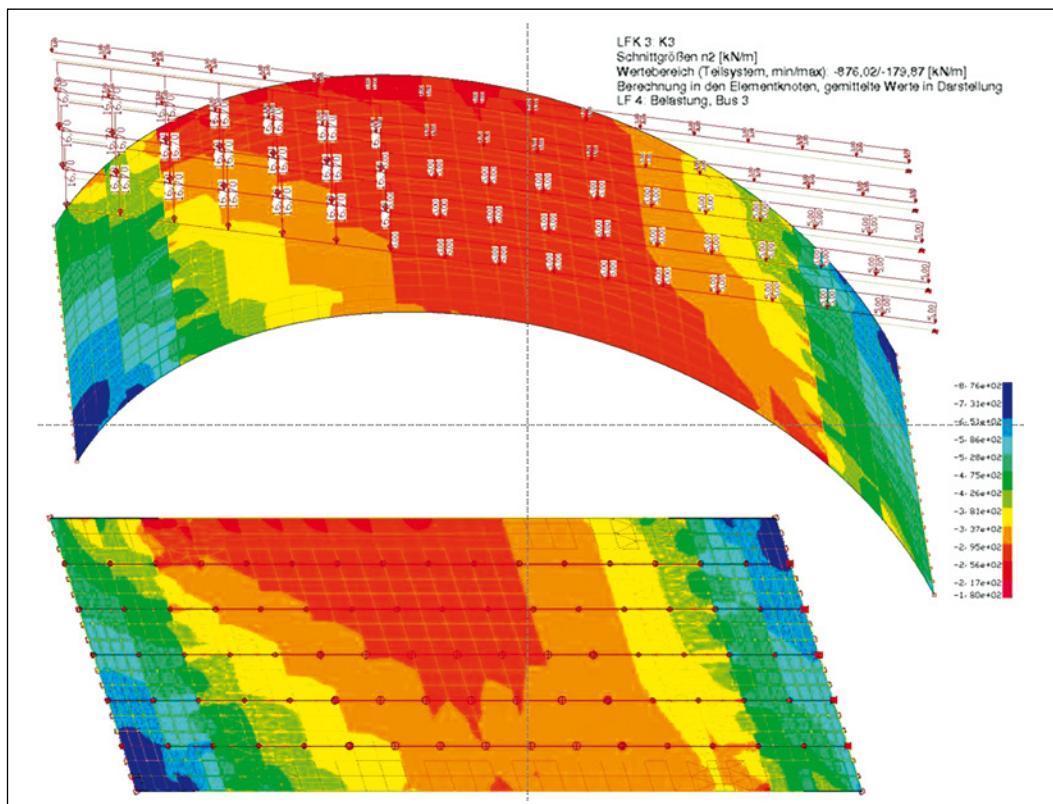
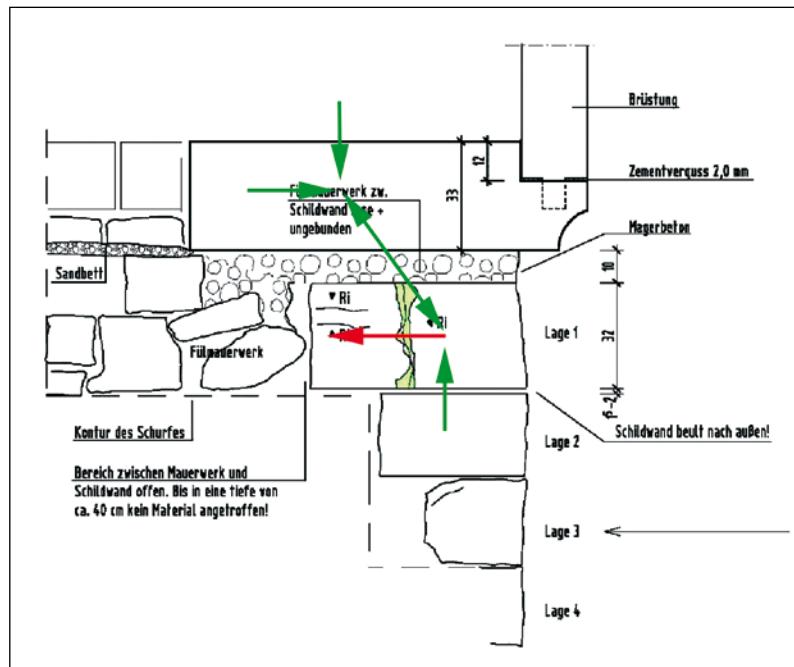
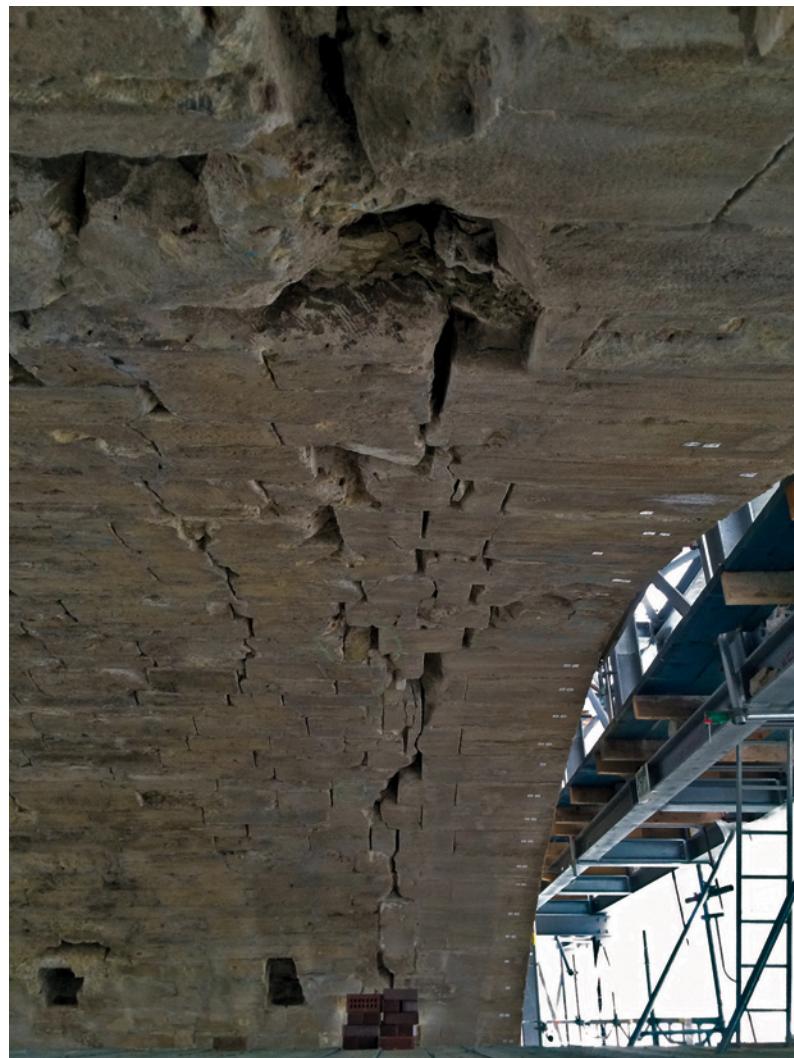


