

BAUSUBSTANZ

Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege



THEMA: BETONINSTANDSETZUNG

Instandsetzung des Laufmühle-Viadukts

- Die Geschichte der Wieslaftalbahn
- Substanzorientiertes und kostenoptimiertes Instandsetzungskonzept
- Bauradar zur Bestandsbewertung
- Ermittlung der Belastbarkeit und Nutzungsnachweise
- Objektplanung zur Umsetzung des Instandsetzungskonzepts
- Der Förderverein Welzheimer Bahn



Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft
für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V.

Fraunhofer IRB  Verlag

Sonderheft 1

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 abrufbar.

BAUSUBSTANZ

Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerksinstandsetzung und Denkmalpflege

ISSN 2190-4278

ISBN (Print) 978-3-7388-0013-5

ISBN (E-Book) 978-3-7388-0035-7

© Fraunhofer IRB Verlag, 2017

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Tel.: 0711 970-2500

Fax: 0711 970-2508

E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Urheber- und Verlagsrechte:

Alle in dieser Publikation veröffentlichten Beiträge sind urheberrechtlich geschützt. Jegliche
Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung
des Verlages unzulässig und strafbar.

Haftungsausschluss:

Die in dieser Publikation veröffentlichten Beiträge wurden nach bestem Wissen und Gewissen
geprüft. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann jedoch nicht übernommen
werden. Eine Haftung für etwaige mittelbare oder unmittelbare Folgeschäden oder Ansprüche
Dritter ist ebenfalls ausgeschlossen. Namentlich gekennzeichnete Beiträge geben nicht
notwendigerweise die Meinung der Redaktion wieder.

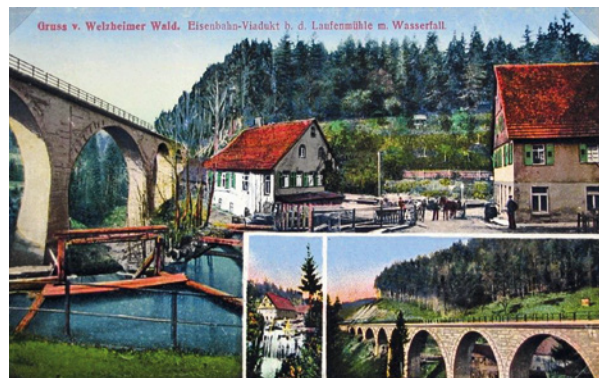
Alle Rechte, Preisänderungen und Irrtum vorbehalten. Fraunhofer IRB Verlag

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

Mit diesem Sonderheft der BAUSUBSTANZ mit Themenschwerpunkt Betoninstandsetzung wollen wir Ihnen umfassende Informationen über die Bestandserfassung, Bestandsbewertung und Sanierung des über 100 Jahre alten denkmalgeschützten Laufenmühle-Viadukts geben. Das Viadukt ist mit zwei weiteren vergleichbaren Bogenbrücken Bestandteil der historischen Bahnstrecke der Schwäbischen Waldbahn. Heute wird diese für den Museums- und Freizeitverkehr mit historischen Dampf- und Dieselmotoren von Schorndorf über Rudersberg nach Welzheim befahren. Die Schwäbische-Wald-Bahn GmbH ist als Eisenbahninfrastrukturunternehmen für die Unterhaltung des 11 Kilometer langen Streckenabschnitts zwischen Rudersberg und Welzheim verantwortlich. Gesellschafter sind zu 60 Prozent die Stadt Welzheim und zu 40 Prozent der Förderverein Welzheimer Bahn e.V.

Die Sanierung des Laufenmühle-Viadukts hat sich als eine große Herausforderung erwiesen, sowohl in technischer als auch in finanzieller Hinsicht. Eine erste Sanierungsplanung sah zur statischen Sicherung eine ergänzende, ca. 30 bis 50 cm starke Betonvorsatzschale unterhalb der Bögen vor, ein Fahrverbot ab 2016 für die Zeit der Sanierungsarbeiten sowie Kosten von geschätzten 3,5 Mio. Euro. Der Bauherr entschied sich jedoch dazu, ein interdisziplinäres Team aus Bauingenieuren, Bauwerksprüfern, Geophysikern, Bauchemikern und Baustoffingenieuren mit einer Überarbeitung des bestehenden Konzeptes zu beauftragen. Es erfolgten ergänzende und erweiternde Voruntersuchungen zur Bestandsbewertung. Durch den flächigen Einsatz von Bauradar, ausgeführt durch das Ingenieurbüro IGP Dr.-Ing. Gabriele Patitz Karlsruhe, konnten geschädigte und ungeschädigte Bogenbereiche auskartiert und über gezielte Materialproben verifiziert werden. Auf dieser Basis war eine innovative Herangehensweise bei der statischen Nachweisführung durch das beauftragte Ingenieurbüro Rothenhöfer Karlsruhe möglich, welche in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Andreas Gerdes vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der IONYS AG Karlsruhe erfolgte. Für die nur noch lokal auszuführenden Verpressarbeiten wurde von der IONYS AG das geeignete Verpressmaterial konzipiert und am Objekt dessen Praktikabilität getestet. Der Erfolg der Verpressungen wurde mit Bauradar kontrolliert und dokumentiert.

Positiv ist aus Bauherrensicht sowohl, dass diese Herangehensweise sich kostengünstiger zeigt, als auch, dass das Denkmal in seinem äußeren Erscheinungsbild weitgehend unverändert bleibt. Sogar die Befahrbarkeit der Strecke für 2016 sowie während der Instandsetzungsphase konnte ermöglicht werden. Die auf der Basis der erweiterten Voruntersuchungen angepasste und optimierte



Projektplanung und Bauausschreibung durch die BWN Bauingenieure Albstadt hat eine aktualisierte Kostenkalkulation von rund 2,2 Mio. Euro bestätigt.

Mit der Sanierung wurde im April 2017 begonnen. Die Arbeiten an den ersten beiden Bögen sind inzwischen erfolgreich fast abgeschlossen. Die gute Qualität in der Bauausführung durch die Firma Bauschutz Asperg wurde durch wiederholte flächige Untersuchungen mit Bauradar bestätigt. Dies gibt dem Bauherrn Sicherheit hinsichtlich der Qualität der ausgeführten Baumaßnahmen. Schließlich wird eine Nutzungsdauer von vielen weiteren Jahren angestrebt.

Der Mut, weiteres Geld in die Hand zu nehmen und ein schon bestehendes Instandsetzungskonzept zu überdenken und zu ändern, hat sich gelohnt. Neben einer nicht unerheblichen Kostenreduzierung von ca. 1,2 Mio. Euro kann dieses technische Denkmal in seiner Substanz, Funktion und dem äußeren Erscheinungsbild erhalten werden. Mit dieser bestandsorientierten und auf das wirklich notwendige Ausmaß an Eingriffen erfolgten Ertüchtigung werden auch die bisherigen Alterungsspuren aus der Bau- und Lebensgeschichte des Viadukts sichtbar bleiben. Die nun anfallenden Instandsetzungskosten lassen sich durch den innovativen und interdisziplinären Einsatz moderner Verfahren und Methoden erheblich reduzieren. Dank der Unterstützung des Landes Baden-Württemberg, des Bundes, des Rems-Murr-Kreises und der Stadt Welzheim ist die Finanzierung abgesichert. Dafür herzlichen Dank. Ganz besonders danken wir aber allen beteiligten Ingenieuren, Spezialisten und Ratgebern, die uns begleitet, ermutigt und unterstützt haben, diesen Weg zu gehen, einschließlich unseres Brückensachverständigen Dipl.-Ing. Wolfgang Eder und dem Förderverein Welzheimer Bahn e.V. Wir alle verbinden dies mit der Hoffnung, dass die in diesem Sonderheft beschriebene Herangehensweise und Erfahrungen für andere Vorhaben und Maßnahmen nützliche Hinweise und Erkenntnisgewinne geben können.

Wenn Sie Lust verspüren, die bis voraussichtlich 2018 laufenden Maßnahmen selbst vor Ort zu besichtigen und dies noch mit einer historischen Eisenbahnfahrt verbinden wollen, darf ich Sie jetzt schon sehr herzlich hier im Schwäbischen Wald und in Welzheim willkommen heißen.

Mit herzlichen Grüßen

Reinhold Kasian
Geschäftsführer der Schwäbischen-Wald-Bahn GmbH



Die Geschichte der Wieslaufalbahn _____ 6

Andreas Gerdes, Tobias Bürkle, Lorena Rombach

Substanzorientiertes und kostenoptimiertes Instandsetzungskonzept für das Laufenmühle-Viadukt _____ 9

Gabriele Patitz

Bauradar zur Bestandsbewertung am Laufenmühle-Viadukt _____ 22

Hermann Rothenhöfer, Bettina Marquardt

Ermittlung der Belastbarkeit und Nutzungsnachweise historischer Brückenbauwerke am Beispiel der Eisenbahnbrücke Laufenmühle-Viadukt _____ 32

Guido Buschbacher, Alexander Amann

Objektplanung zur Umsetzung des Instandsetzungskonzepts am Laufenmühle-Viadukt _____ 43

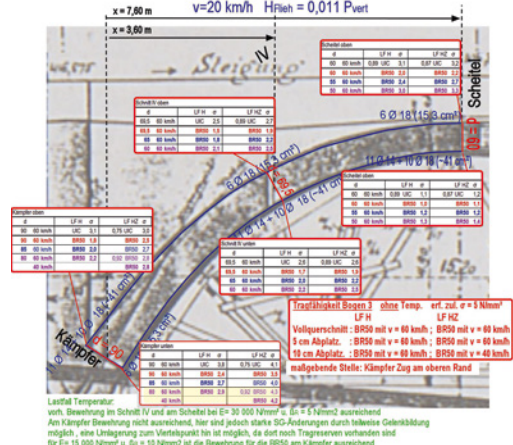
Der Förderverein Welzheimer Bahn

Reaktivierung und Erhalt der denkmalgeschützten Bahnstrecke Rudersberg–Welzheim als Tourismusbahn _____ 47



32 Bogen 3 - Lst = 15,2 m

$R = 300 \text{ m} \Rightarrow v=60 \text{ km/h}$ $H_{\text{rieh}} = 0,095 \text{ Pvert}$
 $v=40 \text{ km/h}$ $H_{\text{rieh}} = 0,042 \text{ Pvert}$
 $v=20 \text{ km/h}$ $H_{\text{rieh}} = 0,011 \text{ Pvert}$



Die Geschichte der Wieslaufalbahn



Planung und Bau

Ausschlaggebend für den Bau der Strecke waren ab 1890 Bestrebungen aus Welzheim, die Region zu erschließen, da die wirtschaftliche Situation wegen der peripheren Lage Welzheims nicht sehr günstig war. Schließlich setzte sich 1905 die Linienführung Schorndorf–Rudersberg–Welzheim in Normalspurweite durch. Die Kosten des Bahnbaus ohne Grunderwerb wurden auf insgesamt knapp 3 Mio. Mark veranschlagt.

Entwicklung bis 1945

Die Königlich Württembergischen Staatseisenbahnen eröffneten am 28. November 1908 den ersten Abschnitt bis Rudersberg sowie am 25. November 1911 das Reststück bis Welzheim. Welzheim war zu diesem Zeitpunkt die letzte württembergische Oberamtsstadt, die einen Bahnanschluss erhalten hatte. Nach dem Ersten Weltkrieg ging die Strecke in das Eigentum der 1920 gegründeten Deutschen Reichsbahn über. Ab den 1920er-Jahren verkehrten im Sommer sonntags über die Remstalbahn durchgehende

Ausflugszüge zwischen Stuttgart und Welzheim; die Fahrt-dauer betrug hierbei rund zwei Stunden. In der NS-Zeit veranstaltete die Organisation Kraft durch Freude ebenfalls Ausflugsfahrten. Erst während dieser Zeit erlebte die Wieslaufalbahn einen wirtschaftlichen Aufschwung.

Die Zeit unter der Deutschen Bundesbahn (1945–1993)

Gegen Kriegsende, im April 1945, wurde der Zugverkehr komplett eingestellt, aber Ende 1945 wieder aufgenommen. Ende der 1940er-Jahre wurde wieder ein bis nach Stuttgart durchgehendes Zugpaar eingeführt. Dieser Zug brachte vor allem Berufspendler morgens von Welzheim in die württembergische Hauptstadt und abends wieder zurück. Um etwa 1970 wurde diese Verbindung eingestellt. Etwa zur selben Zeit begann die Deutsche Bundesbahn, den Fahrplan immer mehr auszudünnen und Züge sukzessive durch Bahnbusse zu ersetzen. Nach Welzheim fuhr schließlich nur noch jeweils ein Personenzugpaar und ein Güterzugpaar täglich. Später wurden diese letzten beiden Züge zu



einem Güterzug mit Personenbeförderung zusammengelegt, der nur nachmittags verkehrte und damit weder für Schüler noch für Berufstätige attraktiv war; erschwerend kam die durch Rangieraufenthalte bedingte lange Fahrzeit hinzu. Der Betrieb war so nicht länger rentabel und der Personenverkehr auf dem auch »Bergstrecke« genannten Streckenabschnitt zwischen Rudersberg und Welzheim wurde mit Beginn des Sommerfahrplans 1980 ganz eingestellt; letzter Betriebstag des gemischten Zuges war der 30. Mai 1980. 1984 stellte die Deutsche Bundesbahn beim Regierungspräsidium Stuttgart den Antrag auf Einstellung des Gesamtverkehrs auf dem Abschnitt zwischen Rudersberg und Welzheim, um auch den Güterverkehr nicht mehr auszuführen. 1986 folgte auch der Antrag auf Einstellung des Gesamtverkehrs im Talabschnitt zwischen Schorndorf und Rudersberg. Beim verkehrswissenschaftlichen Institut an

der Universität Stuttgart wurde daraufhin ein Gutachten in Auftrag gegeben. Der Verkehrswissenschaftler Gerhard Heimerl empfahl 1987 entgegen den Plänen der Deutschen Bundesbahn den Weiterbetrieb des Personenverkehrs auf dem Teilstück Schorndorf–Rudersberg. Nachdem sich am 5. April 1988 nach längeren Regenfällen beim Grauhaldenhof (Kilometer 12,9) ein Erdbeben mit Gleisverwerfung ereignet hatte, stellte die Bahn den Gesamtbetrieb auf der Bergstrecke ohne formelle Genehmigung ein.

Regionalisierung und Reaktivierung des Abschnitts Rudersberg–Oberndorf (1993–2010)

Nachdem den in den Jahren 1984 bzw. 1986 erfolgten Anträgen der Deutschen Bundesbahn auf Einstellung des Verkehrs auf der Gesamtstrecke nicht stattgegeben wurde,



WELZHEIM – Champagnerluft seit Römerzeiten

Erlebnisreich!

Eine Fahrt mit den historischen Dampf- und Dieseleisenbahnen der Schwäbischen Waldbahn



Sehenswert!

UNESCO-Welterbe Limes, Archäologischer Park Ostkastell, Museum mit Römerabteilung, Sternwarte, Poetenpfad

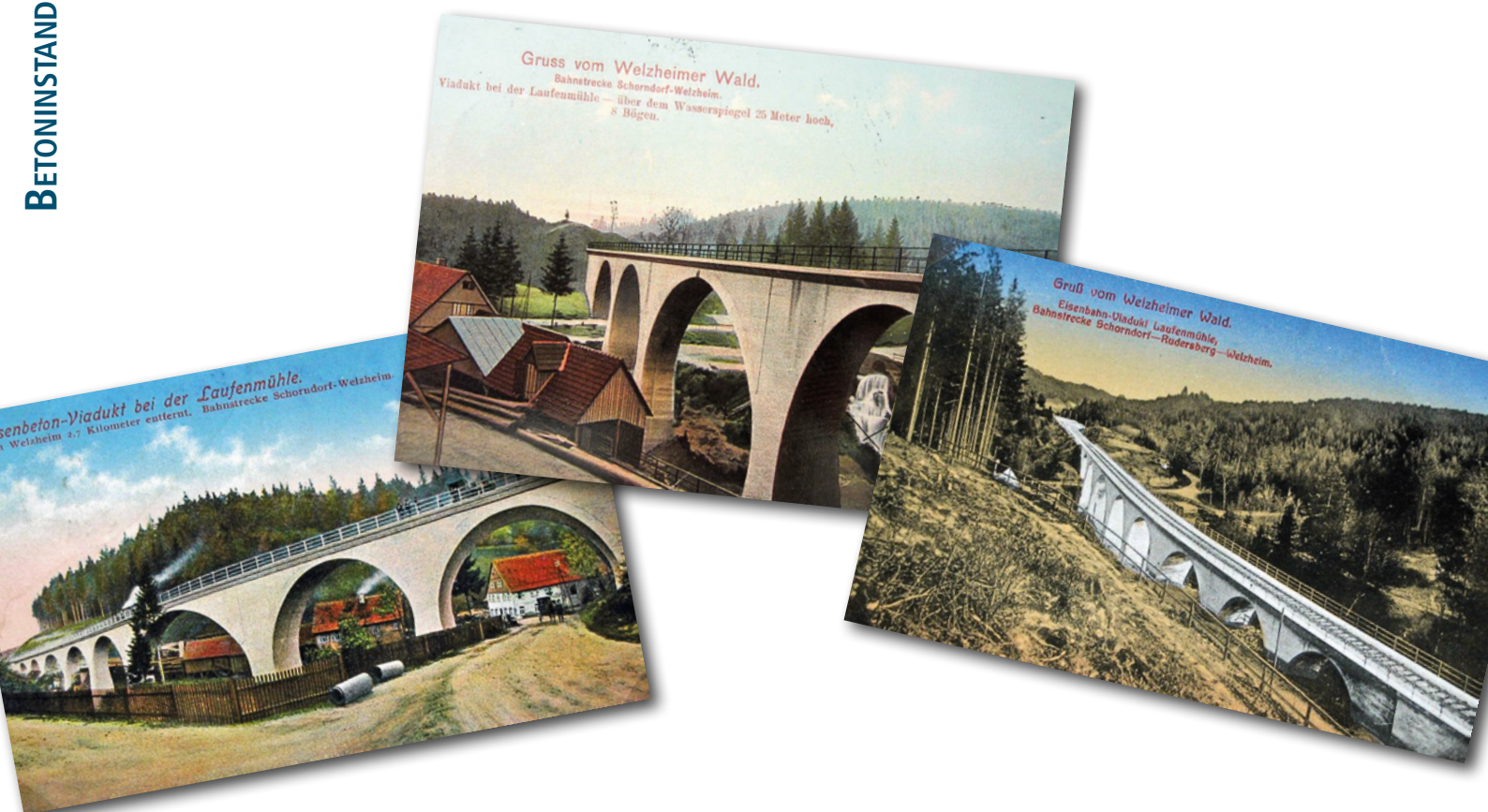
Sportlich!