Bild 4 Ergebnisse der Spannungsermittlungen (räumliche Darstellung, Grundriss unten)



**Bild 5**  
Kraftfluss einer Radlast  
in Schildbogennähe  
(grün: Druck; rot: Zug)

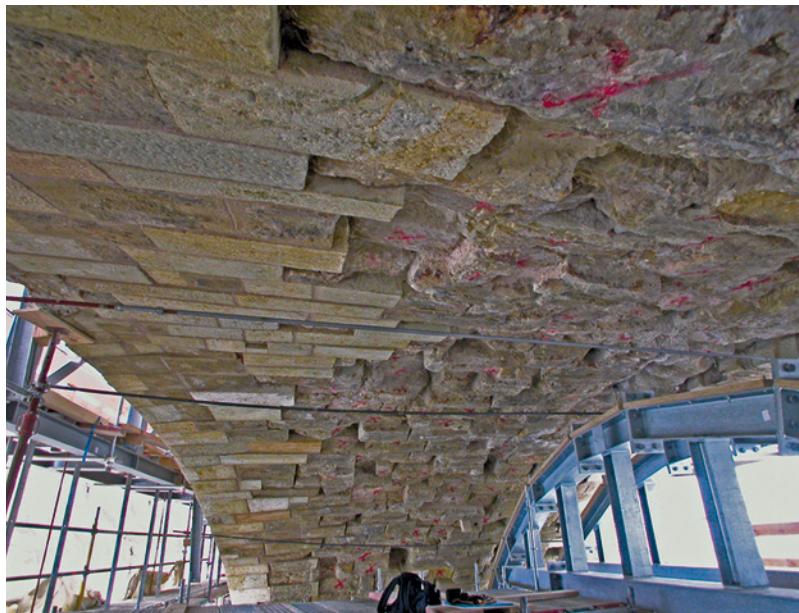


**Bild 6**  
Abreißen des Schildbogens  
vom Gewölbe

nern sich die Fugen, es kommt dabei zu Stauchungen. Somit wird nur eine ungebundene Bauweise für den Belag eine nachhaltige Lösung versprechen, da diese die Verformungen weitgehend zwängungsfrei mitmachen kann.

Hinsichtlich der Einwirkungen aus Wind und den Sonderlastfällen Hochwasser und Eisstoß haben sich keine signifikanten Veränderungen bzgl. der Lastansätze ergeben. Aufgrund der globalen Erwärmung der Gewässer gehören Eisstoße, wie sie früher zu Schädigungen bis hin zur Zerstörung und in der Folge zum Rückbau eines der Brückentürme geführt hatten, der Vergangenheit an. Die Beanspruchungen aus den Hochwasserereignissen sind aufgrund der schnelleren Beseitigung von Verklausungen zwar nicht in den Spannungsspitzen jedoch in der Häufigkeit reduziert worden. Und schließlich haben die Nachrechnungen der zusätzlichen Windlasteintragungen durch die baubedingten Einhausungen gezeigt, dass die Brücke aufgrund ihrer hohen Masse selbst extrem hohen Windlasten einen ausreichenden Widerstand sicher entgegensetzen kann, denn die mittlere horizontale Windlast beträgt nur ca. 1 % des entsprechend bezogenen Brückeneigengewichts.

Da aufgrund lokaler Schädigungen mit dem Austausch von Steinen in den Stirnbögen und Gewölben gerechnet werden musste, war im Vorfeld der Maßnahmen über Nachrechnungen zu klären, an welcher Stelle wie tief und wie flächig maximal in das Traggefüge eingegriffen werden darf, ohne zusätzliche Maßnahmen über Baubehelfe o. ä. ergreifen zu müssen. Hierbei zeigte sich, dass bei einem großen Bogen (Spannweite ca. 16 m) eine Querschnittsreduktion von 25 % zur gleichen Scheitelsenkung führt wie bei einer Abkühlung um 2 °C. Trotz dieser »Gutmütigkeit« mussten, da die Tiefe der Schädigungen im Bogen- und Gewöl bemauerwerk aus den Voruntersuchungen nicht ableitbar war, für die Baumaßnahmen speziell konstruierte Baubehelfe bereitstehen, auf die kurzfristig Ablastungen vorgenommen werden konnten (Bild 7).



**Bild 7**  
Baubehelf: Bogenunterstützung aus Stahl

Der zum Einbau einer Abdichtung notwendige Rückbau der Brückenränder mit den Brüstungen und das Abnehmen des Fahrbahnbelags führten zu Entlastungen des Bogen- und Gewölbemauerwerks. Daher wurden die Bauabläufe so aufeinander abgestimmt, dass die Mauerwerksreparaturen, die in das Traggefüge hereinreichen, im entlasteten Zustand ausgeführt wurden. Das höhere Gewicht der neuen Brückenränder und der Fahrbahn erhöhten nach deren Montage die Normalspannungen in den gekrümmten Bauteilen und erzeugten damit eine Art Vorspannung. Steinquader, die nachträglich in das Traggefüge eingebaut wurden, sind dadurch in einen Druckspannungszustand versetzt und für die Lastabtragung aktiviert worden.

## 6 Randbedingungen für die Instandsetzungsplanung

Die Anforderungen an die Planung, an die Bauausführung aber auch an diejenigen, die sich mit den beiden Dingen befassten, waren bei der Instandsetzung der Steinernen Brücke sehr hoch. Je nach Thema konnten die Vorstellungen zur Bauausführung zum Teil nicht nur unterschiedlich, sondern auch gegensätzlich sein, so dass die Instandsetzungsarbeiten auf der Vereinbarung von Kompromissen ausgeführt wurden. Dabei ist aber versucht worden, das jeweilige Optimum vor dem Hintergrund der zahlreichen gewürdigten Randbedingungen zu erzielen: Ein in Nutzung befindliches Verkehrsbaubwerk muss seine Funktion erfüllen – auch während der Instandsetzungsarbeiten –, seinen hohen Denkmalcharakter behalten – auch nach zahlreichen sanierenden Eingriffen und nach der Erneuerung des gesamten Oberbaus – aber seine Instandsetzung muss auch wirtschaftlich und volkswirtschaftlich vertretbar sein.

### 6.1 Zukünftige Nutzung

Zu Beginn der Planung waren Nutzlasten aus Fußgänger- und Radverkehr, Personenkraftwagen sowie Busse bis zu einer Maximalgeschwindigkeit von 15 km/h als häufig wiederkehrende Belastungen bei den statischen Berechnungen anzusetzen.

Ein erster wichtiger Schritt zur behutsamen Instandsetzung der Steinernen Brücke war der Beschluss des Stadtrats im Jahr 1995, die Brücke für Personenkraftwagen zu sperren. Nach einem 2008 glimpflich verlaufenen Busunfall in Regensburg wurde die Frage nach der Widerstandsfähigkeit der Betonfertigteilbrüstungen bei einem Busanprall gestellt. Nachrechnungen im damals schon begonnenen Planungsprozess ergaben, dass die Brüstungen einem Busanprall nicht widerstehen würden, weswegen der Oberbürgermeister die Brücke sofort für den Busverkehr sperren ließ. Diese Verfügung wurde später auch vom Stadtrat als zukünftige Nutzung beschlossen. Dass die Brücke danach zukünftig nur noch von Fußgängern und Radfahrern und nur in Ausnahmefällen von Einsatz- und Revisionsfahrzeugen genutzt werden darf, dürfte für den Erhalt der Brücke

eine der wichtigsten Planungsvorgaben gewesen sein, wenn auch dadurch die verkehrstechnische Situation in der Stadt Regensburg viel komplizierter geworden ist. Der Verlust an historische Bausubstanz durch die Eingriffe zum Einbau von Zusatzkonstruktionen zur Abtragung von Vertikal- und Horizontallasten (aus Bremsen) für einen Schwerlastverkehr wäre unangemessen groß geworden.

Die Tragsicherheit des instandgesetzten Bestandsbauwerks wurde in Abstimmung mit dem Prüfingenieur für eine Brückenklasse 30/30 nach der damals noch gültigen DIN 1072 als ausreichend nachgewiesen. Dabei durfte berücksichtigt werden, dass die Brücke zukünftig aus Gründen der Dauerhaftigkeit nur noch im Notfall und dann einspurig in Brückenmitte mit entsprechenden Schwerlastfahrzeugen befahren werden darf. In Kauf genommen werden konnte, dass die neue Brüstungskonstruktion nur für eine Horizontallast (Holmlast) gem. dem Fachbericht DIN FB 101 Abs. IV.5 von 0,8 kN/m bzw. gem. DIN 1055-3 von 1,0 kN/m auszulegen war und damit keinem Fahrzeuganprall standhalten kann.

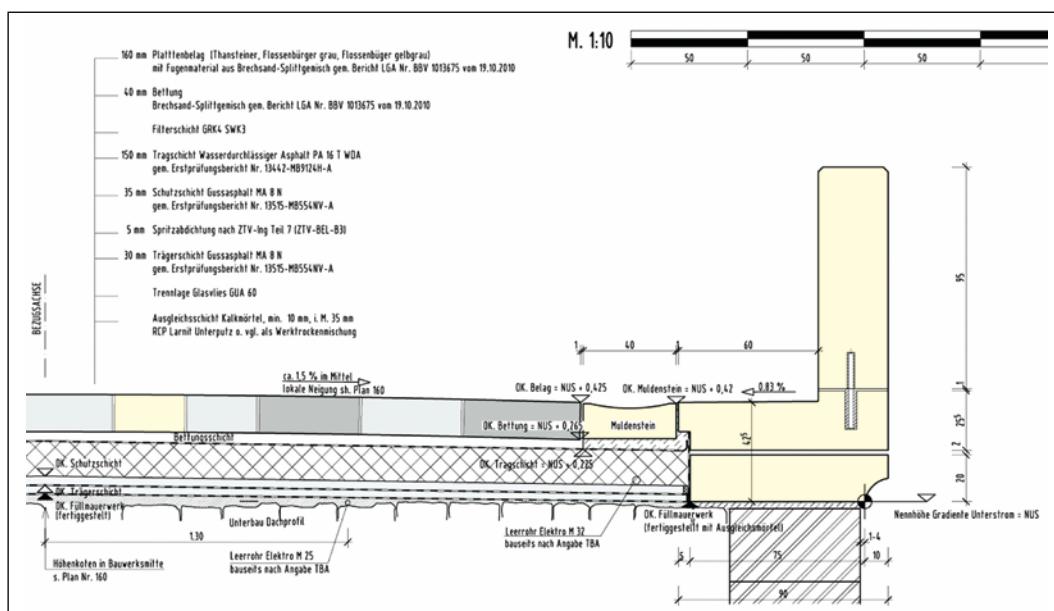
## 6.2 Erneuerung des Oberbaus

Zum Oberbau der Brücke zählen die Brüstungen, deren Auflagerplatten in Form von Fries- und Sockelsteinen am Rand sowie der Belag mit den an die Ränder angrenzenden Muldensteinen. Eine Instandsetzung der L-förmigen Betonfertigteile war aufgrund ihres hohen Schädigungsgrades nicht mehr möglich. Dass der bis zum Sanierungsbeginn vorhandene, gebunden verlegte Großpflasterbelag gerissen und erheblich verformt war, erleichterte die planerische Entscheidung, diesen komplett aufzunehmen, um der Brücke die dringend notwendige und bisher fehlende Abdichtung zu geben. Gestalterische und denkmalrelevante Fragen stellten sich somit an das veränderte Erscheinungsbild des Oberbaus mit neuen Brüstungen und einem neuen Belag. Ingenieurtechnische Fragen waren zur Verträglichkeit, zur Verformungsfähigkeit, zur Widerstandsfähigkeit und zur Dauerhaftigkeit der neu einzubauenden Baustoffe insbesondere an den Kontaktstellen mit den historischen Baustoffen zu beantworten.

Die Leitgedanken des ersten Entwurfs von 2010 waren zum einen die Anlehnung an eine Schrammbordausbildung, wie sie 1863 vorhanden war, zum anderen aber auch die Beschränkung der vorgeschriebenen Brüstungshöhen auf ein erträgliches Maß. Die Schrammbordlösung hätte problemlos eine Brüstungshöhe von 1,00 m ermöglicht. Radfahrer, für die bei direkter Erreichbarkeit eine Brüstungshöhe von mindestens 1,20 m vorgeschrieben ist, hätten durch das Schrammbord von der Brüstung ausreichend Abstand gehabt. Dafür hätte aber die Schrammbordlösung den Nachteil gezeigt, dass durch die Stufenausbildung mobilitätseingeschränkte Menschen mit dem Rollstuhl nicht mehr an die Brüstung hätten heranfahren können, was seit 1967 uneingeschränkt möglich war. Daher wurde der Nachbau der Ausführung von 1853 verworfen und eine Kompromisslösung gefunden, die auf Bild 8 dargestellt ist:

Als Brüstungselemente werden Granitplatten unterschiedlicher Längen versetzt, die an das von alten Darstellungen bekannte Material- und Fugenbild angelehnt waren. Die Höhe von 1,00 m und die Breite der Brüstungen von 30 cm wurden aus einem Kompromiss von denkmalpflegerischen, verkehrsrechtlichen und statisch-konstruktiven Aspekten entwickelt und in der Form auch von der obersten Bauaufsicht im Freistaat Bayern akzeptiert. Die Brüstungselemente sind über Dollen in die Sockelsteine eingespannt, die ihrerseits auf den geschwungenen und nicht parallel verlaufende Brückenränder ausbildenden Friessteinen aufgelegt sind. Aufgrund der großen Dehnungsunterschiede in den Fugen und dem Vermeiden von temperaturbedingten hohen Zwängungen bei druckfestem Fugenverschluss wurden die Brüstungselemente mit offenen Stoßfugen geplant und ausgeführt.