Herrliche Rad-, E-Bike- und Wanderwege, Mountainbiketrails, Mühlen- und Limeswanderweg, Geologischer Pfad, Planetenweg, 80 km Loipennetz

Freizeit-Tipps!

Aichstruter Stausee, Eins + Alles Erfahrungsfeld der Sinne, Schwabenpark

Stadt Welzheim | Kirchplatz 3 | 73642 Welzheim | Telefon 07182 8008-15 | www.welzheim.de



die Deutsche Bundesbahn jedoch nach wie vor kein Interesse am Weiterbetrieb der Bahn zeigte, erfolgte am 22. Dezember 1992 die Gründung des Zweckverbands Verkehrsverband Wieslautalbahn (ZVWV), um den Zugverkehr im Wieslautal aufrechtzuerhalten und zu privatisieren. Im Jahr 1993 übertrug die Deutsche Bundesbahn die Strecke an den Zweckverband und beteiligte sich mit ca. 4,7 Mio. D-Mark an der Sanierung der übergebenen Strecke sowie mit weiteren 1,8 Mio. D-Mark an den notwendigen Kosten für die Aufrechterhaltung und Verbesserung des Personenverkehrs und die Fortführung des Güterverkehrs. Das Land Baden-Württemberg steuerte 12 Mio. D-Mark für den Ausbau der Infrastruktur und die Anschaffung neuer Fahrzeuge bei. Dadurch konnte 1995 die Württembergische Eisenbahn-Gesellschaft (WEG) im Auftrag des Zweckverbands den Betrieb auf dem Streckenteil Schorndorf-Rudersberg übernehmen. Da Welzheim dem Verband zunächst nicht beigetreten war, konnte der Streckenabschnitt von Rudersberg nach Welzheim zunächst nicht modernisiert werden.

Museumsbahn (seit 2010)

Eine endgültige Stilllegung und Entwidmung der »Obere Wieslautalbahn« genannten Teilstrecke bis Welzheim konnte über Jahrzehnte hinweg stets verhindert werden. Der 2000 gegründete Förderverein Welzheimer Bahn e.V. hatte es sich fortan zur Aufgabe gemacht, das landschaftlich reizvolle Teilstück nach Welzheim zu reaktivieren und für einen touristischen Bahnverkehr herzurichten. Zusammen mit der Stadt Welzheim gründete er die Schwäbische-Wald-Bahn GmbH (SWB), die die Schieneninfrastruktur vom Eigentümer ZVWV pachtet. Mit dem Ziel eines Bahnbetriebs für den Wochenend-Tourismus wurden am 22. Mai 2007 die Arbeiten für eine Reaktivierung der Strecke von Oberndorf bis Welzheim aufgenommen. Der reguläre Tourismusverkehr auf der Gesamtstrecke begann am 8. Mai 2010. Seitdem wurden jährlich bis zu 25 000 Fahrgäste befördert, womit die Prognosen vor Inbetriebnahme weit übertroffen wurden.



Abb. 1: Das Laufenmühle-Viadukt

Andreas Gerdes, Tobias Bürkle, Lorena Rombach

Substanzorientiertes und kostenoptimiertes Instandsetzungskonzept für das Laufenmühle-Viadukt

Das Laufenmühle-Viadukt, erstellt im Jahr 1909, repräsentiert als Teil eines Ensembles von drei Eisenbahn-Viadukten ein herausragendes Beispiel für die Anfänge des Stahlbetonbaus. Heute ist dieses Viadukt nicht mehr Teil des Eisenbahnnetzes, sondern wird nur noch temporär durch eine Museumsbahn genutzt. Nichtsdestotrotz ist die Standsicherheit dieses Bauwerks regelmäßig nachzuweisen. In diesem Zusammenhang wurde ein Instandsetzungsbedarf festgestellt. Nachdem sich eine Instandsetzungsplanung in Anlehnung an die heute geltenden Regelwerke als nicht denkmalgerecht erwies, wurde unter Verwendung moderner Ansätze aus Natur- und Ingenieurwissenschaft in Verbindung mit klassischen ingenieurtechnischen Verfahren ein neuer Ansatz für die Zustandsanalyse, Datenauswertung und Instandsetzungsplanung erarbeitet, der sich durch ein substanzorientiertes, aber auch kostenoptimiertes Vorgehen auszeichnet. In diesem Beitrag werden die einzelnen Schritte dieses neuen Ansatzes am Beispiel des Laufenmühle-Viaduktes vorgestellt und diskutiert.

1 Einleitung

Die Industrialisierung der Gesellschaft, beginnend im 19. Jahrhundert, geht einher mit einer stetigen Entwicklung der technischen Infrastruktur. Typische Beispiele dafür sind Einrichtungen zur Energieerzeugung wie die Edertalsperre oder Verkehrsbauten wie die Hammerbrockschleuse und der Flughafen Tempelhof.

Durch den Eisenbahnbau ergab sich aufgrund der an die neuen Verkehrswege und Verkehrsmittel gestellten Anforderungen ein Innovationsschub im Brückenbau.

Eine besondere Rolle, auch im historischen Kontext, haben Infrastrukturbauwerke wie z.B. Brücken oder Viadukte als Teil der Eisenbahn, da durch die deutliche Beschränkung der möglichen Längsneigungen des Schienenweges eine Vielzahl von Brücken in bisher nicht bekannten Dimensionen und Verkehrslasten erforderlich war. Aber auch in Hinsicht auf Baustofftyp, Bauweisen und Ausführ-

rung repräsentieren sie Pionierleistungen, die zu Recht unter Denkmalschutz stehen. Eine Vielzahl dieser Bauwerke ist sogar bis heute für den Nah- und Fernverkehr wichtig oder gar unverzichtbar, wobei dafür die technische Funktionsfähigkeit und Standsicherheit Voraussetzung ist, was nicht mehr immer gegeben ist.

Aus diesem Kontext heraus ergeben sich für Brücken, Viadukte, aber auch Tunnel als Teil des Eisenbahnnetzes zusätzliche Anforderungen hinsichtlich einer denkmalgerechten Instandsetzung, die im Folgenden stichwortartig zusammengefasst werden sollen.

- a) Instandsetzung soll unter Betrieb bei möglichst geringen Einschränkungen erfolgen
- b) Anpassung an die heute gültigen Anforderungen des Eisenbahnverkehrs
- c) Kompatibilität zu in der Vergangenheit durchgeführten Instandsetzungen mit unterschiedlichen Konzepten und Materialien
- d) Nachweis der Standsicherheit (Statik) unter der Berücksichtigung des Denkmalschutzes
- e) Erhalt des technischen und ästhetischen Bezugs zur Umgebung bzw. Umwelt
- f) Deutliche Verlängerung der Restnutzungsdauer (>> 10 a)
- g) Wirtschaftlichkeit der technischen Maßnahmen, auch unter ökologischen Aspekten

Bei der Entwicklung von denkmalgerechten Instandsetzungskonzepten für weiter in ihrem ursprünglichen Sinn zu nutzende Bauwerke der technischen Infrastruktur spielt die Nachhaltigkeit eine besondere Rolle. Diese Bauwerke sind häufig über 100 Jahre alt und sollen durchaus für weitere 40 bis 50 Jahre genutzt werden. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass, vereinfacht ausgedrückt, die zukünftigen nicht den heutigen Nutzungsbedingungen entsprechen werden. Megatrends wie Klimawandel und Ressourcenverknappung werden sowohl die klimatischen Beanspruchungen als auch die Zusammensetzung und Eigenschaften zukünftiger Werkstoffe des Bauwesens prägen und beeinflussen. Das zeigt sich bereits heute bei der eingeschränkten Verarbeitbarkeit von üblichen Baustoffen bei den hohen sommerlichen Temperaturen und die rasante Entwicklung völlig neuer Typen mineralischer Bindemittel durch die Zementindustrie. Eine nachhaltige, substanzschonende und denkmalgerechte Instandsetzung dieses Teils unserer Technikgeschichte muss also die aus den Megatrends entstehenden Einwirkungen berücksichtigen.

Dies geschieht in den aktuellen Konzepten nur ansatzweise, sodass hier ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf mit hoher Relevanz und Dringlichkeit besteht. Im Rahmen der Instandsetzung des Laufenmühle-Viadukts sollte auf der einen Seite ein technisch und wirtschaftlich angemessenes Instandsetzungskonzept entwickelt werden. Auf der anderen Seite sollte aber auch evaluiert werden, welche Fragestellungen zukünftig im Rahmen von Forschungsprojekten vertieft bearbeitet werden müssen.

2 Laufenmühle-Viadukt – ein historischer Überblick

Das Laufenmühle-Viadukt gehört zu der »Wieslaufbahn« und ist das größte eines Ensembles von drei Viadukten: Laufenmühle-, Strümpfelbach- und Igelsbach-Viadukt. Alle drei Viadukte wurden als Eisenbetonkonstruktion ausgeführt. Sie gehören zu den ersten Bauwerken dieser Art in Deutschland und stehen daher seit 1992 unter Denkmalschutz.

Bis Mitte des 19. Jahrhunderts wurden Brücken üblicherweise aus Holz konstruiert, da Holz das günstigste und am einfachsten zugängliche Material war, wodurch sie eine wirtschaftliche und schnell zu erstellende Alternative zu teuren Steinbrücken darstellten. Solche Konstruktionen konnten aber die im Zugverkehr auftretenden hohen Lasten nicht gut verkraften, sodass die Brücken regelmäßigen Kontrollen und Instandsetzungen unterzogen werden mussten. Die Folge waren hohe Unterhaltskosten. Zusätzlich waren die Holzkonstruktionen brandgefährdet, weshalb die deutsche Bahnverwaltung 1850 beschloss, den Neubau von Holzbrücken nicht mehr zu erlauben [1].

Neben teuren Steinbrücken sind auch Eisen- bzw. Stahlbrücken für die zu erwartenden Belastungen geeignet. Vorteilhaft bei der Verwendung von Eisen- bzw. Stahlkonstruktionen ist nicht nur, dass sie feuerfest sind, Vorzüge sind auch ihre Leistungsfähigkeit bei der Lastenaufnahme und die kurzen Bauzeiten. Anfänglich wurde Gusseisen verwendet, das aber bei dynamischen Beanspruchungen Nachteile aufweist und darum für die großen Lasten im Zugverkehr nicht geeignet ist. Als man Ende des 19. Jahrhunderts Walzeisen statt Gusseisen einsetzte, hatte man ein Material gefunden, das sich für Eisenbahnbrücken eignete. Durch das neue Material änderten sich auch die Bauweise und das Erscheinungsbild von Eisenbahnbrücken. Nicht mehr der ausschließliche Nutzen wie das Über-



Abb. 2: Hohlstellen (rot umrandet)

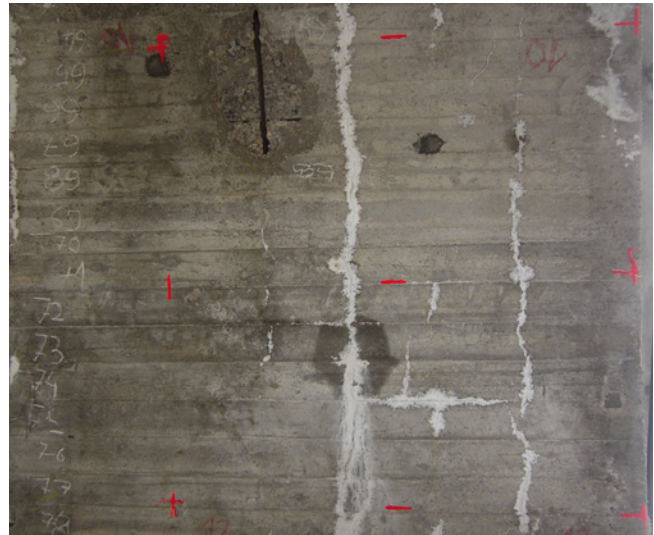


Abb. 3: Korrodiierende Bewehrung und Kalkaussinterungen an der Bogenunterseite

queren von Hindernissen stand im Vordergrund, sondern durch die neue Bauweise entstanden einzigartige filigrane Bauwerke. Ein Nachteil der Eisenkonstruktion ist jedoch der damals hohe Preis für den Werkstoff Eisen. Deshalb suchte man weiter nach günstigen Möglichkeiten für den Brückenbau. Ende des 19. Jahrhunderts wurden erste Versuche mit Stampfbeton gemacht. Mit dem heutigen Werkstoff Beton vergleichbare Werkstoffe werden seit fast 6000 Jahren als Baustoff verwendet, kamen aber aufgrund ihrer geringen Zug- und Biegefestigkeit nur bedingt im Brückenbau zum Einsatz. Erst mit der Innovation, die Eigenschaften von Beton und Eisen miteinander zu verbinden, um so die mangelnde Zugfestigkeit des Betons auszugleichen, stieg die technische Bedeutung des Betonbrückenbaus. Das neue Material konnte somit sowohl hohen Druck- als auch Zugkräften ausgesetzt werden. Für den Brückenbau bot der Eisen-/Stahlbeton neue Gestaltungsmöglichkeiten, da das Material vor Ort in beliebige Formen gegossen werden kann und nicht wie Naturstein im Steinbruch bearbeitet und über weite Strecken transportiert werden muss.

Das Laufmühle-Viadukt besteht aus acht Bögen unterschiedlicher Konstruktion und Stützweiten, mit einer gesamten Länge von 168 m. Mit dem Bau des Laufmühle-Viadukts wurde im Juli 1909 begonnen. Die Bauzeit des mit bewehrtem Stampfbeton erstellten Bauwerks betrug fünf Monate. Sowohl als Teil des bereits erwähnten Ensembles als auch durch die Konstruktion und Bauweise sowie durch die bereits in der Vergangenheit durchgeführten Instandsetzungen repräsentiert das Laufmühle-Viadukt ein herausragendes Beispiel für die Entwicklung der technischen Infrastruktur in Deutschland.

3 Laufmühle-Viadukt – Zustand des Bauwerks

Der aktuelle Zustand des Laufmühle-Viaduktes ist durch lokal auftretende flächige Abplatzungen im oberflächennahen Bereich gekennzeichnet. Daneben sind zum Teil wasserführende Risse und auch Hohlstellen zu beobachten (Abb. 2 und 3). Optisch besonders auffällig sind freiliegende und korrodiierende Eisenbewehrungen, begründet in einer geringen Betonüberdeckung und der bereits seit der Bauwerkserstellung ablaufenden Carbonatisierung (Abb. 3). Neben Kalkaussinterungen, die auf Wassertransport durch das Bauwerk hinweisen, wurden ebenfalls defekte Fugen festgestellt, die den Eintritt von Wasser ins Bauwerk erlauben. Zusätzlich sind Verfärbungen aufgrund von Biofilmbildung und dadurch induzierter Korrosion sowie Pflanzenbewuchs zu beobachten.

Für eine objektangepasste und denkmalgerechte Instandsetzung ist es wichtig, sowohl über die technischen Kennwerte zu den verwendeten Werkstoffen als auch über detaillierte Informationen über die Bauweise (z. B. Aufbau der Bauteile) sowie die Ausführung (z. B. örtliche Schwankungen beim Gefüge) zu verfügen.

Der Kenntnisstand darüber war in diesem Zusammenhang nicht ausreichend, zumal originale Planungsunterlagen nur eingeschränkt vorhanden sind und Daten zur damaligen Ausführungsqualität gar nicht vorliegen. Entsprechendes gilt auch für die in der Vergangenheit durchgeführten Instandsetzungen. Darüber hinaus lagen nur wenige Werte zur Betonqualität (z. B. Druckfestigkeit) vor, die für Bauwerke aus dieser Epoche üblich stark variieren. Eine verlässliche Bewertung des Bauwerks hinsichtlich der Standsicherheit ist auf dieser Datenbasis nur bedingt möglich. Es besteht nach diesen Ausführungen deshalb eine Notwendigkeit, diese Daten zu erheben, um sie anschließend in Kontext mit möglichen Instandsetzungsverfahren zu setzen.

4 Laufenmühle-Viadukt – Ergebnisse einer Zustandsanalyse und die damit verbundenen Folgen

Aus diesem Grund wurde ein Ingenieurbüro damit beauftragt, eine Zustandsanalyse am Objekt durchzuführen und darauf basierend ein Instandsetzungskonzept zu entwickeln. Neben der Aufnahme der optisch erkennbaren und auch schon beschriebenen Schäden sollte die Betonqualität durch die Entnahme von Bohrkernen charakterisiert werden, wozu in zwei Kampagnen insgesamt 50 Bohrkern entnommen, im Labor geprüft und die Ergebnisse nach den Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [2] und der ZTV-ING [3] bewertet wurden. Weitere Messungen am Objekt betrafen die Haftzugfestigkeit und die Carbonatisierungstiefe.

Die Ergebnisse der im Jahr 2014 durchgeführten Untersuchungen waren wenig aussagekräftig, da sie sich hauptsächlich auf punktuelle, willkürlich festgelegte Flächen stützten. Die Resultate für die 50 entnommenen Bohrkern schwankten sehr stark und die gemäß der Richtlinie für die statischen Berechnungen ermittelten Werte veranlassten sowohl die Verantwortlichen im Planungsbüro als auch das für die Statik verantwortliche Ingenieurbüro dazu festzustellen, dass die Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Standsicherheit nicht mehr gewährleistet sind. Die Konsequenz war die Schließung des Laufenmühle-Viadukts, wodurch der sonn- und feiertägliche Betrieb der Schwäbischen Waldbahn nicht weitergeführt werden konnte und naturgemäß auch eine Instandsetzung unter Betrieb als unmöglich betrachtet wurde.

Aber auch für die Planung der Instandsetzung hatten die Resultate der Zustandsanalyse eine nachhaltige Wirkung. Ausgehend von den Daten wurde ein Vorschlag erarbeitet, nach dem unter die bestehenden Bögen eine »Hilfskonstruktion« aus modernem Stahlbeton in Form von Bögen betoniert werden sollte, um die historischen Bögen zu entlasten. Nach einer Instandsetzung des Sichtbetons an den historischen Bauteilen sollte das Viadukt wieder in Betrieb genommen werden.