Der Fahrbahnaufbau wurde speziell auf die Belange der Steinernen Brücke abgestimmt und folgt damit einer im Brückenbau unüblichen und in der Folge ungeregelten Bauweise: auf das historische und wo nötig ertüchtigte und mit einer Mörtelschicht profilierte Füllmauerwerk wurde eine Trägerschicht aus Gussasphalt aufgebracht, auf die eine Polyurethan-Abdichtung aufgespritzt wurde. Der Vorteil der Flüssigabdichtung ist eine hohe Dampfdiffusion, eine hohe Reißdehnung sowie die Anpassungsmöglichkeiten an die gekrümmte Geometrie der Brücke sowie an die Anschlüsse von Beleuchtung und Entwässerung. Die Folie, die für die Verwendung auf Bundesverkehrswegen zugelassen ist, wurde mit einer Deckschicht aus Gussasphalt vor Beschädigungen auf der Baustelle geschützt. Als eigentliche Tragschicht, die auch den geometrischen Höhenausgleich zwischen Brückenrand und -mitte bildet, fungiert wasserdurchlässiger Asphalt. Auf diesem wurden, getrennt durch ein Flies, die großformatigen Platten aus heimischem Granit in unterschiedlichen Formaten und Varietäten in ungebundener



**Bild 8** Regelquerschnitt der neuen Fahrbahn über dem Füllmauerwerk

Bauweise verlegt. Der Belag führt mit seinem geringen Fugenanteil schon einen Großteil des anfallenden Oberflächenwassers gezielt an die Rinnsteine und von dort an die historischen Wasserspeier ab.

Die Stein- und Fugmaterialauswahl, das Verlegemuster sowie die Oberflächenausbildung mussten mit den maßgebenden Entscheidungsträgern abgestimmt und bemustert werden. Hierzu wurde auf dem Bauhof des Tiefbauamts der Stadt Regensburg ein Musterbauwerk im Maßstab 1:1 errichtet. Wenn auch das Bauwerk nur einen idealisierten, weil begradigten Abschnitt zwischen zwei Pfeilern darstellte, so konnten dort doch die Gesamtwirkung von Brüstungshöhen, -dicken und Steinarten, die Wirkung und Nutzbarkeit von Schrammborden, das Erscheinungsbild von Belagsmustern, die Art der Aufbringung und die Wirkungsweise von verschiedenen Abdichtungen sowie unterschiedliche Leuchtenstandorte untersucht, mit den Entscheidungsträgern diskutiert und schließlich festgelegt werden (Bild 9).

## 7 Statisch-konstruktive Aspekte bei der Natursteininstandsetzung

Zu den Natursteininstandsetzungsarbeiten zählen sowohl die oberflächennahen steinrestauratorischen Instandsetzungen als auch die statisch relevanten Eingriffe in das Traggefüge.

Aus einer Schadenskartierung der sichtbaren Oberflächenschäden und den daraus abgeschätzten Tiefenschäden wurden die Instandsetzungsmaßnahmen festgelegt und in Plänen dargestellt. Nach Abnahme der bei der vorangegangenen Sanierung hergestellten Zementantragungen mussten dann die Maßnahmekartierungen überarbeitet und angepasst werden. Dies erfolgte vor Ort in enger Abstimmung zwischen den Steinrestauratoren und den Objekt- bzw. Tragwerksplanern.



**Bild 9**  
Musterbauwerk am  
Bauhof Nord des  
Tiefbauamts Regensburg

## 7.1 Baustoffe für die Instandsetzung

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen bei den Instandsetzungsarbeiten kam der Auswahl der Baustoffe und ihrer Einbaumethoden eine sehr hohe Bedeutung zu. Da mit dem Ziel einer behutsamen Instandsetzung nur so wenig wie möglich aber so viel wie nötig Bausubstanz ausgetauscht werden sollte, war das Thema Qualität der Baustoffe wesentlich höher angesiedelt als die Quantität. Dazu mussten die jeweiligen Reparaturbereiche mit den speziell dort anstehenden Anforderungen an die Baumaterialien abgeglichen werden. So wurden neue Bauteile wie Brüstungen, Fries- und Sockelsteine für die Brückenränder sowie der Belag aus neuen, in heimischen Steinbrüchen gewonnenen Graniten hergestellt. Für die Instandsetzungen des überwiegend aus Grünsandstein bestehenden Mauerwerks kamen dagegen artgleiche Steine von abgebrochenen Bauwerken zum Einsatz. Auch bei der zweiten im Mauerwerksbau wichtigen Komponente, dem Mörtel, war je nach Anforderung die Zusammensetzung, die Einbauart und je nach Sichtbarkeit auch das optische Erscheinungsbild entsprechend festzulegen.

### 7.1.1 Stein

Die Stadt Regensburg hatte auf ihrem Bauhof bruchraue Grünsandsteinquader eingelagert, die vom Abbruch einer Eisenbahnbrücke stammten und die optisch und petrographisch zu den in der Steinernen Brücke verbauten Steinen passten. Für Neusteine war aktuell kein Steinbruch erschlossen und für die Eröffnung eines neuen Steinbruchs hätte die dafür notwendige Abnahmemenge nicht ausgereicht. Der Regensburger Grünsandstein gilt als einer der inhomogensten Sandsteine in deutschen Abbaustätten. Hinzu kamen bei dem Bauhofmaterial noch eventuelle Vorschädigungen aus der Erstverwendung. Daher wurde zunächst von der LGA Nürnberg eine Vorklassifizierung mit Hilfe des Impact-Echo-Verfahrens vorgenommen und darüber die Quader in drei Druckfestigkeitskategorien eingeteilt:  $> 35 \text{ N/mm}^2$ ,  $25 - 35 \text{ N/mm}^2$ ,  $< 25 \text{ N/mm}^2$ . Stichprobenhaft durchgeführte Druckprüfungen an aus den Quadern entnommenen Bohrkernen bestätigten die Ergebnisse. Mit Hilfe der statischen Nachrechnungen konnten Bauteilbereiche benannt werden, in denen die Steine Mindestdruckfestigkeiten von  $25 \text{ N/mm}^2$  aufweisen mussten und Bereiche, in denen niedrige Festigkeiteigenschaften ausreichend waren.