Dieses Instandsetzungskonzept hätte demnach nicht nur eine große Veränderung des Erscheinungsbildes nach sich gezogen, sondern wäre auch mit Kosten in der Größenordnung von ca. 3 Mio. Euro verbunden gewesen. Weder der Bauherr noch die beteiligten Ingenieurbüros waren deshalb von diesem Konzept angetan, weshalb nach anderen Ansätzen gesucht wurde.

5 Laufenmühle-Viadukt – Konzeptentwicklung für eine denkmalgerechte und kostenoptimierte Instandsetzung

Unter der Leitung des KIT Innovation Hub Prävention im Bauwesen entwickelten die IONYS AG, das Ingenieurbüro H. Rothenhöfer und das IGP Ingenieurbüro von Frau Dr.-Ing. G. Patitz ein Konzept als Basis für eine denkmalgerechte, aber auch kostenoptimierte Instandsetzung des Laufenmühle-Viadukts. Dazu wurde zunächst der folgende Arbeitsplan entwickelt, wobei schnell sichtbar wurde, dass neben den klassischen Methoden aus der Bauwerksdiagnostik (z.B. Schmidt-Hammer) auch hochmoderne analytische Methoden aus den Werkstoffwissenschaften für eine sachgerechte Beurteilung des Bauwerks erforderlich waren. Für ein angepasstes Projektmanagement wurden die nachfolgenden Module definiert, die jeweils mit klar festgelegten und überprüfbaren Zielen versehen waren (»Meilensteine«).

Modul 1 – Literaturrecherche

Literaturrecherche in Datenbanken

- Identifikation von Fallbeispielen
- Durchführung von Interviews
- Dokumentation der Rechercheergebnisse

ZIELSETZUNG: Evaluation bauteilspezifischer, denkmalgerechter Präventions- und Instandsetzungsverfahren

Modul 2 – Statische »Sensitivitätsanalyse«

Erfassung und Aufbereitung der statisch relevanten Daten (statische Analyse)

- Durchführung von Parameterstudien (Identifikation der »hot spots«)
- Bewertung von Betriebsszenarien (»inverse statische Analyse«)

ZIELSETZUNG: Bestimmung der bauteilspezifischen statischen Verhältnisse

Modul 3 – Vertiefte Bewertung der vorliegenden Bauwerksdaten

- Sichtung historischer Dokumente / Brückenprüfungen
- Erfassung und Bewertung der vorliegenden Zustandsanalysen
- Bewertung der vorliegenden Bauwerksdaten
- Erarbeitung eines erweiterten Untersuchungskatalogs

ZIELSETZUNG: Bewertung des Bauwerkszustands

Modul 4 – Minimalinvasive erweiterte Zustandsanalyse der Bögenuntersichten

- ▶ Handnahe Prüfung der Bögenuntersichten/Erfassung von oberflächlichen Hohllagen/Fotodokumentation
- ▶ Lokalisierung der Bewehrung und Bestimmung der Betonüberdeckung
- ▶ Erfassung von Gefügestörungen mittels Bauradar bis in eine Bauteiltiefe von ca. 70 cm
- ▶ Gezielte Bohrkernentnahme an den Bögen 1, 2, 3 und 6
- ▶ Bestimmung von Werkstoffkennwerten, wie z.B. Druckfestigkeit

ZIELSETZUNG: Vertiefte Erfassung und Bewertung des Bauwerkszustands und der Materialeigenschaften der Bögen

Modul 5 – Evaluation von Instandsetzungsverfahren unter Berücksichtigung denkmalpflegerischer Aspekte

- ▶ Technische Machbarkeit (Wirksamkeit, Dauerhaftigkeit, Verträglichkeit)
- ▶ Wirtschaftliche Aspekte (Einsatz unter Verkehr, Kosten)
- ▶ Nachhaltigkeit
- ▶ Anforderungen durch das Denkmal

ZIELSETZUNG: Identifikation geeigneter denkmalgerechter Instandsetzungsverfahren

Modul 6 – Entwicklung einer Strategie zum nachhaltigen Erhalt des Laufenmühle-Viadukts

- ▶ QS-Konzepte für die Ausführung der Maßnahmen
- ▶ Monitoring-Konzepte
- ▶ Präventionsstrategie

ZIELSETZUNG: Sicherstellung der Nachhaltigkeit der Instandsetzungsmaßnahme

6 Ergebnisse für die einzelnen Module

6.1 Vorbemerkungen

Im Folgenden werden ausgewählte Resultate der Untersuchungen vorgestellt, wobei bei den Modulen 2 und 4 auf die Beiträge von H. Rothenhöfer und B. Marquardt bzw. von G. Patitz verwiesen wird.

6.2 Modul 1 – Literaturrecherche

Die folgenden Fragen sollten mithilfe der Literaturrecherche beantwortet werden.

- ▶ Gibt es vergleichbare Bauwerke aus der Epoche (1890–1920)?

- ▶ Welche Erfahrungswerte gibt es im Bereich Denkmalpflege und Beton – Konzepte der Bauwerksbewertung?
- ▶ Welche Instandsetzungsverfahren/-methoden gibt es?
- ▶ Fallbeispiele von denkmalgerechter Instandsetzung von Stahl-/Eisenbetonbauwerken

Die Auswertung der Literatur zeigte, dass in dieser Zeit zwischen Deutschland und der Schweiz verschiedene Bogenbrücken entstanden sind. Besonders herauszuheben sind die folgenden Bauwerke:

Bogenbrücke über die Isar

Die in Deutschland größte und am weitesten gespannte Bogenbrücke ihrer Zeit war die sogenannte »Bogenbrücke über die Isar« bei Grünwald, südlich von München [4]. Sie wurde von 1903 bis 1904 erbaut und vom bekannten Statiker Emil Mörsch berechnet.

Die Bogenbrücke ist ca. 220 m lang und verfügt über zwei Dreigelenkbögen mit Stahlgelenkbögen im Scheitel und am Kämpfer. Auffallend ist die relativ filigrane Bogenstärke von 80–90 cm, welche nur mithilfe des Verbundbaustoffs Eisenbeton erstellt werden konnte. [4]

Gmündertobelbrücke

Mörschs zweites Eisenbeton-Projekt, welches ebenfalls richtungsweisend für die Eisenbetonbauweise war, liegt in der Schweiz bei Stein im Kanton Aargau, die Gmündertobelbrücke [5].

Es ist eine Eisenbeton-»Straßen«-Bogenbrücke, die 1904 entworfen, aber erst 1907/08 erbaut wurde. Mit ihrer Spannweite von 79 m und ihrer Länge von 192 m galt sie 1908 als die am weitesten gespannte Bogenbrücke der Welt.

Die historisch wertvolle Stahlbetonbrücke wurde ab 2013 in den nachfolgenden drei Bausaisons erneuert, ohne die repräsentative und einzigartige Ästhetik des Bauwerks zu verändern [6].

Langwieser-Viadukt

Ein Meisterwerk der frühen Eisenbeton-Bogen-Brücken ist das imposante Langwieser-Viadukt, welches von 1912 bis 1914 erbaut wurde. Das Langwieser-Viadukt gilt auch nach über 100 Jahren weltweit als Wegbereiter des modernen Brückenbaus. Es wird als »bedeutendste[r] Kunstbau« [7] der Schweiz beschrieben, welcher der Verbindung von Chur und dem Kurort Arosa dient. Die Besonderheit des Viadukts liegt in seinem filigranen Leichtbau und der be-



Abb. 4: Isarbrücke bei Grünwald [4]



Abb. 5: Gmündertobelbrücke in der Schweiz (Bildarchiv online, ETHZ)

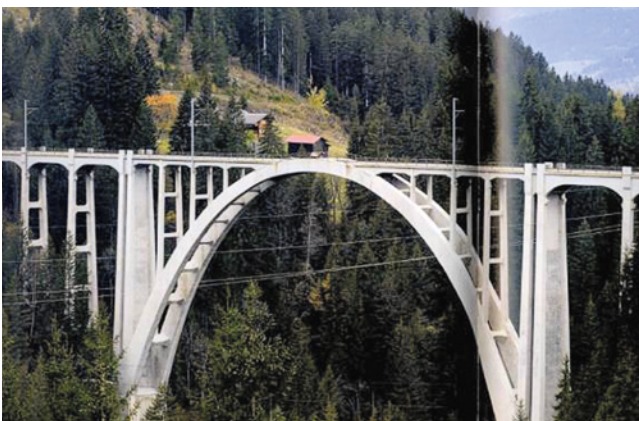


Abb. 6: Langwieser-Viadukt in der Schweiz [7]

eindruckenden Bogenspannweite von 100 m. Den Ingenieuren Hermann Schürch-Züblin und Karl Arnstein gelang es, die Stabilität nicht mehr wie damals üblich durch Masse, sondern durch geschicktes Anordnen und Verbinden filigraner Teile [7] sicherzustellen. Diese Vorgehensweise war neuartig, ungewöhnlich und richtungsweisend für den Eisenbetonbrückenbau, der bis dahin in der Regel immer noch sehr massiv war. Anhand dieses Viadukts ist deutlich erkennbar, dass die Ingenieure jener Zeit innerhalb weniger Jahre (vgl. Isarbrücke bei Grünwald (1903/04)) enorme Fortschritte und Erkenntnisse bezüglich des Verbundbaustoffs Eisenbeton gemacht haben, sowohl bezüglich der Ausführung als auch bei der statischen Berechnung bzw. Bemessung des Eisenbetons.

Die Literaturrecherche ergab demnach, dass es vergleichbare Bauwerke aus dieser Epoche gibt. Eine Analyse der zeitlichen Abfolge in der Erstellung zeigt, dass in dem betrachteten Zeitraum eine schnelle Entwicklung in der Betontechnologie stattfand. Dies muss bei der Planung der Instandsetzungsmaßnahme unbedingt berücksichtigt werden, oder anders ausgedrückt: Es müssen eine objektspezifische Zustandsanalyse durchgeführt und ein substanzoptimiertes Instandsetzungskonzept entwickelt werden. Zwar können, wie auch bei diesen Bauwerken, klassische Instandsetzungsverfahren eingesetzt werden. Dazu gehören die folgenden Verfahren und Technologien:

- ▀ Betonersatz (Concrete Restoration),
- ▀ Verstärkung (Structural Strengthening),
- ▀ Beschichtungen (Coatings) zur Erhöhung des physikalischen und chemischen Widerstands,
- ▀ elektrochemische Verfahren zur Wiederherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrung,
- ▀ Füllen von Rissen und Hohlräumen durch Injektionen.

Bei der Verfahrensauswahl und Anwendung gelten aber neben den bei einer gewöhnlichen Betoninstandsetzung einzuhaltenden Vorgaben zusätzlich folgende Randbedingungen:

- ▀ Instandsetzungen sind bei denkmalgeschützten Bauwerken nur dann vorzusehen, wenn die Veränderung der Betonoberfläche mit einer Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit, Gebrauchsfähigkeit oder Standsicherheit des Bauwerks einhergeht.
- ▀ Bei denkmalgerechten baulichen Maßnahmen sind der größtmögliche Erhalt der ursprünglichen Konstruktion bzw. ihres Erscheinungsbildes von entscheidender Be-

deutung. Die Instandsetzung sollte sich auf lokale Stellen konzentrieren.

- Für Instandsetzungsmaßnahmen sind speziell für dieses Bauwerk angepasste Instandsetzungsmörtel zu rezeptieren, dessen Eigenschaften auf die Eigenschaften des Bauwerksbetons abgestimmt sein müssen. Nur so lässt sich die Inkompatibilität zwischen Alt- und Neubeton vermeiden, was sowohl bei historischen als auch modernen Bauwerken zu einem schnellen Versagen der Instandsetzung führt.
- Abplatzungen der Betondeckung infolge des Sprengdrucks durch korrodierende Bewehrung zählen zu den häufigsten und gravierendsten Oberflächenschäden. Einflussparameter wie Betondeckung, Carbonatisierungstiefe und relative Feuchtigkeit müssen betrachtet werden. Um diese Schäden instand zu setzen bzw. neuen Schäden vorzubeugen, ist der Instandsetzungsmörtel in ausreichender Dicke aufzutragen oder zusätzlich ein stahlbaumäßiger Korrosionsschutz vorzusehen.

Diese zusätzlichen Anforderungen wurden sowohl bei der erweiterten Zustandsanalyse als auch bei der Festlegung der Instandsetzungsmaßnahmen berücksichtigt.

6.3 Modul 2 – Statische »Sensitivitätsanalyse«

Die »inverse statischen Analyse« wurde durch H. Rothenhöfer und B. Marquardt vom Ingenieurbüro H. Rothenhöfer, Karlsruhe, entwickelt und auf das Laufenmühle-Viadukt angewendet. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse dieser Betrachtungen werden von Rothenhöfer und Marquardt in dem Beitrag »Ermittlung der Belastbarkeit und Nutzungsnachweise historischer Brückenbauwerke am Beispiel der Eisenbahnbrücke Laufenmühle-Viadukt« im Detail vorgestellt. Deshalb wird an dieser Stelle auf diesen Beitrag verwiesen.

6.4 Modul 3 – Vertiefte Bewertung der vorliegenden Bauwerksdaten

Auf der vertieften Bewertung der vorliegenden Bauwerksdaten zeigte sich, dass die bisher bestimmten Werkstoffkenngrößen, vor allem die mechanische Kenngröße der Druckfestigkeit, erheblichen Schwankungen unterworfen sind. Bei der Auswertung der Bauwerksdruckfestigkeit nach DIN EN 13791 war keine Zuordnung einer Druckfestigkeitsklasse nach DIN EN 206 möglich. Auf dieser Grundlage war ein rechnerischer Nachweis der Standicherheit des Laufenmühle-Viadukts nicht möglich. Als eine mögliche Instandsetzungsvariante wurde daher die

Betoninstandsetzung und Oberflächenschutz. Nachhaltig und sicher.

Laufenmühle-Viadukt

Wir freuen uns, dass unsere Betonersatz- und Beschichtungssysteme dazu beitragen, die Funktionstüchtigkeit und das visuelle Erscheinungsbild dieser historischen verkehrstechnischen Landmarke zu bewahren.

EXPERTISE
CONCRETE REPAIR

MC-Bauchemie · Service Center Süd · Esslingen-Berkheim · info.esslingen@mc-bauchemie.de



BE SURE. BUILD SURE.

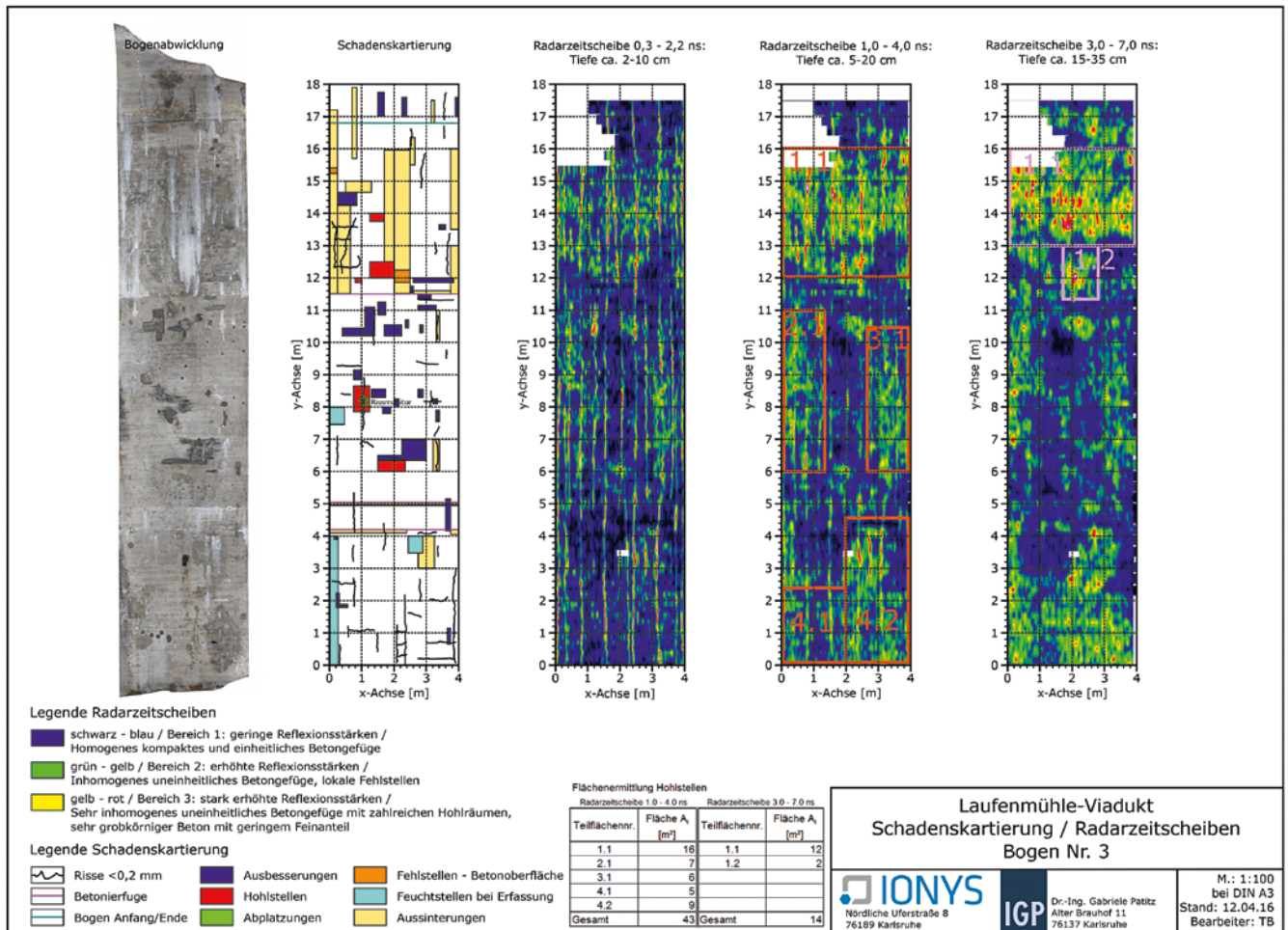


Abb. 7: Dokumentation Bogenuntersicht Bogen 3

Verstärkung der Bogenuntersichten durch eine bis zu 40 cm starke Stahlbetonplatte vorgesehen. Diese Variante steht natürlich im erheblichen Widerspruch zu einer denkmalgerechten Instandsetzung.

Daraufhin wurden die vorliegenden Daten durch die IONYS AG systematisch neu ausgewertet und bewertet. Dabei zeigte sich, dass eine Mehrzahl der Bohrkerns und daraus folgend auch die Teilbereiche der Bögen ein dichtes und homogenes Gefüge aufweisen und auch die Druckfestigkeit für den Nachweis der Standsicherheit gemäß der inversen Analyse durch das Ingenieurbüro Rothenhöfer ausrei-

Korrelation zwischen der Farbkodierung aus dem Radar und der Betonstruktur	Umrechnung der charakteristischen Würfeldruckfestigkeit ($f_{ck,cube}$) nach DIN EN 206 zur Nennfestigkeit (β_{WN}) nach DIN 1045:1988		
	Gesamte Bohrkernlänge ca. 0 - 50 cm	Oberflächennaher Bereich ca. 0 - 15 cm	Kernbeton ca. 15 - 50 cm
Bereich 1: geringe Reflexionsstärke Farbkodierung: Blau	B 25 / β_{WN} =25 kN/mm ² (DIN EN 206: C20/25)	B 15* / β_{WN} =15 kN/mm ² # β_{WN} =20 kN/mm (DIN EN 206: C16/20)	B 25 / β_{WN} =25 kN/mm ² (DIN EN 206: C20/25)
Bereich 2: erhöhte Reflexionsstärke Farbkodierung: Grün	B 10 / β_{WN} =10 kN/mm ² (DIN EN 206: C8/10)	B 5 / β_{WN} =5 kN/mm ² # β_{WN} =5 kN/mm < C8/10 ($f_{ck,ls}$ ≈ 4,2 kN/mm ²)	B 15 / β_{WN} =15 kN/mm ² # β_{WN} =20 kN/mm (DIN EN 206: C16/20)
Bereich 3: stark erhöhte Reflexionsstärke Farbkodierung: Gelb	B 10 / β_{WN} =10 kN/mm ² (DIN EN 206: C8/10)	B 10 / β_{WN} =10 kN/mm ² (DIN EN 206: C8/10)	B 10 / β_{WN} =10 kN/mm ² # β_{WN} =10 kN/mm < C8/10 ($f_{ck,cube}$ ≈ 8,4 kN/mm ²)

* Bei der Auswertung wird die nach DIN EN 13791 geforderte Mindestanzahl an Prüfkörpern (3) unterschritten. Die Auswertung erfolgt unter der Annahme, dass der Mittel- sowie der niedrigste Wert auf 3 Einzelprüfungen basieren.

Abb. 8: Matrix Bauradar / Druckfestigkeit

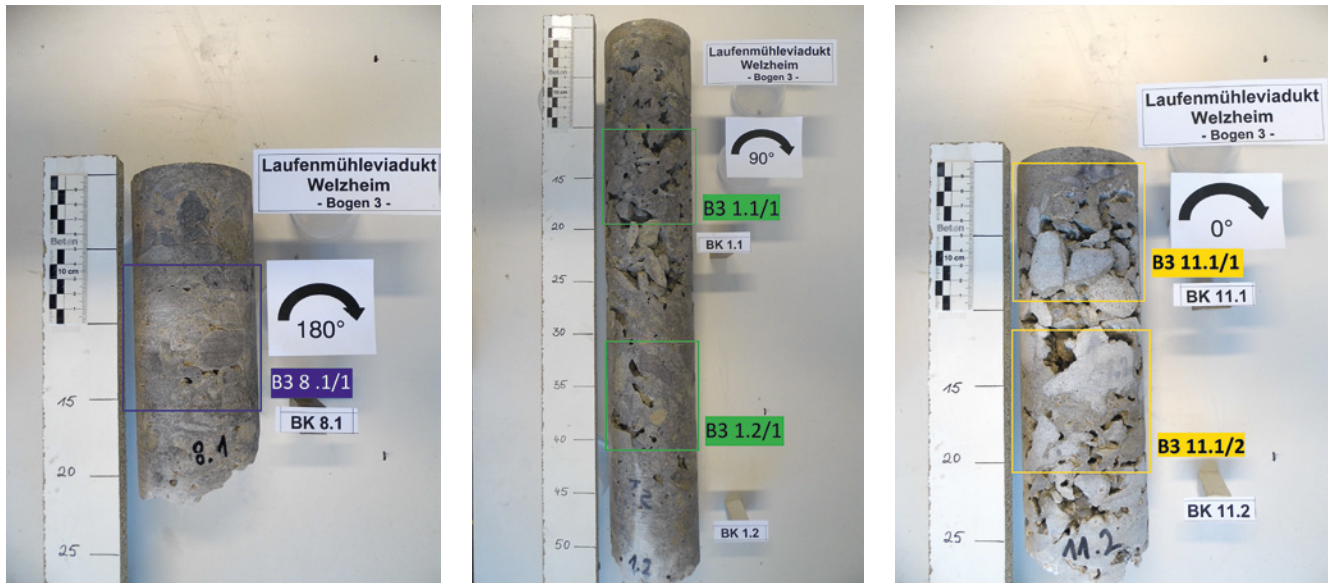


Abb. 9: Exemplarische Darstellung des optischen Betongefüges der Bohrkernmantelfläche
links: Bohrkern B3 8 – homogenes, kompaktes und einheitliches Betongefüge 2 Zuordnung zu Bereich 1 – Farbcodierung Blau;
Mitte: Bohrkern B3 1 – inhomogenes, uneinheitliches Betongefüge, lokale Fehlstellen – Zuordnung zu Bereich 2 – Farbcodierung Grün;
rechts: Bohrkern B3 11 – sehr inhomogenes, uneinheitliches Betongefüge mit zahlreichen Hohlräumen, sehr grobkörniger Beton mit fast keinem Feinkornanteil – Zuordnung zu Bereich 3 – Farbcodierung Gelb

chend sind. Einzelne Bohrkern weisen jedoch eine sehr inhomogene Betonstruktur mit zahlreichen Hohlstellen sowie einen grobkörnigen Beton mit einem sehr geringen Feinkornanteil auf. Es war zu diesem Zeitpunkt schon erkennbar, dass die auf diesen Ergebnissen basierende Schließung des Laufenmühle-Viadukts für den Bahnverkehr zu überprüfen war. Voraussetzung dafür war aber die Identifizierung von Bauteilbereichen mit gestörtem Gefüge mit hoher lokaler Auflösung. Durch die Bauweise aus den Anfängen des Betonbaus war dies aber nicht auf dem direkten Weg möglich.

Die Bögen bestehen aus einem Vorsatzbeton, der historisch als »fette Mischung« bezeichnet wird, sowie dem eigentlichen Konstruktionsbeton, der aus einem groben Stampfbeton hergestellt worden ist. Die Aufgabe des Vorsatzbetons besteht darin, den eigentlichen Konstruktionsbeton

vor äußeren Witterungseinflüssen zu schützen. Des Weiteren ist im Übergang des Vorsatzbetons zum eigentlichen Konstruktionsbeton die Bewehrung der Bögen eingebettet. Ausnahme ist dabei Bogen 6, da es sich um einen unbewehrten 3-Gelenk-Bogen handelt.

6.5 Modul 4 – Minimalinvasive erweiterte Zustandsanalyse der Bogenuntersichten

Um diese Bereiche mit einer erhöhten Inhomogenität und einem erhöhten Anteil an Hohlstellen zu erfassen, wurde durch die IONYS AG in Zusammenarbeit mit Frau Dr.-Ing. G. Patitz, IGP, ein Untersuchungskonzept entwickelt.

Dazu wurden zunächst alle Bogenuntersichten systematisch mittels Bauradar vermessen. Eine Beschreibung der Durchführung und die Resultate dieser Radarmessungen findet

sich in einem eigenen Beitrag von G. Patitz in diesem Sonderheft.

Die Auswertung erfolgte hierbei auf Grundlage der Farbcodierung der Radarzeitscheiben – Blau, Grün und Gelb-Rot. Die Ergebnisse der handnahen Prüfung, die Schadenskartierung sowie Ergebnisse der Untersuchungen mittels Bauradar wurden in Übersichtsplänen je Bogen dokumentiert (Abb. 7). Auf Grundlage dieser Ergebnisse war es möglich, gezielt Bohrkern aus den Bereichen unterschiedlicher Reflexionsstärke zu entnehmen, das Gefüge optisch zu bewerten und die Druckfestigkeit zu bestimmen.

Für die Auswertung wurden die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen den Resultaten der Radarmessungen in einer Matrix gegenübergestellt (Abb. 8).

Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse zeigt, dass bei den oberflächennahen Bereichen (Farb-

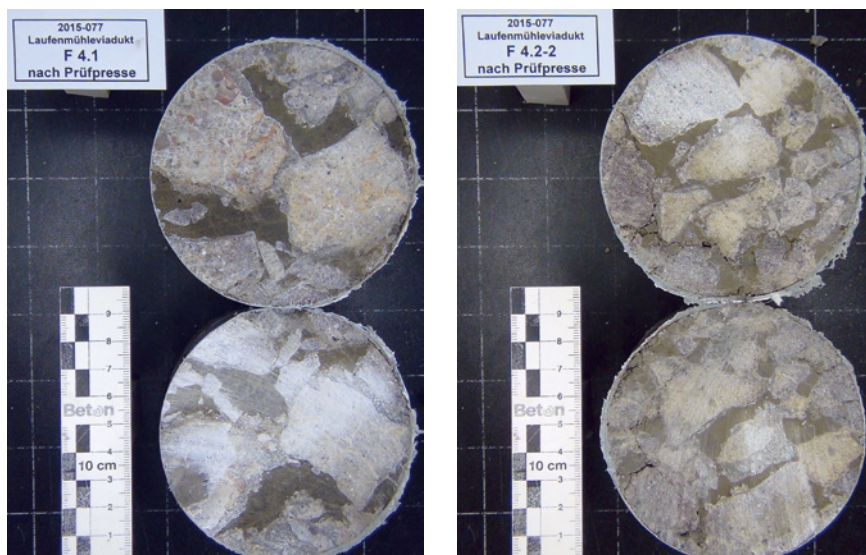


Abb. 10: Bohrkerne entnommen nach der Injektion und Druckfestigkeitsprüfung; links: Schaumzementsuspension; rechts: Trasszementmörtel

codierung Grün und Gelb) sowie im Kernbeton (Farbcodierung Gelb) mit geeigneten technischen Maßnahmen eine Homogenisierung des Gefüges vorzunehmen ist, womit auch eine Angleichung bei den Werten für die Druckfestigkeit verbunden ist.

Weiterhin wurde die als Folge einer Carbonatisierung korrodierende und freiliegende Bewehrung erfasst und bewertet. Die Aufnahme von Rissen mit und ohne Aussinterungen, Hohlstellen und Abplatzungen waren ebenfalls Teil des Untersuchungskonzepts.

6.6 Modul 5 – Evaluation von Instandsetzungsverfahren unter Berücksichtigung denkmalpflegerischer Aspekte

Bei der Evaluation der Instandsetzungsverfahren galt es, die folgenden Aufgaben denkmalgerecht zu lösen. Lokal korrodierende Bewehrung muss instand gesetzt bzw. eine weitere Korrosion verhindert werden. Oberflächennahe Betonabplatzungen, Ablösungen,

in der Vergangenheit instand gesetzte Fehl- und Hohlstellen sind instand zu setzen. Die zum Teil wasserführenden Risse/Fehlstellen sind zu verschließen. Schwachstellen wie der Trog und die Brückenkappe, die den Wassereintritt ermöglichen, sind zu beseitigen.

Ein bedeutender Bestandteil des entwickelten Konzepts zur Sicherstellung der Standfestigkeit und Dauerhaftigkeit ist die Homogenisierung des Betongefüges der Bögen. Dafür war nur eine gezielte Injektion der betroffenen Bereiche mit geringer Festigkeit mit zementgebundenen Werkstoffen geeignet. Geeignete Verpressmaterialien und relevante Parameter für die Durchführung der Applikation wurden mithilfe von Vorversuchen festgelegt. Mit diesen Daten sollten auch Vorgaben für die Ausschreibung definiert werden.

Dazu wurden an ausgewählten Teilflächen der Bögen 2 und 3 sechs ca. 4 m² große Testflächen angelegt. Gegenstand der Vorversuche waren verschiedene Materialien:

- ▶ Zementsuspensionen $w/z = 0,6$,
- ▶ Schaumzementsuspensionen $w/z = 0,5$,
- ▶ Trasszementmörtel $w/z = 0,45 - 0,6$ sowie verschiedene Randparameter, beispielsweise
- ▶ Packerabstand,
- ▶ Bohrlochtiefe,
- ▶ Mischzeiten.

Die werkstofftechnologische Betreuung erfolgte durch die IONYS AG. Es wurden die Verpressarbeiten dokumentiert, die Frischmörtel Eigenschaften bestimmt und die Proben für die Prüfung der Festmörtel Eigenschaften hergestellt. Anschließend erfolgte auch an diesen Teilbereichen der Bögen 2 und 3 eine Qualitätssicherung mittels Bauradar, siehe Beitrag von G. Patitz, sowie eine gezielte Bohrkernentnahme zur visuellen Bewertung der Verpressarbeiten. Die Bestimmung der Festmörtel- und Betondruckfestigkeiten erfolgte in Zusammenarbeit mit den FPI Forschungs- und Prüfinstitut Steine und Erden Karlsruhe e.V. Die maßgebenden Ziele waren hierbei

- ▶ die Homogenisierung der Werkstoffeigenschaften der Bögen,
- ▶ die grobe Gesteinskörnung mit einem feinen Füllmaterial großflächig kraftschlüssig zu verbinden; eine vollständige Verfüllung aller Hohlräume ist hierbei nicht erforderlich;
- ▶ eine Überfestigkeit und somit eine Veränderung der Steifigkeiten und eine damit verbundene Lastumlagerung ist zu vermeiden; als Ziel wird eine Druckfestigkeitsklasse C16/20 bzw. maximal C20/25 definiert.

Die Ausführung der Vorversuche erfolgte im Herbst 2016. Zusammenfassend wurden nachfolgende Erkenntnisse festgestellt:

► Rezepturen, Frisch- und Festmörteleigenschaften

- ◆ Die Mischungen, die mit dem Trasszementmörtel hergestellt wurden, zeigen die größte Robustheit und Baustellentauglichkeit. Bei der Bestimmung der Frisch- und Festbetoneigenschaften ergeben sich bei der Variation der W/B-Verhältnisse reproduzierbare Ergebnisse. Von den Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie bei der Verarbeitung zeigt sich eine Mischung mit einem W/B-Verhältnis von 0,5 als am besten geeignet.
- ◆ Zementsuspensionen $w/z = 0,6$ besitzen eine zu hohe Fließfähigkeit bei der Verarbeitung und eine zu hohe Festigkeit nach der Erhärtung und sind daher für die Verpressarbeiten am Laufenmühle-Viadukt ungeeignet.
- ◆ Schaumzementsuspensionen besitzen prinzipiell eine höhere Viskosität sowie eine geringere Festigkeit im Vergleich zu den Zementsuspensionen. Bei einem zu hohen Schaumanteil der Mischungen sind jedoch er-

hebliche Schwankungen bei der Bestimmung der Frisch- und Festmörteleigenschaften zu beobachten. Bei einem zu hohen Schaumanteil ist es nicht möglich, auf der Baustelle reproduzierbare und homogene Mischungen herzustellen. Die Schaumzementsuspensionen sind für die Verpressarbeiten am Laufenmühle-Viadukt eingeschränkt geeignet. Der Aufwand auf der Baustelle ist durch die zusätzliche Komponente Schaum aufwendiger und erfordert ein standardisiertes Vorgehen bei der Herstellung und Verarbeitung der Mischungen. Der Schaumanteil darf hierbei nicht zu hoch sein.

► Ausführung der Verpressarbeiten

- ◆ Die Bohrlöcher sind ca. 10 Sekunden vorzunässen.
- ◆ Die Bohrtiefe sollte zwischen 1/3 und 1/2 der Bogenstärke betragen.
- ◆ Der Packerabstand kann mit einem Raster von ca. $0,4 \times 0,4$ m gewählt werden.

WISSEN, WAS IN ZUKUNFT TRÄGT.

MIT BETREIBERN UND INGENIEUREN AN EINEM TISCH FÜR DAUERHAFTERE BAUWERKE

Der Ansatz der IONYS AG – aktuelles Wissen aus der Forschung für den Unterhalt und die Instandhaltung großer Infrastrukturprojekte einzusetzen – hilft, die Dauerhaftigkeit von Bauwerken zu erhöhen und die Lebenszykluskosten niedrig zu halten.



IONYS AG · KARLSRUHE · BERLIN · LEIPZIG
HAUPTSITZ KARLSRUHE

NÖRDLICHE UFERSTR. 8
76189 KARLSRUHE

T: 0721 982 380-0
INFO@IONYS.DE

 **IONYS**
WWW.IONYS.DE

- ▮ Qualitätssicherung und Bauwerksdruckfestigkeit
 - ◆ Auswertung der Bauradarmessungen siehe Beitrag von G. Patitz.
 - ◆ Bei der Bohrkernentnahme kann bei allen Musterflächen eine nahezu vollflächige Füllung der Hohlstellen beobachtet werden (Abb. 10). Sehr vereinzelt zeigten sich noch kleinere, nicht verpresste Hohlstellen im oberflächennahen oder im hinteren Teil der Bohrkern.
 - ◆ Bei der Bestimmung der Bauwerksdruckfestigkeit ergeben sich Werte zwischen ca. 18 und 28 N/mm². Die Musterflächen erfüllen somit das zu Beginn definierte Ziel einer Druckfestigkeitsklasse C16/20 bzw. maximal C20/25.

6.7 Entwicklung einer Strategie zum nachhaltigen Erhalt des Laufenmühle-Viadukts

Die Strategie zum nachhaltigen Erhalt des Laufenmühle-Viadukts lässt sich vereinfacht in zwei Abschnitte unterteilen:

- ▮ Qualitätsüberwachung bei der Ausführung der Arbeiten
 - ◆ Der Erfolg der Injektionsmaßnahme wird ausführungsbegleitend durch Radarmessungen überprüft. Ergänzend dazu werden durch Bohrkernentnahmen an ausgewählten Flächen die Ergebnisse dieser Messungen validiert.
 - ◆ Bei der denkmalgerechten Betoninstandsetzung der Sichtbetonflächen wird die Ausführungsqualität durch eine stringente Sichtkontrolle und Prüfung des Verbundes (Haftzugfestigkeit) sichergestellt. Ergänzt werden diese Messungen durch eine stichprobenartige Bestimmung der Wasseraufnahme und der Porosität bzw. Porengrößenverteilung. Die Oberflächen werden fotografisch dokumentiert, um zukünftige Veränderungen schnell und sicher erkennen zu können.
- ▮ Intelligente Bauwerksüberwachung des historischen Bauwerks während der Nutzung
 - ◆ In der Nutzungsphase wird das Bauwerk durch regelmäßige Begehungen kontinuierlich überwacht. Innerhalb der Gewährleistungszeit wird diese Bauwerkskontrolle häufiger erfolgen, danach werden die Inspektionsintervalle der Zustandsentwicklung des Bauwerks angepasst.
 - ◆ Noch in der Diskussion sind Konzepte zu einer kontinuierlichen Bauwerksüberwachung mit Sensoren

(intelligentes Monitoring). Ein direktes Monitoring der schon bei der »inversen statischen Analyse« identifizierten »hot spots« erscheint aber technisch sinnvoll und angezeigt.