Zur möglichst ressourcenschonenden Verwendung des Steinmaterials wurde ein Steinmanagement installiert: jeder Quader auf dem Bauhof wurde vermessen, eine theoretische Ausbeute ermittelt und eine haptische Klassifikation vorgenommen. Die Klassifizierung konnte aufgrund der Voruntersuchungen und der Kenntnis der Varianz auf die Gruppen »nicht verwendbar«, »hohe Druckfestigkeiten« und »niedrige Druckfestigkeiten« beschränkt bleiben. Entsprechend des Ergebnisses des ersten Sägeschnitts bei einem Quader wurde die Klassifizierung ggf. noch modifiziert. Erfreulicherweise bestätigten sich beim Sägen die Vorklassifizierungen und die geschätzte Ausbeute gut. So gelang es, mit den zur Verfügung stehenden Steinmengen vom Bauhof alle vier Bauabschnitte instand zu setzen.

Zur Reparatur der wenigen Kalksteine konnte im Gegensatz zum Grünsandstein Neumaterial nach entsprechender Vorbemusterung verwendet werden, da dieses nach wie vor in Steinbrüchen abgebaut wird.

### 7.1.2 Fugmörtel

Für das Nachverfügen wurden an den mineralischen Mörtel neben einem hydraulischen Abbindeverhalten und einer Mindestdruckfestigkeit noch weitere Anforderungen mit entsprechenden Grenzwerten gestellt. Hierzu zählen u. a. der dynamische Elastizitäts-Modul, der Wasseraufnahmekoeffizient und das Schwindmaß. Insbesondere aufgrund des hohen Versalzungsgrades der Brücke musste ein Mörtel mit einer möglichst hohen Porosität und damit einer entsprechenden Kapillaraktivität zum Einsatz kommen. Die Körnung des Zuschlags wurde über die unterschiedlichen, im Bauwerk vorkommenden Fugenbreiten festgelegt. Für das optische Erscheinungsbild erwies sich der Donauschwemmsand als am geeignetsten. Durch doppeltes Waschen wurden die Mehkkornanteile klein gehalten. In Zonen hoher Strömungsgeschwindigkeiten insbesondere bei Hochwasser sind dem Mörtel noch Basaltfasern beigemischt worden, die ihm eine höhere Zugfestigkeit gaben.

Für die speziellen Anforderungen und nach den ersten Anwendungserfahrungen im 1. Bauabschnitt erwies sich ein auf Romanzement basierendes mineralisches Bindemittel als das am besten geeignete. Neben dem Romanzement enthält das Bindemittel auch noch hochreaktive Puzzolane und Gerüstsilikate und folgt im Feinbereich einer karbonatischen Sieblinie. Der große Vorteil des Romanzements wird darin gesehen, dass sein grob entwickeltes, meist kartenhausartig verwachsenes Hydratgefüge eine hohe Kapillaraktivität bewirkt, was aus den hohen Wasseraufnahmekoeffizienten ablesbar ist. Neben dem baustellenlogistischen Vorteil einer schnellen Früh- und späten Endfestigkeit führen die im Verhältnis zu den Druckfestigkeiten niedrigeren Verformungskennwerte zu einer besseren mechanischen Verträglichkeit mit den bereits verbauten Materialien.

### 7.1.3 Stabilisierungsmörtel für das Füllmauerwerk

Nach dem Abnehmen des alten Fahrbahnbelaags lag das historische Füllmauerwerk offen, das durch die jahrelange Durchspülung mit Wasser und durch frühere Umbauten und Instandsetzungsphasen oberflächennah aufgelockert war. Um auf dieses Mauerwerk wieder eine tragfähige Fahrbahn aufbauen zu können, musste eine Stabilisierung des Mauerwerks mit einem Mörtel vorgenommen werden, der von den mechanischen Kennwerten her verträglich mit dem Füllmauerwerk war und der den vorhandenen historischen Bindemitteln strukturell nahe kam. Hierfür wurde zu Beginn der Instandsetzungsmaßnahmen ein Kalkmörtel aus frischem hochhydraulischen Stückkalk als Brandkalk ausgewählt, der entweder als Fertigprodukt geliefert oder direkt auf der Baustelle hergestellt werden kann. Die niedrigen Frühfestigkeiten und das sehr langsame Abbindeverhalten schränkten allerdings den Einsatz dieses Mörtels zu sehr ein. Alternativ kam dafür ein portlandzementfreier Fertigmörtel auf der Bindemittelbasis von Larnit-Zement

(Belit), NHL Kalk, Puzzolanen und karbonatischen Füllstoffen zum Einsatz. Er ist leicht verarbeitbar, besitzt eine hohe Frühfestigkeit und damit im jungen Alter schon eine gewisse Frostbeständigkeit. Seine physikalischen und mechanischen Eigenschaften erfüllten gut die Anforderungen an den Füllstoff für ein z. T. noch romanisches Gussmauerwerk.

#### 7.1.4 Injektionsgut

Durch die fehlende Abdichtung und die damit verbundene Durchspülung mit z. T. salzbelastetem Wasser, durch die Sprengung von vier Bögen und die damit einhergehenden Erschütterungen, durch das Einbrechen von Sprengkammern in vier Pfeiler aber auch durch die Erschütterungen und Verformungen aus Verkehr und Temperatur sowie durch frühere bauliche Veränderungen waren im Füllmauerwerk Hohlräume entstanden, die zunehmend zu Schäden am Bauwerk führten. Daher mussten Hohlräume, Spalten und große Risse druckfest geschlossen werden. Hierfür wurden mineralische, schwindarme und bauwerksverträglichen Bindemittelmischungen verpresst. Zur Anwendung kam eine auf Larnitzement und hochwertigen Puzzolanen aufbauende Bindemittelmischung, der Schichtsilikate zur Erhöhung der Fließfähigkeit beigemischt wurden. Auch dieses Verpressgut erfüllte aufgrund seiner hohen Kapillaraktivität und den moderaten Steifigkeitswerten die gestellten Anforderungen.

#### 7.1.5 Zugelemente

Bei geringen, zukünftig erwarteten Zugkräften, bei den steinrestauratorischen Arbeiten und für Sicherungen im Bauzustand kamen Injektionsanker (Klebeanker) mit bauaufsichtlicher Zulassung zum Einsatz. Hierbei wird der Verbund zwischen nichtrostenden Gewindestäben bis zu Durchmessern von 10 mm und den Steinen über eingepresstes Epoxidharz hergestellt. Höhere statische Anforderungen wurden mit der bewährten Verpressankertechnik erfüllt: nichtrostende Gewindestäbe mit Durchmessern zwischen 12 mm und 20 mm wurden zentrisch in Bohrlöcher mit im Mittel 50 mm Durchmesser eingelegt und dort mit einem mineralischen Bindemittel verpresst, um den Verbund zwischen dem Zugelement und Mauerwerk herzustellen. Es wurde Injektionsgut auf der Basis von Portlandzementen verwendet, da über die hohen Endfestigkeiten hohe Ausziehwiderstände der Anker erreicht werden konnten.