- ◆ Sollte es im Laufe der nächsten Jahrzehnte Hinweise auf einen sich verändernden Bauwerkszustand geben, werden gezielt Beprobungen an den betroffenen Bauteilen durchgeführt. Ziel dieser Erhebungen ist es, durch eine frühzeitige Intervention im Rahmen einer Präventionsstrategie das Bauwerk gefährdende Schadensmechanismen frühzeitig zu erkennen, um dann Gegenmaßnahmen einzuleiten.

7 Schlussfolgerungen

Aus den obigen Ausführungen lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:

- ▮ Auch heute noch spielen Bauwerke aus den Anfängen des Stahlbetonbaus eine wichtige Rolle in unserer modernen Infrastruktur.
- ▮ Das Laufenmühle-Viadukt ist als Teil eines Ensembles von drei Viadukten ein herausragendes Beispiel für die Entwicklung der Betontechnologie und der Betonbauweise.
- ▮ Die Zustandsanalyse denkmalgeschützter Bauwerke erfordert die Entwicklung eines objektangepassten Konzepts, die Anwendung moderner Regelwerke kann hier nur eingeschränkt erfolgen und zu Fehleinschätzungen führen.
- ▮ Der Einsatz moderner natur- und ingenieurwissenschaftlicher Verfahren und Techniken erhöht die Informationstiefe bezüglich des Bauwerkszustands. Dies erlaubt auch eine deutlich höhere Planungstiefe, was in diesem Fall zu einer Reduzierung der geplanten Kosten von ca. 3,5 Mio. auf ca. 2,2 Mio. Euro führte.
- ▮ Die Erprobung von vorgesehenen Instandsetzungsverfahren, verbunden mit einer Erfolgskontrolle, führt nicht nur zur Gewissheit, das richtige Verfahren gewählt zu haben, sondern liefert wichtige Daten für die Erarbeitung der Ausschreibungsunterlagen.
- ▮ Wichtige Bestandteile des Instandsetzungskonzepts sind Maßnahmen zur Qualitätssicherung und ein risikoangepasstes Monitoring während der nachfolgenden Nutzung.

Danksagung

Die Autoren danken den Kolleginnen und Kollegen aus den beteiligten Ingenieurbüros, Ingenieurbüro H. Rothenhöfer und IGP Ingenieurbüro von Frau Dr.-Ing. G. Patitz für die hervorragende Zusammenarbeit. An dieser Stelle möchten wir uns auch bei den Verantwortlichen der Gemeinde Welzheim und des Fördervereins Welzheimer Bahn e.V. für das große Vertrauen bedanken, ohne das dieses Projekt mit Modellcharakter sicher nicht zustande gekommen wäre.

Literatur

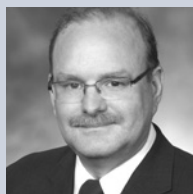
- [1] Lieb, U.: Eisenbahnbrücken: Baukunst aus Stein, Stahl und Beton. Stuttgart: Transpress, 2012
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton -DAfStb- (Hrsg.): Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie), Ausgabe Oktober 2001 mit den Berichtigungen der Instandsetzungs-Richtlinie: Erste Berichtigung 2002-01

vom Januar 2002, Zweite Berichtigung Instandsetzungs-Richtlinie 2005-12 von Dezember 2005 und Dritte Berichtigung Instandsetzungs-Richtlinie 2014-09 vom September 2014

- [3] Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – ZTV-ING, Stand 12/2012. URL: http://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Publikationen/Regelwerke/Baudurchfuehrung/EC-ZTV-ING-Teil-1-10-Baudurchfuehrung.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- [4] Stiglat, K.: Brücken am Weg: Frühe Brücken aus Eisen und Beton in Deutschland und Frankreich. Berlin: Ernst-Verlag, 2003
- [5] Herling, E.; Bösch, Th.; Burkhardt, R.: Bahrmühlenviadukt – Erhaltung und Ertüchtigung der 15-Bogen-Natursteinbrücke an der Strecke Neukieritzsch – Chemnitz. Bautechnik 88(2011), Nr. 7, S. 459–465
- [6] URL: http://www.appenzell24.ch/mittelland/die-gmuendertobelbruecke-ist--fertig-/artikel_3326
- [7] Konzett, J.; Reber, J.; Weidmann, R. et al. (Hrsg.): Schweizer Bahnbrücken. Zürich: Scheidegger & Spiess-Verlag, 2013
- [8] Heinemann, H.: Historic Concrete – From Concrete Repair to Concrete Conservation. Dissertation, TU Delft, 2013

INFO/KONTAKT

**Prof. Dr.
Andreas Gerdes**



1983 bis 1990 Studium der Chemie an der Technischen Universität in Clausthal; 1990 bis 2001 Leiter des bauchemischen Labors im Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETH Zürich; 2001 Promotion an der ETH Zürich zum Thema »Transport und chemische Reaktion siliciumorganischer Verbindungen in der Betonrandzone«; seit 2001 Leitung der Abteilung »Mineralogische Grenzflächen« am Institut für Funktionelle Grenzflächen am Karlsruhe Institut für Technologie (KIT); seit 2003 Professor für Bauchemie an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft; 2008 Mitbegründer der IONYS AG, weiterhin wissenschaftlicher Leiter und Aufsichtsratsvorsitzender; seit 2016 wissenschaftlicher Leiter des geförderten Projekts »KIT Innovation Hub – Prävention im Bauwesen«.

KIT Innovation Hub Prävention im Bauwesen
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
Gebäude 141
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
E-Mail: andreas.gerdes@kit.edu
Internet: www.kit.edu

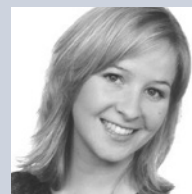
**M. Eng.
Tobias Bürkle**



2006 Abschluss Ausbildung zum Bauzeichner bei der Stadtverwaltung Freudenstadt; Studium Bauingenieurwesen an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft; 2011 Masterabschluss, Schwerpunkt: konstruktiver Ingenieurbau; Masterthesis »Optimierung der Nutzungsdauer von Infrastrukturbauwerken mittels präventivem Lebenszyklusmanagements«; anschließend bis 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, Schwerpunkte: Werkstoffe und Schadensmechanismen im Bauwesen; seit 2014 Mitarbeiter der IONYS AG, Schwerpunkte: chemisch-mineralogische Werkstoffuntersuchungen, Zustands- und Schadensanalysen an Bauwerken der technischen Infrastruktur; seit 2016 Prokurist und Gesamtleitung Projektgeschäft.

IONYS AG
Nördliche Uferstraße 8
76189 Karlsruhe
Tel.: 0721 98238026
E-Mail: t.buerkle@ionys.de
Internet: www.ionys.de

**B. Eng.
Lorena Rombach**



2012 bis 2016 Bachelor-Studium Bauingenieurwesen an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft; 2013 bis 2014 Auslandsjahr in Brasilien an der UNESP – Bauru und an der UNESP – São José dos Campos, Mitarbeit bei »Pro Junior« und Forschungsarbeit über Erdbeben bei CEMADEN – Zentrum für Überwachung und Warnmeldung von Naturkatastrophen; 2016 Bachelorarbeit »Techniken zur denkmalgerechten Instandsetzung historischer Eisenbahnbrücken aus Stahlbeton am Beispiel des Laufenmühle Viadukts«; 2016 bis 2018 Master-Studium Denkmalpflege (M.Sc.) an der Technischen Universität Berlin; 2017 bis 2018 Masterarbeit »Mittelalterliche Dachstühle und deren denkmalgerechten Instandsetzung am Fallbeispiel der Dachkonstruktion des Südhauses der Wallfahrtskirche Bad Wilsnack«.

E-Mail: lorenarombach@web.de



Abb. 1: Das Laufenmühle-Viadukt

Gabriele Patitz

Bauradar zur Bestandsbewertung am Laufenmühle-Viadukt

Das Laufenmühle-Viadukt wurde in interdisziplinärer Zusammenarbeit von Bauingenieuren, Geophysikern, Bauchemikern und Baustoffingenieuren untersucht und bewertet. Auf der Basis der vorliegenden Erkenntnisse kann jetzt ein an den tatsächlichen Bestand angepasstes Instandhaltungskonzept erarbeitet und ausgeführt werden. Diese aufeinander abgestimmten Voruntersuchungen schaffen nicht nur Planungssicherheit, sondern tragen in diesem speziellen Fall zu einer Kostenersparung im sechsstelligen Bereich bei. Die bereits vorhandenen Instandsetzungsvarianten wurden überarbeitet und präzisiert.

1 Aufgabenstellung

Für die weitere Betriebssicherheit und Nutzung mussten die vorhandenen Schadensbilder an den Bögen und Pfeilern erfasst, beurteilt und der Baubestand begutachtet und bewertet werden. Zunächst erfolgte eine übliche Bestandsbewertung allein auf der Basis von Erkenntnissen aus Bohrkernen. Zur besseren Beurteilung des Schadensbildes und dem sich daraus ergebenden Sanie-

rungsumfang wurden ergänzend flächig zerstörungsfreie Untersuchungen mit Bauradar ausgeführt. Ziel war es, die Bogenuntersichten hinsichtlich der Betonstruktur besser zu erkunden, unterschiedlich schadhafte Bereiche zu erfassen und zu bewerten.

Die Radarergebnisse wurden mittels einiger weniger gezielt entnommener Bohrkerns kalibriert.

Aufgrund dieser flächigen Erkundung eröffnete sich die Möglichkeit, ein an die tatsächlichen Verhältnisse angepasstes Sanierungskonzept zu entwickeln. Mit dem an den Bestand angepassten Sanierungskonzept kann jetzt bis zum Sommer 2018 eine gezielte und minimierte Sanierung unter erheblicher Kosteneinsparung erfolgen.

1.1 Die Untersuchungsmethode und das Verfahren Bauradar

Bei dem eingesetzten Bauradar handelt es sich um ein zerstörungsfreies indirektes Erkundungsverfahren aus der Geophysik, das seit mehr als 20 Jahren erfolgreich im Bauwesen zum Einsatz kommt.

Mit zerstörungsfreien geophysikalischen Untersuchungsverfahren werden zunächst als Ergebnis physikalische Größen ermittelt. Für die gewünschten bauspezifischen Informationen müssen diese dann interpretiert und bewertet werden. Mittels Kalibrierungen oder Vergleichsmessungen können im Bedarfsfall die Informationen weiter verifiziert werden. In Abhängigkeit vom Objekt und den Fragestellungen werden Kalibrierungen empfohlen und notwendig. Deren Anzahl kann aber minimiert werden und die Positionierung von beispielsweise Bohrungen kann ganz gezielt erfolgen. Oft sind dann nur noch kleine und sehr wenige Eingriffe nötig und die Untersuchungsobjekte bleiben weitgehend unbeschädigt. Aufgrund langjähriger Erfahrungen und einer interdisziplinären Zusammenarbeit erfahrener Geophysiker und Bauingenieure kann inzwischen die Bewertung der Ergebnisse oftmals auch ohne kalibrierende Eingriffe erfolgen [1] bis [4].

Die hier beschriebenen Untersuchungen erfolgten in Zusammenarbeit der Autorin mit Dipl.-Geophysiker Markus Hübner, GGU Gesellschaft für geophysikalische Untersuchungen mbH Karlsruhe.

Das Radarverfahren basiert auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in einem Medium. Deren Einleitung in das Untersuchungsobjekt erfolgt über eine auf der Oberfläche platzierte Sendeantenne (Sensor). Es ist meistens ausreichend, dass die Bauteile nur von einer Seite aus zugänglich sind. Die Wellen durchlaufen das Medium mit einer stoffspezifischen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Beim Fortschreiten werden die Wellen durch Divergenz, Reflexion, Streuung und Absorption geschwächt. Beim Übergang von einem Medium (Baustoff) in ein anderes mit abweichenden elektrischen Eigenschaften wird ein Teil der einfallenden Wellen gebrochen, während der verbleibende Anteil an der Grenzfläche reflektiert wird. An der Bauteiloberfläche werden die zurückgelangenden Reflexionen von dem Sensor aufgenommen, registriert und später interpretiert.

Datenaufnahme, Darstellung und Auswertung

Für die Aufnahme der Daten muss mit den Sensoren an der Oberfläche entlangefahren werden. Die Darstellung der Daten erfolgt in Form von Radargrammen, wobei es sich um Tiefenschnitte entlang der Messachse handelt. Dabei werden die Tiefenlage, der Verlauf und die Stärke der Reflexionen und Diffraktionen beurteilt. In



Abb. 2: Eine weitere Ansicht des Laufenmühle-Viadukts

Radargrammen sind z.B. die von der Bewehrung in unterschiedlichen Tiefen verursachten typischen Diffraktionen erkennbar und können ausgewertet werden. Hohlstellen zeichnen sich ebenso ab. Eine erste Datensichtung und Plausibilitätskontrolle erfolgt immer bereits vor Ort.

Die spätere Datenverarbeitung im Büro dient der Herausstellung der Nutzsignale in einer übersichtlichen Form und der genauen Zuordnung auf der Messfläche.

Bei einer hinreichenden Anzahl aufgenommener paralleler Radargramme können daraus Zeitscheiben berechnet werden. Bei den Zeitscheiben handelt es sich um die Berechnung von Tiefenhorizonten. Das sind grundrissähnliche Darstellungen der Reflexionsstärken über den gewählten Messbereich und Tiefenbereich. Es werden hier die Signalamplituden der aufgenommenen Reflexionen entsprechend der voreingestellten Farb- und Graustufenkodierung in Abhängigkeit von der Ortsvariablen und der Laufzeit der Wellen in speziell vorausgewählten Bauteiltiefen dargestellt. Der Abstand der einzelnen Radargramme ist für die Genauigkeit der Ergebnisse maßgebend.

Die Tiefenlage der berechneten Zeitscheiben ist abhängig von der Fragestellung. Abb. 3 zeigt schematisch parallele vertikale Radargramme und die Lage von drei daraus berechneten Zeitscheiben in verschiedenen Tiefenbereichen. Es handelt sich um Datenbeispiele an einer Staumauer aus Bruchsteinmauerwerk. Die hell umrissenen Flächen sind Verdachtsstellen mit erhöhtem Hohlraum-

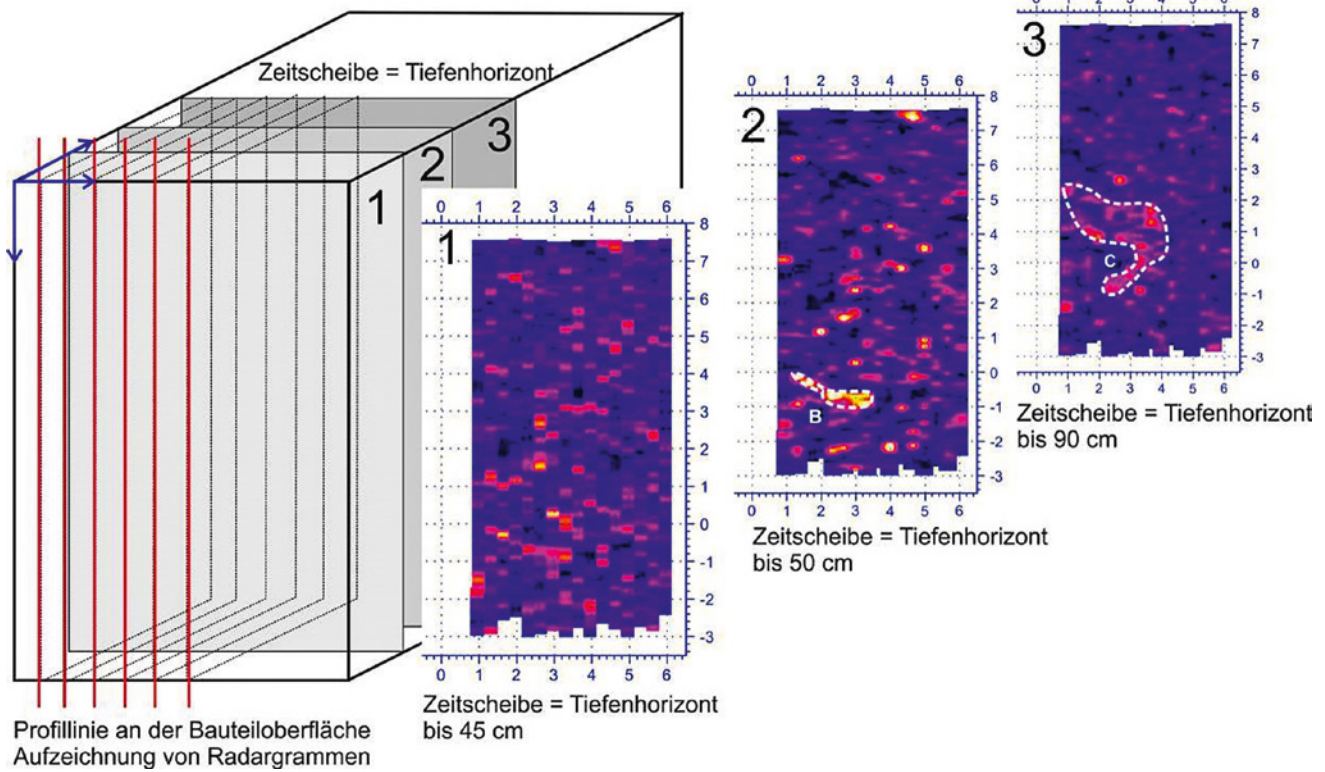


Abb. 3: Radarergebnisse als Zeitscheibe (Tiefenhorizont). Dies ist eine grundrissähnliche Darstellung aller Reflexionen in einer bestimmten Bauteiltiefe. Bei den umrissenen Flächen handelt es sich um Hohlstellenverdacht im Bruchsteinmauerwerk einer Talsperre, der über Bohrungen bestätigt worden ist. (Datenquelle: GGU mbH Karlsruhe)

teil in Tiefen größer ca. 50 cm. Bestätigt wurde dies durch gezielte Kernbohrungen. Die Maueroberflächen waren unauffällig.

2 Das Untersuchungskonzept am Laufmühle-Viadukt

Ziel der Radaruntersuchungen war es, die Betonstrukturen der Brückenbögen vollflächig zu bewerten. Neben Gefügestörungen sollten Bereiche geringerer Betonqualität erfasst werden. Die gewünschte Eindringtiefe wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber und dem Ingenieurbüro Rothenhöfer Karlsruhe auf ca. 70 cm festgelegt.

Für die Auswahl des geeigneten Sensors unter dem Aspekt der erreichbaren Eindringtiefe bei möglichst hoher Auflösung erfolgten zunächst Testmessungen. Bereits vor Ort zeigte sich, dass für diese Fragestellung der hochauflösende 1,5-GHz-Sensor das geeignete Gerät ist (Abb. 4). Für das vollflächige Abscannen der Bogenuntersichten erwiesen sich horizontale Messprofile als schnell und effektiv ausführbar. An allen Bögen waren die einzelnen Bretter der Betonschalung erkennbar und deshalb wurden die Radarprofile mittig entlang des jeweiligen Schalungsbrettes aufgenommen. Die Zugänglichkeit der Flächen war nur teilweise ohne Hilfsmittel möglich. Die Datenaufnahme erfolgte über eine geeignete Hebebühne. Der zeitliche Aufwand für die Datenerfassung hängt prinzipiell von der Leistungsfähigkeit der Hebebühnen oder anderen technischen Hilfsmitteln ab.

Zur Kalibrierung der Radarergebnisse wurden Entnahmestellen für Kernbohrungen in den Radardaten auskartiert. Im FPI Forschungs- und Prüfinstitut Steine und Erden Karlsruhe e.V. wurden neben der Rohdichte die Betonfestigkeiten bestimmt. Die Bohrkernansprache erfolgte durch die IONYS AG Karlsruhe.

3 Auswertung der Radaruntersuchungen

Für die Bewertung des Betonzustands wurden in folgenden Tiefenbereichen Zeitscheiben berechnet:

- ca. 2–10 cm: die vorhandene Bewehrung ist erkennbar,
 - ca. 5–20 cm: Bereiche oberflächennaher Abplatzungen und Verwitterungen,
 - ca. 15–35 cm: tiefer liegende Betonbereiche.
- In Bauteiltiefen größer 35 cm waren in den Radargrammen keine signifikanten Veränderungen mehr erkennbar und somit mussten für diese tieferen Bereiche keine Zeitscheiben mehr berechnet werden.

Die unterschiedlichen Reflexionsstärken sind in den Zeitscheiben farbcodiert wiedergegeben. Die Bewertung und Kalibrierung erfolgte auf der Basis der Baustoffprüfungen anhand der gezielt entnommenen Bohrkern aus dem Bogen 3 (Abb. 5 bis 7).

- Farbcodierung Blau: geringe Reflexionsstärke, homogene, kompakte und einheitliche Betonstruktur,
- Farbcodierung Gelb: stark erhöhte Reflexionsstärken, sehr inhomogene, uneinheitliche Betonstruktur mit zahlreichen Hohlräumen, sehr grobkörniger Beton mit fast keinem Feinkornanteil.



Abb. 4: Der 1,5-GHz-Sensor wird horizontal entlang der Oberfläche geführt.

3.1 Ergebnisbeispiel am Bogen 3

Sämtliche Bogenuntersichten wurden fotografisch erfasst. Exemplarisch zeigt dies das Orthofoto Abb. 8 am Bogen 3, welches von der Messbildstelle GmbH Dresden aufgenommen wurde.

Durch die IONYS AG Karlsruhe erfolgte eine visuelle und fotografische Erfassung und Bewertung sämtlicher Schäden sowie eine Ortung der oberflächennahen Bewehrung.

Die Zeitscheiben in Abb. 8 wurden auf der Basis der Bohrkernbeurteilung interpretiert und bewertet:

- Betonhomogenität in ca. 5–20 cm Tiefe: weitgehend homogene Betonstruktur, lokal inhomogene Bereiche zwischen 12,5 und 15 m über die gesamte Bogenbreite,
- Betonhomogenität in ca. 15–35 cm Tiefe: lokal teilweise stark inhomogene Bereiche zwischen 13,5 und 15,5 m und 0–3 m über die gesamte Bogenbreite (siehe dazu auch Bohrkern in Abb. 7).

3.2 Ergebnisbeispiel am Bogen 5

Abb. 9 zeigt die Radarergebnisse am Bogen 5. Im Vergleich mit den Ergebnissen an Bogen 3 wird sehr deutlich erkennbar, dass der Beton am Bogen 5 in einem deutlich besseren Zustand ist. Bis in die Tiefe von ca. 35 cm kann hier von einem weitgehend homogenen Beton (B 25) ausgegangen werden. Lediglich in den beiden umrissenen Randbereichen ist ein größerer Hohlraumanteil und lokal ein B 10 vorhanden (Abb. 7). Es ist also sinnvoll und gegeben, ein an den tatsächlich vorhandenen Schadensgrad der einzelnen Bögen angepasstes Instandsetzungskonzept zu entwickeln.

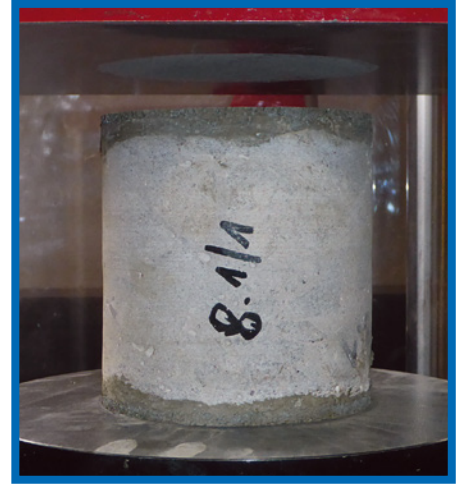


Abb. 5: Kalibrierungsbohrkern; homogener Beton, entspricht hier einem B 25



Abb. 6: Kalibrierungsbohrkern; inhomogener Beton, entspricht hier einem B 10 bis B 15

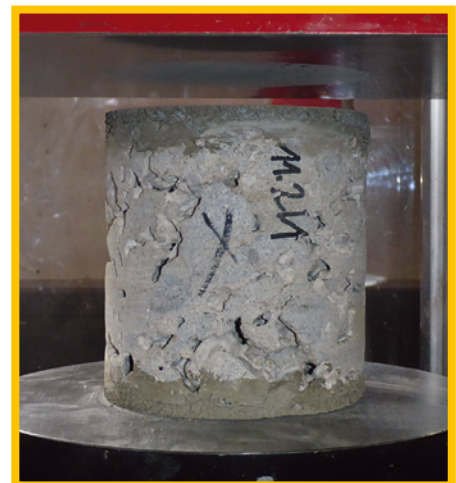


Abb. 7: Kalibrierungsbohrkern; sehr inhomogene uneinheitliche Betonstruktur, entspricht hier einem B 10

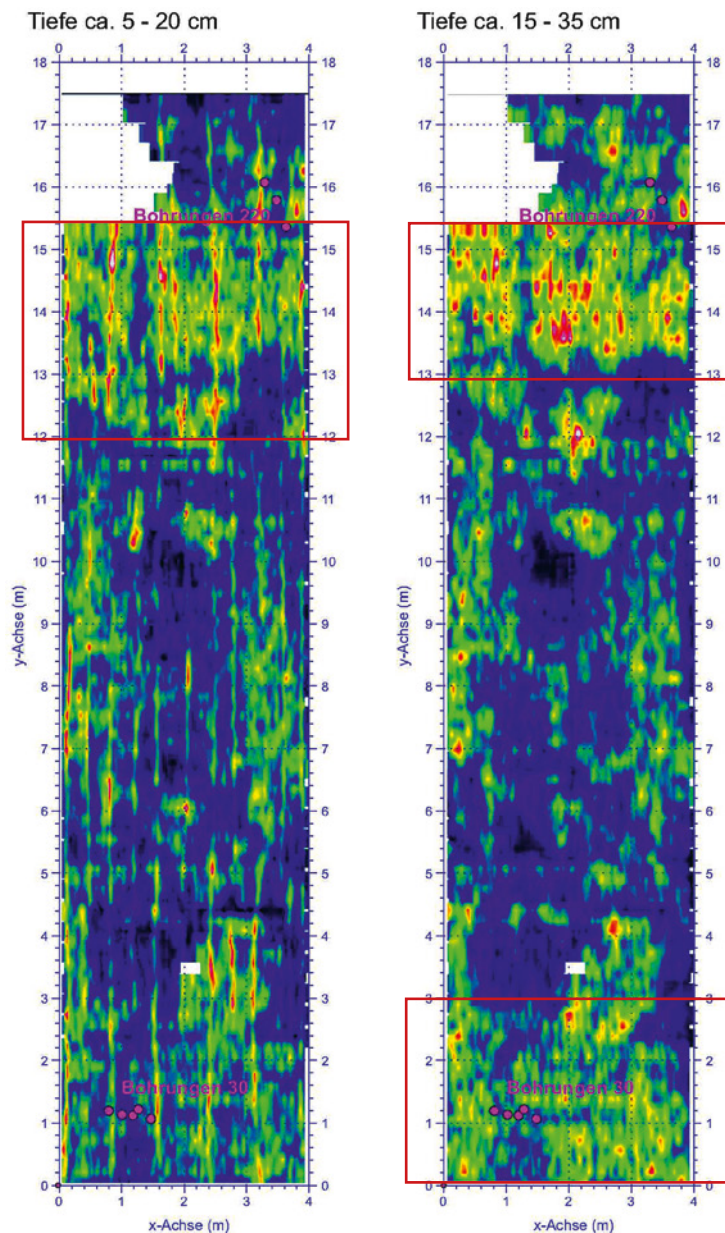
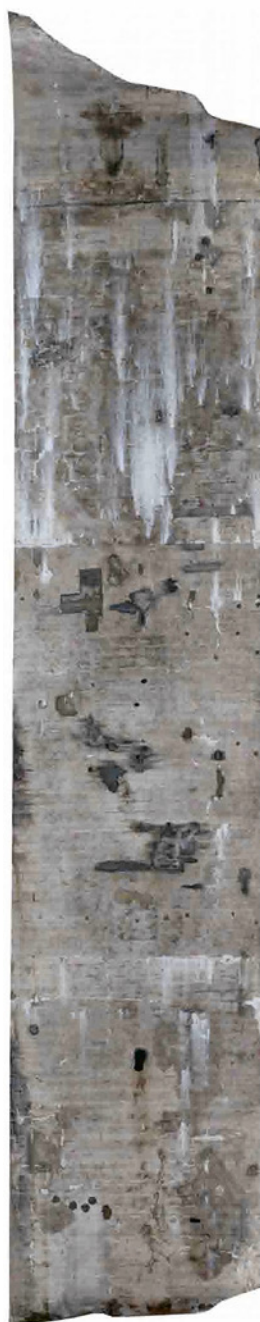


Abb. 8: Links: fotogrammetrische Aufnahme der Bogenuntersicht am Bogen 3 (Quelle: Messbildstelle Dresden GmbH), rechts: Radardaten als Zeitscheibe für die Tiefenbereiche ca. 5–20 cm und ca. 15–35 cm. Bei den hellen linearen Strukturen handelt es sich um die Bewehrung. Die inhomogenen Betonbereiche mit deutlich erhöhtem Hohlraumanteil erscheinen als helle Flächen (Farbgebung grün, gelb, rot). Sie sind zusätzlich umrissen worden. (Datenquelle: GGU mbH Karlsruhe)

4 Kontrolle des Verpresserfolgs mit Bauradar an Testfeldern

An den Bögen 2 und 3 wurden exemplarisch auf der Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Radarmessungen zur Suche von Hohlstellen typische Verpressbereiche ausgewählt. Diese Bogenfelder waren alle ohne Hilfsmittel zugänglich.

Das Konzept für die Auswahl geeigneter Verpressmaterialien wurde von der IONYS AG erstellt. Die Materialuntersuchungen erfolgten wieder in Zusammenarbeit mit dem FPI Forschungs- und Prüfinstitut Steine und Erden Karlsruhe e.V.

Folgende Verpressmaterialien kamen am Bogen 2 zum Einsatz:

- Zementsuspension w/z 0,6,
- Tubag-Mörtel w/b 0,6,
- Schaumzement Schwenk (wenig Schaum),
- Schaumzement Dyckerhoff (wenig Schaum).

Folgende Verpressmaterialien kamen am Bogen 3 zum Einsatz:

- Schaumzement (mehr Schaum),
- Tubag-Mörtel von unten nach oben w/b 0,55 und 0,45.

Am Bogen 2 wurde zusätzlich auf die Betonoberfläche eine dünne Mörtelschicht von ca. 3 bis ca. 4 cm aufgebracht.

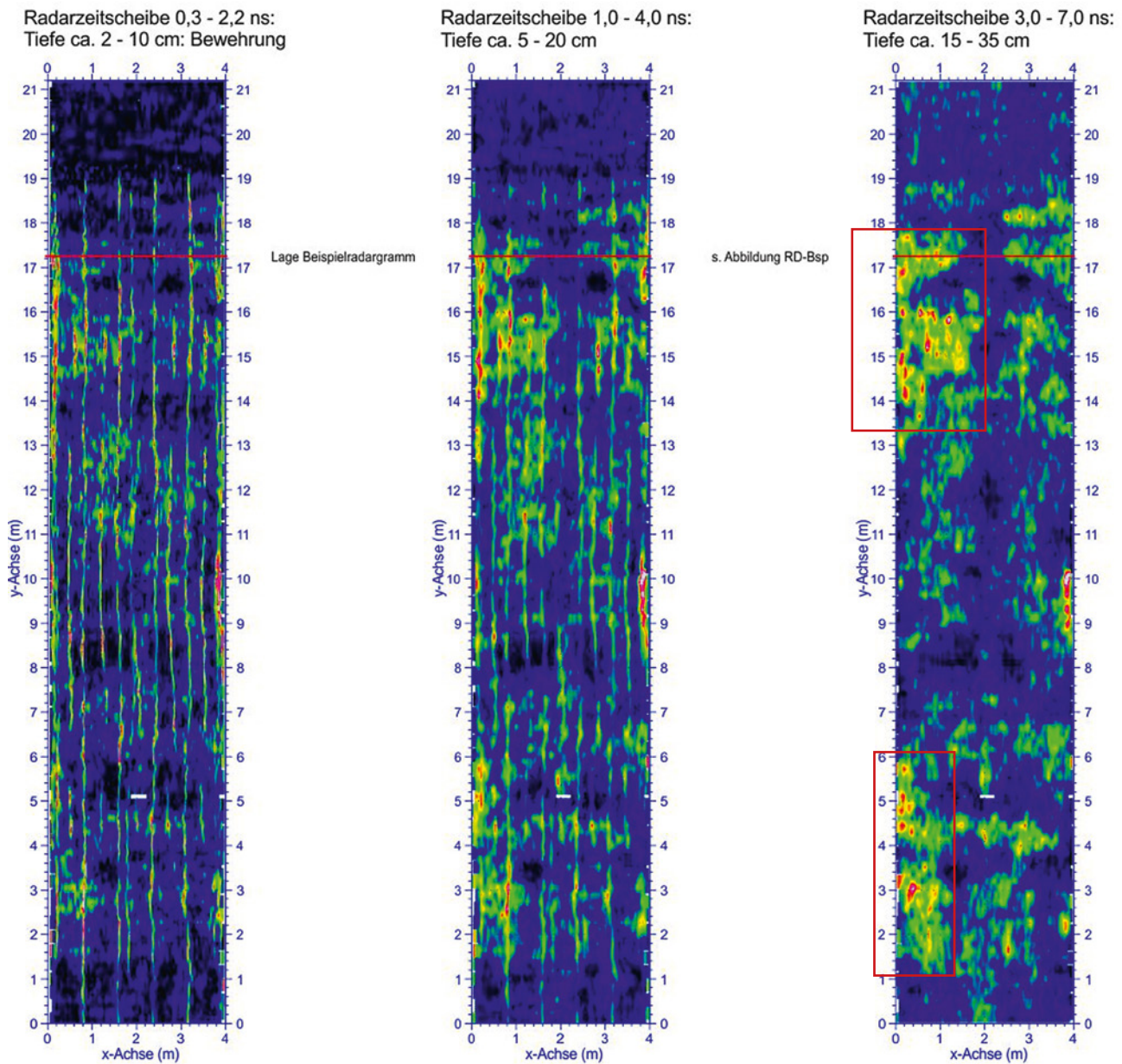


Abb. 9: Radardaten am Bogen 5 als Zeitscheibe für die Tiefenbereiche ca. 2–10 cm, ca. 5–20 cm und ca. 15–35 cm. Die einzelnen Bewehrungsstäbe zeichnen sich durch lineare starke Reflexionen deutlich ab. Im Tiefenbereich bis ca. 20 cm ist ein weitgehend homogener Beton (B 25) vorhanden. Dies trifft auch 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. (Datenquelle: GGU mbH Karlsruhe)

Mit den Radarmessungen sollten folgende Fragen beantwortet werden:

- Können Radarmessungen zur Kontrolle des Verpresserfolgs in kurzer Zeit nach dem Verpressen erfolgreich durchgeführt werden?
- Sind die Radardaten aus den Messungen unverpresster Zustand/verpresster Zustand reproduzierbar und somit vergleichbar?
- Welchen Einfluss hat die mit einer Mörtelschicht veränderte Betonoberfläche auf die Radardaten?
- Lassen sich Verpresserfolge in den Radardaten nachweisen und spezifizieren?

4.1 Durchführung der Radarmessungen zur Verpresskontrolle

Um die Radardaten aus den beiden Messkampagnen vergleichen zu können, wurde neben den identischen Geräteeinstellungen und der Verwendung des identischen Radarsensors auch das identische Messraster an den Bogenuntersichten verwendet. Die Radarmessungen erfolgten bereits zwei Tage nach den Verpressarbeiten.