Die vom Gewölbemauerwerk abgerissenen Schildbögen wurden mit Hilfe von Zugankern miteinander verbunden und über eine leichte Vorspannung gegen das Gewölbemauerwerk gedrückt. In jedem Brückenbogen sind dafür vier bis fünf Anker in der unteren Gewölbeschale aus Quadermauerwerk über die gesamte Brückenbreite eingebaut worden (Bild 10). Hierzu waren zielgerichtete Kernbohrungen mit 86 mm Durchmesser herzustellen. Die Bohrlöcher wurden jeweils an deren Enden auf eine Länge von 20 cm durch Sackbohrungen auf 150 mm Durchmesser aufgeweitet, um darin die Spannanker an Unterlagscheiben mit einem Durchmesser von 130 mm zu verankern (Bild 11). Die nichtrostenden Gewindestangen mit einem Durchmesser von 24 mm wurden nach dem Einbau

auf 50 kN vorgespannt und der Verbund zwischen Anker und Mauerwerk mit einem speziellen Injektionsgut auf Portlandzementbasis mit hohem Sulfatwiderstand über Verpressen hergestellt. Die Bohrlöcher sind mit 10 cm dicken Vierungen verschlossen worden und damit nur noch von Fachkundigen wahrnehmbar.

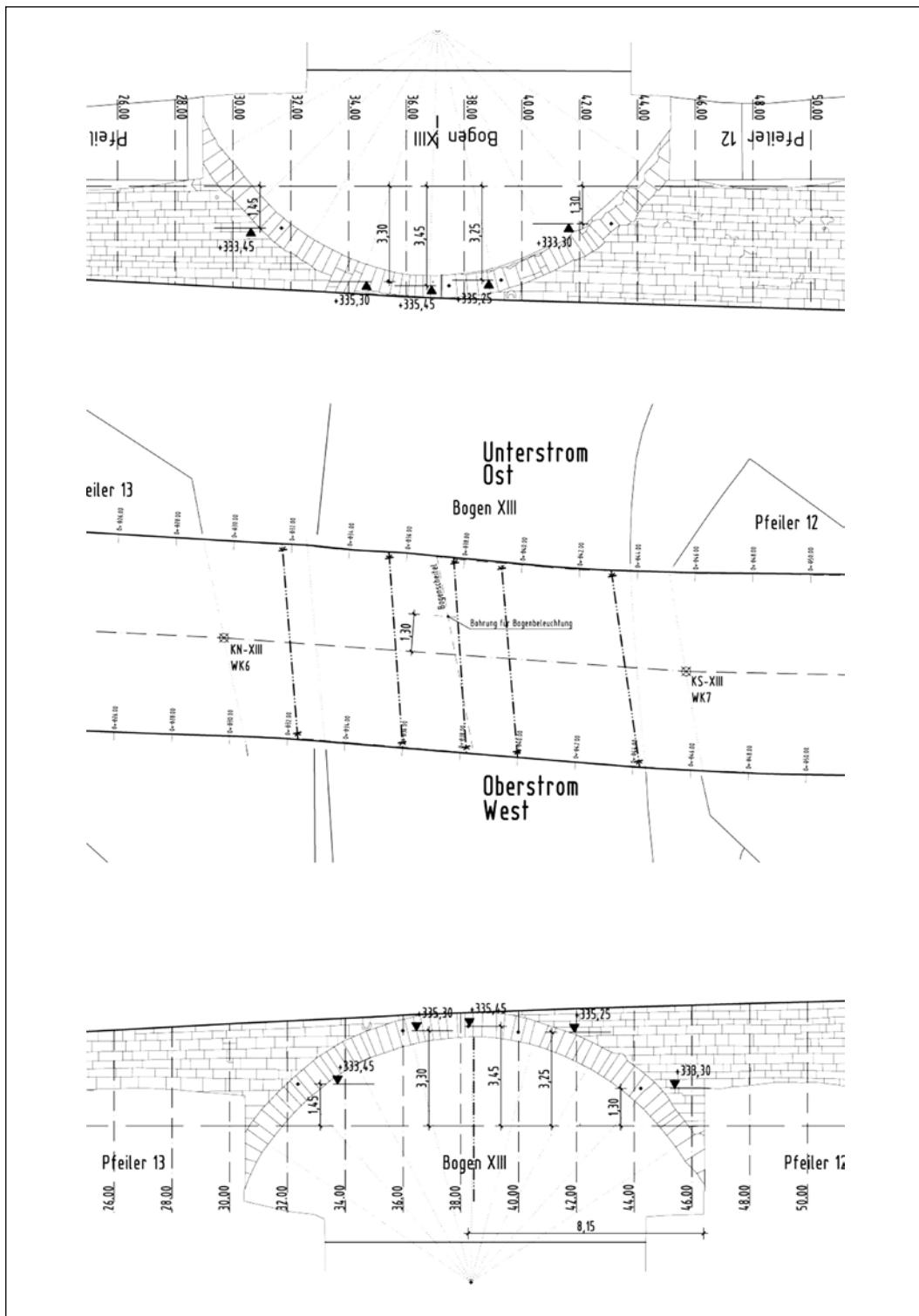


Bild 10 Spannankerplan

Die Querverspannung der gemauerten Bögen war schon im Bauzustand als Interimssicherung nötig. Während im 1. Bauabschnitt noch dafür zusätzliche, außen liegende Verspannungen eingebaut wurden, konnten im 3. und 4. Bauabschnitt die Querverspannungen in den Bohrlöchern auch schon für die Bauzustandssicherung genutzt werden, allerdings noch ohne planmäßige Vorspannung. Im 2. Bauabschnitt waren wegen der dort vorhandenen Betonbögen keine Querverspannungen notwendig.

## 7.2 Steininstandsetzungen

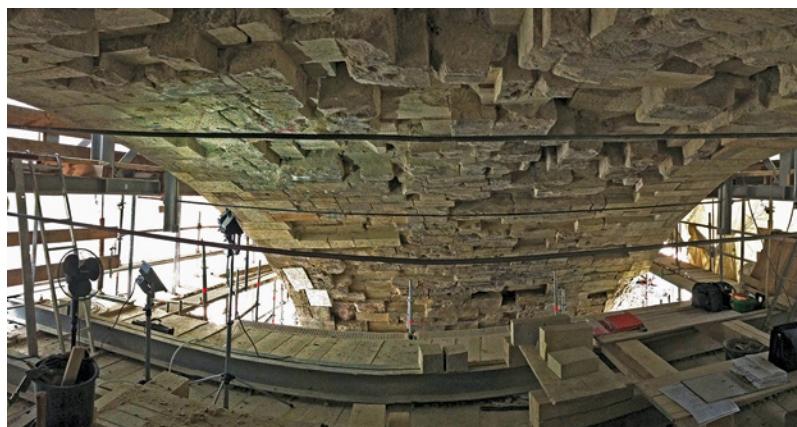
Bei den Steininstandsetzungen wurde ebenfalls das Ziel verfolgt, ein Maximum der vorhandenen Steinsubstanz zu erhalten und damit das Volumen der neu einzubauenden Steine klein zu halten. Je nach Art, Lage, Schädigungsgrad und zukünftiger Beanspruchung der Steine kamen unterschiedliche Steinreparaturen zum Einsatz: Vierungen, Aufbauquader, Kronen und Neuteile.