Radarzeitscheibe 1,0 - 4,0 ns:
Tiefe ca. 5 - 20 cm

Radarzeitscheibe 3,0 - 7,0 ns:
Tiefe ca. 15 - 35 cm

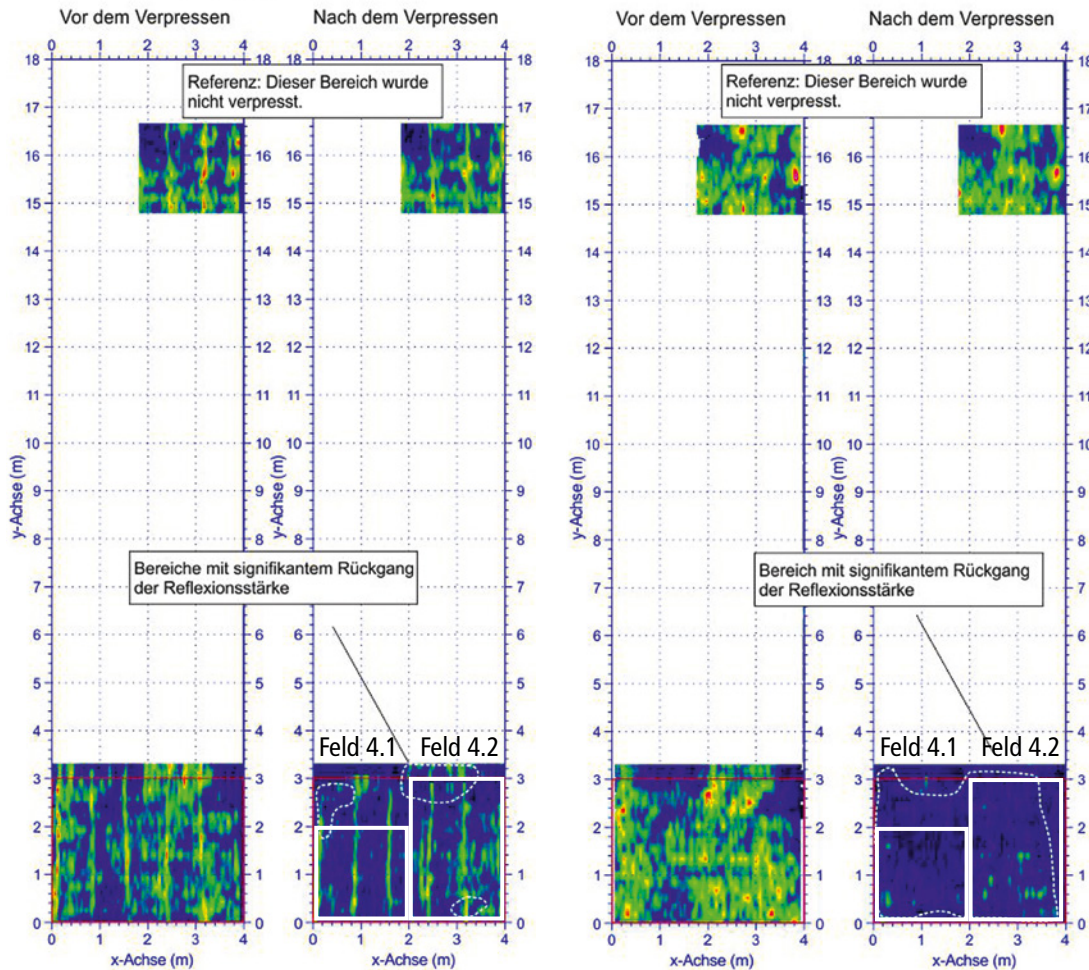


Abb. 10: Radardaten am Bogen 3 als Zeitscheibe für die Tiefenbereiche ca. 5–20 cm (oberflächennaher Bereich hinter der Bewehrung) und ca. 15–35 cm. Links die Radardaten vom unverpressten Zustand, rechts die Radardaten im verpressten Zustand. Nach dem Verpressen sind keine Verdachtsstellen auf Hohlräume im Tiefenbereich von ca. 15–35 cm mehr vorhanden. Bestätigt wurde dies durch gezielte Kernbohrungen. (Datenquelle: GGU mbH Karlsruhe)

4.2 Auswertung der Radarmessungen zur Verpresskontrolle

Für die Datenverarbeitung und Auswertung sowie Ergebnisdarstellung wurden für eine Vergleichbarkeit mit den vorhandenen Daten auf die bereits bewährten Routinen zurückgegriffen. In den Ergebnisbildern sind die Radarergebnisse beider Messungen (verpresst und unverpresst) vergleichend für die Tiefenbereiche ca. 5–20 cm und ca. 15–23 cm dargestellt, hier exemplarisch für den Bogen 3 (Abb. 10). Für die Bewertung wurden zusätzlich Bohrkerne entnommen und geprüft.

Die Radarmessungen zur Kontrolle des Verpresserfolgs mit den verschiedenen Materialien können wie folgt bewertet werden:

- Die Radardaten sind bei dieser Herangehensweise reproduzierbar und somit auch vergleichbar. Die Verän-

derungen in den Radardaten werden tatsächlich durch den unterschiedlichen Verpresserfolg verursacht.

- Die durch die Mörtelschicht veränderte Betonoberfläche hat keinen Einfluss auf die Datenqualität und Bewertung.
- Die zeitliche Nähe, hier von nur zwei Tagen, zwischen Verpressarbeiten und Radarmessungen hat keinen Einfluss auf die Messergebnisse.
- Der Verpresserfolg mit den verschiedenen Materialien ist unterschiedlich gut. In allen Feldern ist der oberflächennahe Bereich im Umfeld der Bewehrung schlecht bis kaum verfüllt, ausgenommen die vorab verputzten Flächen.
- Der schlechteste Verpresserfolg für alle Tiefenbereiche ergab sich bei der Verwendung des Tubag-Mörtels w/b 0,6.
- Die verwendete Zementsuspension w/b 0,6 hat die Hohlräume nur in den tieferen Bereichen von ca. 15–35 cm verschlossen, allerdings nicht vollständig und nicht vollflächig.

- ▶ Sehr gute Ergebnisse lieferten die beiden Schaumzemente (wenig Schaum) für alle Tiefenbereiche.
- ▶ Schaumzement (mehr Schaum) und Tubag-Mörtel w/b 0,55 und w/b 0,45 (von unten nach oben) ergaben eine vollflächige Verpressung in dem Tiefenbereich von ca. 15–35 cm. Der oberflächennahe Bereich bis ca. 15 cm wurde hier nur wenig verpresst.

Das Bauradar kann folglich nicht nur zur Ortung von inhomogenen und hohlraumreichen Bauteilbereichen eingesetzt werden, sondern ebenso zur Qualitätskontrolle von Bauteilvergütungen dienen.

Auf der Basis dieser Ergebnisse und der Bewertung der Praktikabilität der verschiedenen Verpressmaterialien vor Ort wurde von der IONYS AG das geeignete Verpressmaterial ausgewählt und dem Bauherrn empfohlen (siehe hierzu den Beitrag von A. Gerdes, T. Bürkle und L. Rombach).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die zerstörungsfreien Untersuchungen mit Bauradar erfolgten als Präzisionsmessungen mit einem hochauflösenden Radarsensor mit einer Eindringtiefe von mehr als ca. 70 cm. Die Datenqualität kann als sehr gut bewertet werden und die Datenaufnahme erfolgte in einem engen zeitlichen Fenster im ausreichend dichten Messraster. Die Auflösung und Genauigkeit der berechneten Zeitscheiben ist sehr hoch und entspricht den Anforderungen aus der Fragestellung.

Veränderungen in der ansonsten recht homogenen und kompakten Betonstruktur wie z.B. Verdachtsstellen auf Hohlräume, Kiesnester und Entmischungen lassen sich in den Radardaten in unterschiedlichen Abschnitten bis in Tiefen von ca. 35 cm und tiefer erkennen und auskartieren. Deutliche Veränderungen in der Betonstruktur tiefer als 35 cm sind hier jedoch nicht vorhanden.

Um die im Radar aufgrund unterschiedlicher Reflexionsstärken und unterschiedlicher Absorption erkennbaren Bereiche zu bewerten, erfolgten gezielt Kalibrierungsbohrungen an verschiedenen Bögen. Durch die Kooperationspartner IONYS AG und FPI Karlsruhe e.V. wurde die Struktur der Bohrkerne erfasst und an ausgewählten Abschnitten die Betondruckfestigkeit bestimmt.

Bei dem inhomogenen Beton handelt es sich um Bereiche mit schlechter Verdichtung bzw. Bindemittelverlust; große Zuschläge sind ohne Feinkorn und Bindemittel unsystematisch verteilt vorhanden. Die Auskartierung

der Bereiche unterschiedlicher Betonqualität auf Basis der Radarergebnisse und Bohrkernanalysen erfolgte durch die IONYS AG (siehe hierzu Beitrag A. Gerdes, T. Bürkle, L. Rombach).

Mit der Kenntnis über den tatsächlichen Zustand des Betons in den einzelnen Bögen erfolgte ein erneuter statischer Nachweis der Standsicherheit. Zusätzliche Verstärkungsmaßnahmen waren nicht mehr erforderlich, um den geplanten Eisenbahnbetrieb weiter zu gewährleisten (siehe Beitrag H. Rothenhöfer und B. Marquardt). Nur die auskartierten hohlraumreichen Bereiche wurden nach Materialvorgaben der IONYS AG verpresst. Die Eingriffe in das Bauwerk wurden somit auf das tatsächlich notwendige Minimum reduziert.

Erhalten historischer Bauwerke e. V.

Wir wollen zur Erhaltung und zur Pflege unseres kulturellen Erbes einen aktiven Beitrag leisten.
Im Mittelpunkt unserer Aktivitäten stehen die Denkmalpflege und die Bewahrung historischer Bauwerke sowie orts- und landschaftsprägender Ensembles.

Wir veranstalten Seminare, Tagungen und Ausstellungen. Fachpublikationen können über den Verein bezogen werden.

www.erhalten-historischer-bauwerke.de
info@erhalten-historischer-bauwerke.de

Bauen im Bestand



**ZIEGEL,
MAUER- UND
NATURSTEINE**

**MÖRTEL +
PUTZE**

**BETON +
ESTRICHE**

Mauerwerksprüfungen

- Erkundung konstruktiver Details, Bewehrung, Hohlräume, Materialwechsel
- Ermittlung statischer Parameter
- Analyse von Salzarten und Bestimmung von Salzgehalten
- Bestimmung von Bauteilfeuchten

**Forschungs- und Prüfinstitut
Steine und Erden Karlsruhe e.V.**



Griesbachstr. 8
76185 Karlsruhe
+49(0)721-85239
www.fpi-ka.de

Unmittelbar nach den Verpressarbeiten erfolgte deren Qualitätskontrolle, ebenfalls zerstörungsfrei mit Bauradar. Mittels identischer Gerätetechnik, Einstellungen, Messpositionen und Auswerterroutinen konnte der Erfolg der Verpressarbeiten kontrolliert und dokumentiert werden. Nur wenige, nicht mit Verpressgut gefüllte Abschnitte wurden nachgearbeitet.

Das Bauradar konnte in interdisziplinärer Zusammenarbeit von der erfahrenen Bauingenieurin Dr.-Ing. Gabriele Patitz und Dipl.-Geophysiker Markus Hübner erfolgreich eingesetzt werden, um effektiv Fehlstellen in unterschiedlichen Bauteiltiefen im ca. 100 Jahre alten Beton zu finden und zu bewerten. Dieses Verfahren und die Methodik haben sich in dieser Zusammenarbeit bereits seit Jahren u. a. bei der Erkundung von Verkehrswasserbauwerken bewährt. An zahlreichen wasserführenden älteren Betonbauwerken konnten Erfahrungen gesammelt werden. Der Einsatz von Bauradar wurde bereits bei mehreren Projekten mit fotogrammetrisch erstellten Orthofotos bzw. Abwicklungen der Oberflächen kombiniert, u. a. auch an druckwasserführenden betonierten Leitungen und Stollen. Diese Kombination hat weitere Vorteile und ermöglicht eine sehr effektive Bestandserfassung und -bewertung. An der Oberfläche sichtbare Schäden und Befunde ergänzen die Ergebnisse der Radaruntersuchung, ermöglichen die Verortung der Fehlstellen, eine gezielte Probeentnahme und ein Monitoring des weiteren Verlaufs von Schadensprozessen. Das Sanierungskonzept kann optimiert, auf den tatsächlichen Zustand zugeschnitten und die Sanierungsausführung kontrolliert werden.

Weiterführende Literatur zur Anwendung des Bauradars

- [1] Patitz, Gabriele: Zerstörungsfreie Untersuchungen an altem Mauerwerk. Berlin: Beuth Verlag, 2009
- [2] Patitz, Gabriele; Reschke, Thorsten: Zerstörungsfreie Strukturuntersuchungen am Beton unbewehrter Schleusenammerwände mit Radar. In: Venzmer, Helmuth (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2007. Berlin: Beuth Verlag, 2007
- [3] Patitz, Gabriele: Anwendung zerstörungsfreier Verfahren zur Untersuchung alten Mauerwerks und alter Betonbauwerke. Der Bausachverständige 5(2009), Nr. 3, S. 9–14
- [4] Seibel, Zöller (Hrsg.): Baurechtliche und -technische Themensammlung. Heft 7: Bauteiluntersuchung. Notwendigkeit und Grenzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2016

INFO/KONTAKT



Dr.-Ing. Gabriele Patitz

Hochschulstudium Bauingenieurwesen TH Leipzig; 1998 Promotion zum Dr.-Ing. an der Universität Karlsruhe (TH), SFB 315 Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke; Tätigkeit in der Forschungsgruppe Mauerwerk, Prof. Dr.-Ing. Dr. ec. Fritz Wenzel; 1998 Gründung des Ingenieurbüros IGP für Bauwerksdiagnostik und Schadensgutachten; 2004 Gründung und Vorstandsvorsitzende des gemeinnützigen Vereins Erhalten historischer Bauwerke e.V. – seit 2004 Veranstalter der jährlich stattfindenden Fachtagung »Natursteinsanierung Stuttgart«; seit 2012 stellv. Leiterin des Forschungs- und Prüfinstituts Steine und Erden Karlsruhe e.V., in Teilzeit; seit 2014 Vorstandsmitglied im Beirat für Denkmalerhaltung der Deutschen Burgenvereinigung e.V.; zahlreiche Veröffentlichungen, Vorträge und Vorlesungen an Hochschulen, Weiterbildungseinrichtungen und Fachtagungen, Herausgabe von Fachbüchern.

IGP Ingenieurbüro für Bauwerksdiagnostik und Schadensgutachten
Alter Brauhof 11
76137 Karlsruhe
E-Mail: mail@gabrielepatitz.de
Internet: www.gabrielepatitz.de

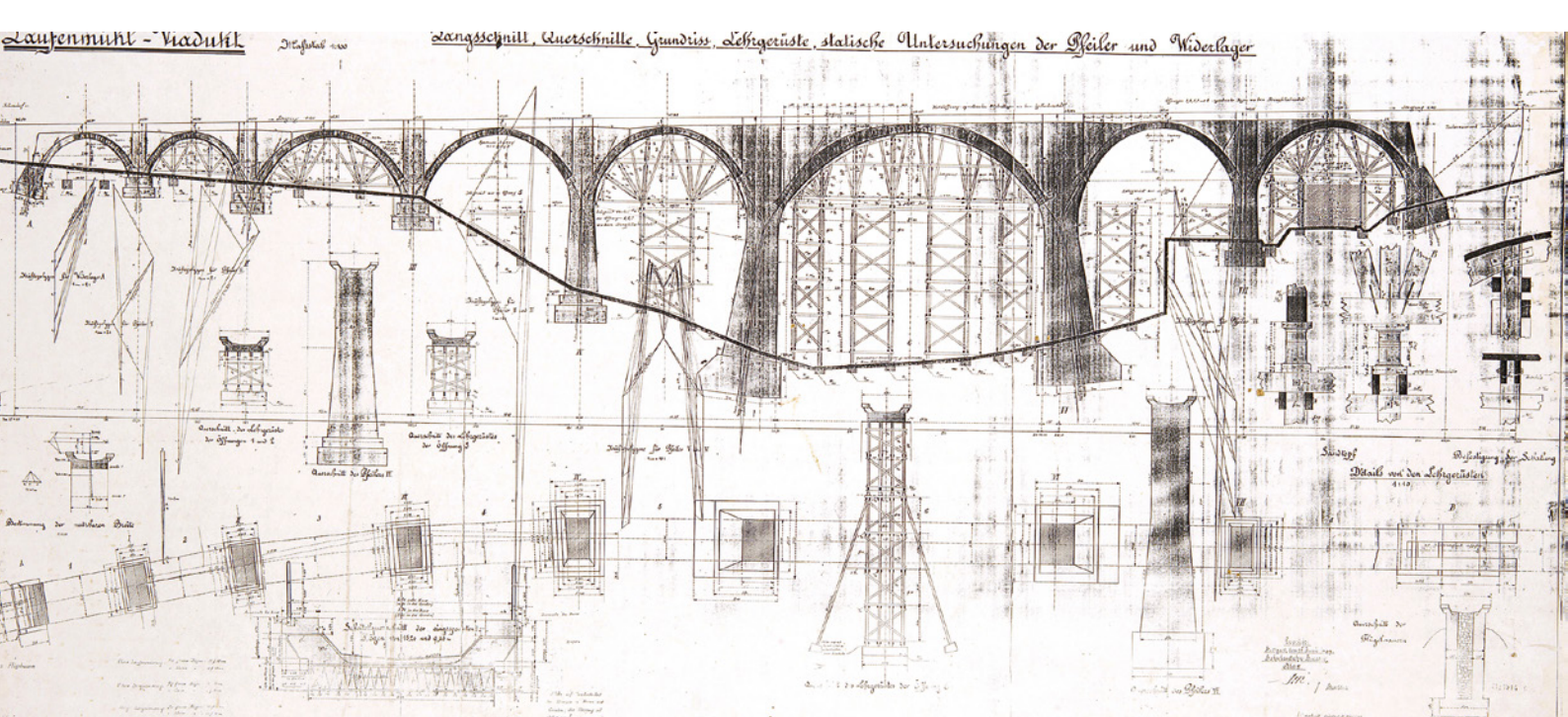
- ✓ Betoninstandsetzung
- ✓ Korrosionsschutz
- ✓ Industrieböden
- ✓ Umweltschutztechnik



Neckarstraße 2
71679 Asperg

Tel. 07141 / 268-0
Fax 07141 / 268-222

www.bauschutz.de



Hermann Rothenhöfer, Bettina Marquardt

Ermittlung der Belastbarkeit und Nutzungsnachweise historischer Brückenbauwerke am Beispiel der Eisenbahnbrücke Laufmühle-Viadukt

Grundvoraussetzung für eine Instandsetzungsplanung ist eine ausreichende Tragfähigkeit des Bauwerks für die tatsächlich auftretenden Betriebslasten. Daher war ein Nachweis der Standsicherheit des Laufmühle-Viadukts – eine Gewölbebrücke in teilweise bewehrter Betonbauweise mit acht Öffnungen aus dem Jahr 1909 – in km 17,194 der Strecke (Schorndorf)–Rudersberg–Welzheim der Schwäbischen Waldbahn zu erbringen.