Während *Vierungen* mit Klebepressfugen an alle Berührungs punkte mit dem »Mutterstein« angeschlossen wurden, sind *Aufbauquader* auf die planebene Oberfläche eines Steinrumpfes mit Natursteinklebern oder Polymerharzen aufgeklebt und mit den Umgebungsbereichen druckfest verfügt worden (Bild 12).



**Bild 11**

Ankerköpfe für Quer-  
vorspannung vom Einbau  
der Vierungen als Bohr-  
lochverschluss



**Bild 12**

Bauzustand Bogen XII:  
Rohzustand, vorbearbei-  
tete Steinoberflächen,  
Aufbauquader, Tiefen-  
verzahnungen

Bei sehr wenigen, besonders wertvollen Kalksteinen aus der Römerzeit, deren Schädigungen in eine Tiefe reichten, die zu einer Instandsetzung zwangen, kamen *Kronen* zum Einsatz. Diese unterscheiden sich von den Aufbauquadern dadurch, dass der Steinrumpf nur so weit rückgearbeitet wird, dass eine mittels eines dreidimensionalen Bruchflächenscans aus einem Rohblock ausgefräste Krone auf die Oberfläche passgenau aufgeklebt werden kann (Bild 13).

Vollständige Quadere als *Neuteile* wurden dann eingebaut, wenn sich aufgrund des hohen und tiefen Schädigungsgrades mit den vorgenannten Methoden keine funktionsfähige und nachhaltige Reparatur erreichen ließ. Der Einbau eines Neuteils erforderte je nach Lage und Beanspruchungen eine statisch abgestimmte Einbaulogistik.

Bei der Steininstandsetzung mussten die Einbindetiefen und damit die Tiefenverzahnungen aber auch die Einbaureihenfolgen auf die Ergebnisse der statischen Berechnung abgestimmt werden. Der Tragwerksplaner legte dabei fest, bis zu welcher Tiefe die Steininstandsetzung rein restauratorisch und ab welcher Tiefe die Eingriffe sorgsam statisch zu planen und zu überwachen sind (Bild 14).



**Bild 13**  
»Krone« aus Kalkstein vor  
Einbau (aus Block mittels  
3D-Scan gefräst)



**Bild 14**  
Einbau Neuteil

Durch die dargestellte behutsame Vorgehensweise betrug der Anteil der erneuerten Steinvolumina etwa 0,5 % bezogen auf die Gesamtmenge der verbauten Steine.

## 8 Baustellenlogistik

Eine Teilung der Instandsetzungsarbeiten in vier Bauabschnitte war bereits in einer frühen Planungsphase vorgesehen, jedoch mussten aus verschiedenen Gründen die Abschnittsgrenzen mehrfach verändert und z. T. überlappt werden (Bild 15). Es war nicht möglich, die Bauabschnitte einfach von Nord nach Süd oder von Süd nach Nord aneinander angrenzend zu takten. So musste beispielsweise beim Rückbau der alten Fahrbahn das historische Füllmauerwerk vor eindringendem Regenwasser geschützt werden, ohne dass dadurch aber weitere Ausführungsarbeiten behindert wurden. Der Schutz wurde über eine Einhausung des jeweiligen Bauabschnitts erreicht, in dem noch das alte Füllmauerwerk vorhanden war. Beim zweiten Bauabschnitt konnte wegen des durch den Wiederaufbau nach dem zweiten Weltkrieg veränderten Konstruktionsgefüges über den Betonbögen auf die Einhausung verzichtet werden.

Damit die Verbindung zwischen Stadtamhof und Altstadt für Fußgänger und Radfahrer während der achtjährigen Bauzeit aufrecht erhalten bleiben konnte, leiteten versetzbare Behelfsstege den Verkehr um den jeweiligen Bauabschnitt herum. Die Behelfsstege wurden speziell für das Bauvorhaben als Stahlfachwerke so konstruiert, dass trotz der z. T. unterschiedlichen Spannweiten eine Wiederwendbarkeit möglich war. Die Behelfsstege wurden von Fachwerkürmern getragen, die jeweils auf den unterstromseitigen Beschlächten gegründet waren (Bild 16).

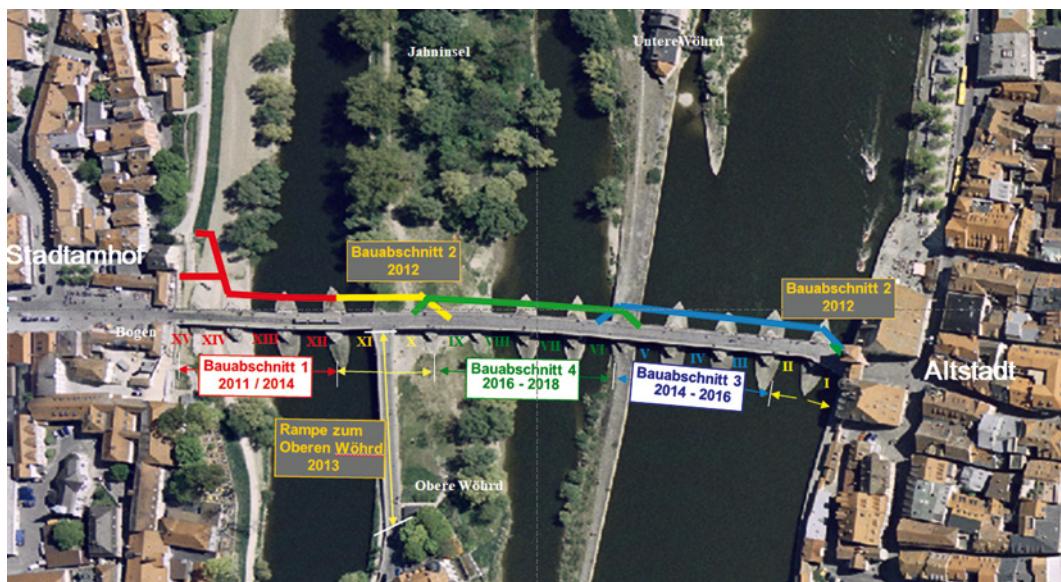


Bild 15 Übersicht über die Bauabschnitte

Für die Instandsetzungsarbeiten unter den Bögen über Wasser wurden Arbeitsgerüste mit hoher Tragfähigkeit konzipiert, die freitragend der Bogenform in Stufen folgten und die an stählernen Fachwerkträgern aufgehängt waren. Die Fachwerkträger wurden jeweils an den Eisbrechern aufgelagert (Bild 17).

## 9 Ausführungszeiten und Kosten

Die Ausführungsabfolge der verschiedenen, z. T. witterungsabhängigen Gewerke, die bei einer Brücke zwangsläufig eingeschränkte Andienung und Lagermöglichkeiten sowie die Hochwassergefahr waren bei der Planung und Ausschreibung der Bauabschnitte entsprechend zu berücksichtigen. Die Natursteininstandsetzungsarbeiten mussten aufgrund der verwendeten mineralischen Baustoffe in der Regel zwischen November und April unterbrochen werden, um ein Auffrieren der frisch eingebrachten Baustoffe zu vermeiden. Da diese Arbeitsunterbrechungen von der Dauer der Frostperioden abhängig waren, ließen sie sich nur grob eintakten. Auch konnte bei der Wiederaufnahme der Arbeiten aufgrund der z. T.



**Bild 16**  
Behelfssteg vor dem  
eingehausten Bauabschnitt



**Bild 17**  
Montage der Hängegerüste  
an Gerüstfachwerkträgern

logistischen Abhängigkeiten selten exakt an der Stelle weitergemacht werden, an denen sie vor dem Winter eingestellt wurden. Dadurch verlängerten sich z.T. die Ausführungszeiten.

Aufgrund anfänglicher Stillstandszeiten und Bauunterbrechungen aber auch aufgrund größerer Tiefenschädigungen erwies sich die ursprünglich angesetzte Bauzeit von vier Jahren als viel zu kurz. Die Instandsetzungsarbeiten begannen 2010 und konnten im Oktober 2018 vollständig abgeschlossen werden. Dafür wurden aber die ursprünglich geschätzten Gesamtkosten für die Instandsetzungsarbeiten von 20 Mio. EUR eingehalten.

## **Quellen und weiterführende Literatur**

- [1] Zeitler, A.; Schild, J.; Jacobi, MZ, Stadtverkehr, Lastauto + Omnibus, RVB, Archiv
- [2] Wenzel, F. (Hrsg.): Historisches Mauerwerk. Untersuchen, Bewerten und Instandsetzen. Empfehlungen für die Praxis, Sonderforschungsbereich 313, Universität Karlsruhe (TH), 2000
- [3] Neuwald-Burg, C.; Egermann, R.: Grundlagen für Standsicherheitsnachweise an bestehendem Natursteinmauerwerk. In: Natursteinbauwerke Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen. Arbeitsheft des Landesamts für Denkmalpflege Baden-Württemberg, Hrsg. Patitz, G; Grassegger, G.; Wölbart, O.; Fraunhofer IRB Verlag 2014, S. 83–90
- [4] Heilmeier, K.: Die Steinerne Brücke zu Regensburg im 19. und 20. Jahrhundert. Ansprüche des Industriealters an ein Werk romanischer Ingenieurbaukunst. In: Denkmalpflege in Regensburg. Hrsg. Stadt Regensburg, Amt für Archiv und Denkmalpflege, Abteilung Denkmalpflege, Band 11, Verlag Friedrich Pustet, 2009, S. 119–181
- [5] Egermann, R.: Aspekte zur Instandsetzung der Steinernen Brücke aus objekt- und tragwerksplanerischer Sicht. In: Die Steinerne Brücke 2010–2018. Denkmalgerechte Sanierung des Regensburger Wahrzeichens. Festschrift Stadt Regensburg, 2018, S. 159–183

## **Bildquellen**

Bilder 2, 4–13, 15: Büro für Baukonstruktionen

Bild 3: Zeitler, Arldt; Schild, J.; Jacobi, MZ, Stadtverkehr, Lastauto + Omnibus, RVB, Archiv Kirchner (Darmstadt)

Bilder 1, 14, 16–17: Stadt Regensburg

**Marcus Assing, M.Sc.**

Marx Krontal Partner GmbH Weimar / Hannover  
Zum Hospitalgraben 2, 99425 Weimar  
marcus.assing@marxkrontal.com  
www.marxkrontal.com

**Dipl.-Ing. Andreas Bewer**

Beratender Ingenieur  
Bewer Ingenieure  
Hauffstr. 45, Neuhausen a.d.F. (Region Stuttgart)  
andreas@bewer.de  
www.bewer.de

**Dr.-Ing. Andreas Bruschke**

MESSBILDSTELLE  
Gesellschaft für Photogrammetrie und Architekturvermessung mbH  
Altplauen 19, 01187 Dresden (Bienertmühle)  
andreas.bruschke@messbildstelle.de  
www.messbildstelle.de

**Prof. Dr.-Ing. Ralph Egermann**

Beratender Ingenieur  
BfB Büro für Baukonstruktionen GmbH  
Rastatter Str. 25, 76199 Karlsruhe  
ralph.egermann@bfb-ka.de  
www.bfb-ka.de

**Dr. Michael Hascher**

Referent für Kulturdenkmale der Industrie und Technik  
Regierungspräsidium Stuttgart, Landesamt für Denkmalpflege  
Berliner Straße 12, 73728 Esslingen a.N.  
michael.hascher@rps.bwl.de

**Falk Hoffmann-Berling, M.Sc.**

Marx Krontal Partner GmbH Weimar / Hannover  
Uhlemeyerstraße 9+11, 30175 Hannover  
falk.hoffmann-berling@marxkrontal.com  
www.marxkrontal.com

**Prof. Dr.-Ing. Stefan M. Holzer**

Professor für Bauforschung und Konstruktionsgeschichte  
Institut für Denkmalpflege und Bauforschung (IDB),  
Departement Architektur (D-ARCH), ETH Zürich  
Wolfgang-Pauli-Strasse 27, 8093 Zürich  
holzer@arch.ethz.ch

**Dipl.-Ing.(FH) Erik Meichsner**

Marx Krontal Partner GmbH Weimar / Hannover  
Zum Hospitalgraben 2, 99425 Weimar  
erik.meichsner@marxkrontal.com  
www.marxkrontal.com

**Dr.-Ing. Gabriele Patitz**

Beratende Ingenieurin  
Ingenieurbüro für Bauwerksdiagnostik und Schadensgutachten IGP  
Alter Brauhof 11, 76137 Karlsruhe  
mail@gabrielepatitz.de  
www.gabrielepatitz.de



Schriftenreihe zur Denkmalpflege  
Herausgegeben von Erhalten historischer Bauwerke e. V.  
Band 5