Die statische Nachrechnung erfolgte auf Grundlage von Bestandsunterlagen, des tatsächlichen Bauwerkzustands und des künftigen Betriebsprogramms der Schwäbischen Waldbahn. Im Ergebnis einer ersten Nachrechnung wurden Instandsetzungskonzepte entwickelt bzw. weiterentwickelt, die den Eisenbahnbetrieb über das Viadukt auch in Zukunft ermöglichen.

Um wirtschaftliche Lösungen zu finden, war eine interdisziplinäre Vorgehensweise zwingend. Erst die Zusammenarbeit von Bauingenieuren, Sachverständigen für Eisenbahnbrücken/Bauwerksprüfung, Baustoffchemiker, Baustoffingenieure und Geophysiker ermöglichte die Entwicklung einer wirtschaftlichen Lösung, die sowohl die Zustimmung der Denkmalbehörde und insbesondere des Eisenbahnbetriebsleiters fand. Der Arbeitsprozess wurde konstruktiv und eng von der Schwäbischen Waldbahn, dem für die Betriebsgenehmigung verantwortlichen Eisenbahnbetriebsleiters und der Denkmalbehörde begleitet. Darüber hinaus war der Eisenbahnbetrieb bis zum Beginn und möglichst auch während der Instandsetzungsarbeiten sicherzustellen.

1 Allgemeine Vorgehensweise

Für die weitere Nutzung des Laufmühle-Viadukts musste die Tragfähigkeit der Bögen ermittelt werden.

Grundvoraussetzung des rechnerischen Nachweises ist die ingenieurtechnische Prüfung des Bauwerkszustands vor Ort, explizit die genaue Schadensaufnahme und insbesondere die Beurteilung der vorhandenen Schäden hinsichtlich ihrer Ursache und Wirkung (Abb. 1).

Im Falle des Laufmühle-Viadukts wurden lediglich alterungsbedingte Schäden (Korrosion der Bewehrung mit nachfolgenden Abplatzungen des Betons an der Oberfläche, herstellungsbedingte Risse an den Betonierabschnittsgrenzen mit Wasseraustritt



Abb. 1: Bauwerksprüfung



Abb. 2: Bogen 6; Scheitel – freiliegende Gelenkbewehrung

und Aussinterungen infolge mangelhafter Abdichtung der Fahrbahn (Schottertrog) festgestellt (Abb. 2). Schäden, die auf eine Überbelastung des Tragwerks hinweisen, wurden nicht festgestellt.

Nachdem in Zusammenarbeit mit der IONYS AG Karlsruhe eine grundsätzliche Sanierungsmöglichkeit des stark inhomogenen Betons gefunden war, stellte sich zunächst die Frage nach statisch kritischen, besonders beanspruchten Tragwerksbereichen und einer mindestens erforderlichen Betonfestigkeit in den einzelnen Bogenbereichen unter Berücksichtigung der für die Zukunft geplanten Nutzung des Bauwerks. Mögliche Querschnittsminderungen infolge Abplatzungen müssen hierbei berücksichtigt werden. Diese Untersuchungen dienten der Festlegung von Orten der Proben-/Materialentnahme und weiteren betontechnischen Untersuchungen.

Nach weiteren Untersuchungen vor Ort, Material- und Radaruntersuchungen und der daraufhin erfolgten Feststellung der nach Instandsetzung zu erwartenden homogenisierten Betondruckfestigkeit konnte die zukünftige Belastbarkeit des Bauwerks durch rechnerische Nachweise ermittelt werden.

2 Normative Grundlage

- DB Netz AG »Richtlinie 804 – Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten« (RL 804)
- DB Netz AG »Richtlinie 805 – Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken« (RL 805)
- Taschenbuch für Bauingenieure, 3. Auflage 1919 [3]
- Schneider Bautabellen, 7. Auflage [5]
- Handbuch Brückenbau, Auflage 2014 [7]

3 Allgemeines zur Brücke

- Baujahr: 1909
- Bauart: 8-feldrige Bogenbrücke in Beton-/Stahlbetonbauweise
- Gleisradius: $R \geq 300 \text{ m}$ / Übergangsbogen / $R = \infty$
- Lichte Weiten der Gewölbe / System (Abb. 3 und 4):
 Bogen I u. II: LW = 9,40 m; biegesteifer Bogen, bewehrt
 Bogen II – V, VII – VIII: LW = 15,20 m; biegesteifer Bogen, bewehrt
 Bogen VI: LW = 27,00 m; 3-Gelenk-Bogen, unbewehrt

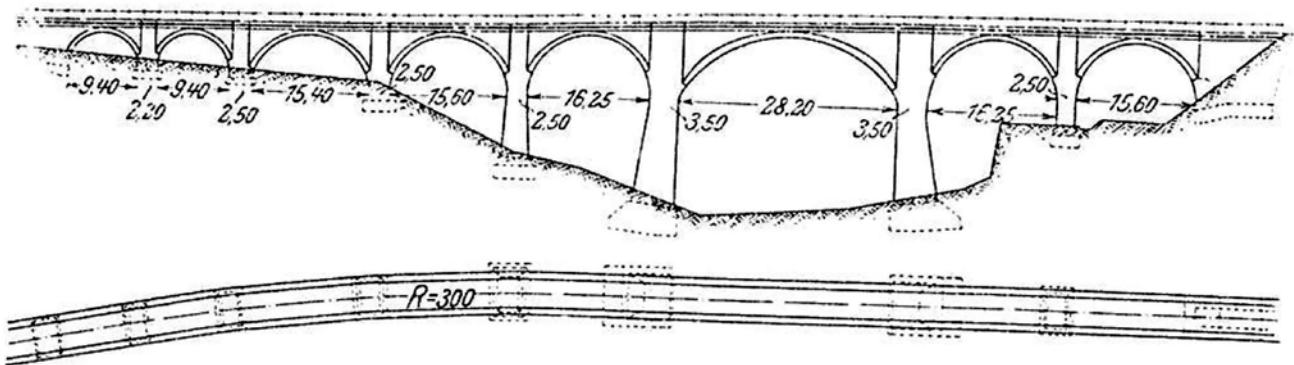


Abb. 32. Laufenmühleviadukt.

Abb. 3: Planausschnitt – Ansicht Laufenmühle-Viadukt

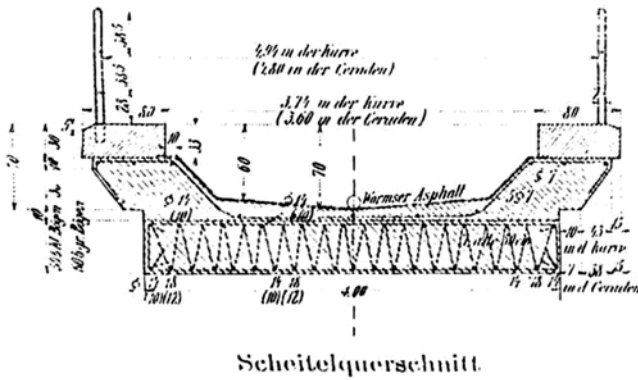


Abb. 4: Planausschnitt – Querschnitt Scheitel

4 Nachweis Gewölbebrücken

Der Nachweis der Bögen erfolgt nach RL 805.0203 durch vereinfachte Ermittlung der Tragsicherheit. Hierbei muss nachgewiesen werden, dass die Spur der Druckresultierenden in jedem Tragquerschnitt des Gewölbes mindestens im Abstand $d/6$ vom gedrückten Rand entfernt verläuft.

Die Pressungen im Gewölbetragwerk sind unter Ausschluss von Zugspannungen nachzuweisen. Bei Gewölbetragwerken aus unbewehrtem Beton dürfen diese Pressungen die 0,5-fache Rechenfestigkeit β_R des Betons nicht überschreiten

Bei einachsiger Biegung bedeutet dies

$$e_z = My/N \leq d/3$$

$$\sigma_{\max} = 2 \cdot N / [3 \cdot (d/2 - e_z) \cdot b] \leq 0,5 \cdot \beta_R$$

und für zweiachsige Biegung

$$e_z = My/N \leq 0,32 \quad e_y = Mz/N$$

$$\sigma_{\max} = \mu \cdot N / (d \cdot b) \leq 0,5 \cdot \beta_R$$

(mit μ nach Schneider Bautabellen [5], Tabelle S. 4.37)

Der Nachweis wird nach der bewährten Berechnungsmethode, wonach unter 1,0-fachen Lasten (Gebrauchszustand) die Lage der Druckresultierenden und zulässige Druckspannungen nachzuweisen sind, geführt, da die Zusammenhänge zwischen Klaffen und Pressung unter Gebrauchslast und rechnerischer Bruchlast erst noch untersucht werden müssen, bevor die Konzeption der Teilsicherheitsbeiwerte auf Gewölbetragwerke angewendet werden kann.

Weitere Tragreserven wie z. B. aus Mitwirkung von Stirnmauern und Überschüttung wurden im Falle des Laufenmühle-Viadukts nicht genutzt.

In der Regel müssen nur zwei Lastfälle (Lastfall H) untersucht werden (Abb. 5):

- Lastfall 1: Volllast
ständige Lasten (G) und Verkehrslasten (P)
über die gesamte Länge des Gewölbes
- Lastfall 2: halbseitiger Verkehr
ständige Lasten (G) und Verkehrslasten (P)
nur über einer der Gewölbehälften

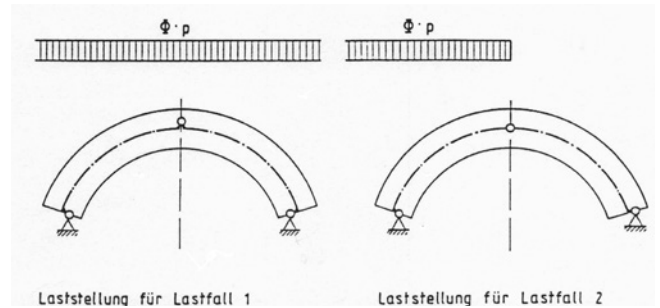


Abb. 5: Laststellung für Gewölbetragwerke

Im Falle des Laufenmühle-Viadukts werden die Verkehrslasten nicht nur halbseitig, sondern ungünstigst entsprechend der Auswertung der Einflusslinien für Kernmomente angesetzt (Abb. 6).

Die Kernpunktmomente ergeben sich folgendermaßen:

$$M_{ku} = N \cdot (W_o / A) + M \Rightarrow \sigma_o = M_{ku} / W_o$$

$$M_{ko} = N \cdot (W_u / A) - M \Rightarrow \sigma_u = M_{ko} / W_u$$

Einflusslinien für den biegesteifen Bogen:

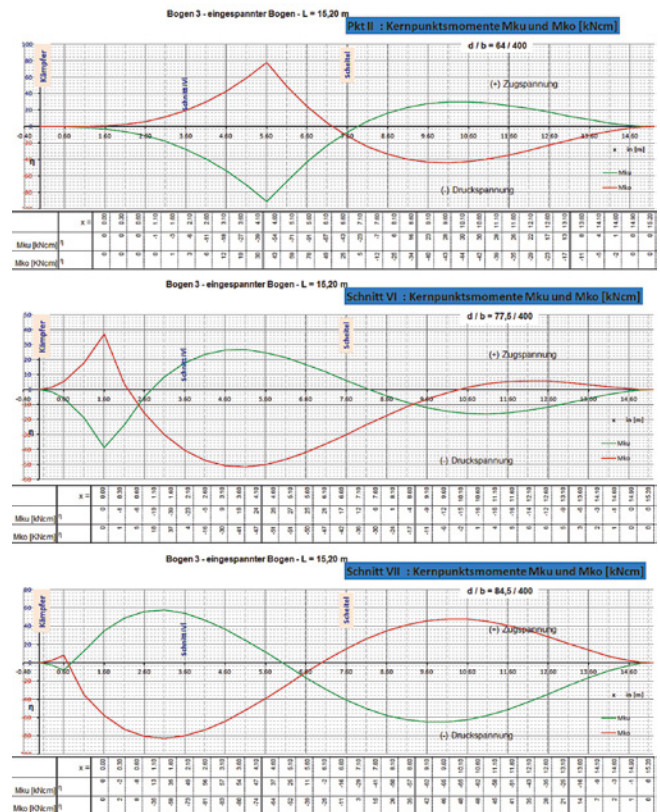


Abb. 6: Einflusslinien der Kernpunktmomente; biegesteifer Bogen

Ungeachtet einer zum Kämpfer hin zunehmenden Überschüttungshöhe werden die Verkehrslasten im gesamten Bogenbereich als Einzellasten angesetzt.

Zur Abschätzung des Einflusses der Zusatzlasten und zur Ermittlung der Tragreserven werden Lastfälle HZ (Haupt- und Zusatzlasten) mit und ohne Temperaturlasten untersucht.

Als Zusatzlasten gelten Seitenstoß (SS), Bremsen/ Anfahren (BrAn), Wind (W) und Temperatur (Temp).

- Lastfall H: $G + P + \text{Fliehkräfte}$
ohne Berücksichtigung der Bewehrung
- Lastfall HZ-1: $LF H + SS + BrAn + W$
ohne Berücksichtigung der Bewehrung
- Lastfall HZ-2: $LF HZ-1 + Temp$
mit Berücksichtigung der Bewehrung

Da die Steifigkeit (EI) der biegesteifen Bögen einen wesentlichen Einfluss auf die Schnittgrößen aus Zwangsbeanspruchungen (Temp) hat, werden die Schnittgrößen zunächst mit einem E-Modul von $30\,000\text{ N/mm}^2$ ermittelt.

Die Abminderung der Zwangsschnittgrößen infolge eines geringeren E-Moduls bzw. eine Abminderung der Steifigkeit durch Reißen des Betons wird in den Nachweisen durch einen zusätzlichen Faktor auf die Schnittgrößen berücksichtigt.

Die Nachweise unter Berücksichtigung der Bewehrung erfolgen mit dem ms-Verfahren für einachsige Biegung entsprechend DIN 1045, zweiachsige Biegung wird durch eine Reduzierung der Querschnittsbreite von 400 auf 380 cm berücksichtigt.

5 Verkehrslasten, Betriebslastenzüge

- Lastbild UIC71 (entspricht Lastbild LM71) (Abb. 7)
- Streckenklassen (Abb. 8)
- Betriebslastenzug Nahverkehr (Abb. 9)
- Betriebslastenzug Museumsbahnen (Abb. 10)

Des Weiteren verkehren gemäß Angaben des Betreibers auf der Strecke die Diesellok V 100 (16 t Achslast; 5,1 t Meterlast, kleinster Achsabstand 2,2) und V 60 (16 t Achslast; 4,6 t Meterlast, kleinster Achsabstand 2,2). Diese Betriebslastenzüge sind durch den Nachweis der Streckenklasse B2 abgedeckt.

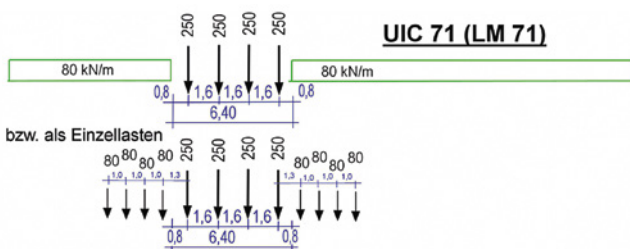


Abb. 7: Lastbild UIC71

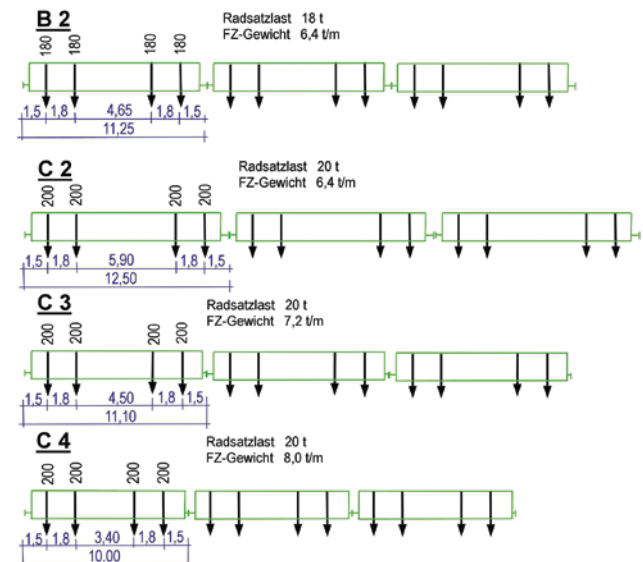
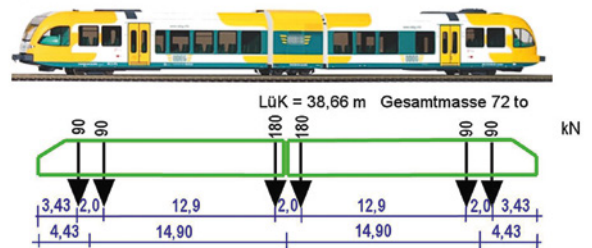
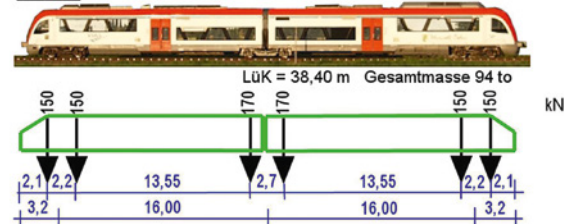


Abb. 8: Lastbild der Streckenklassen

GTW 2/6



ITINO



LINT 41

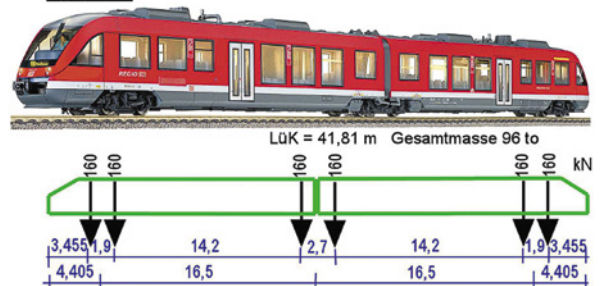
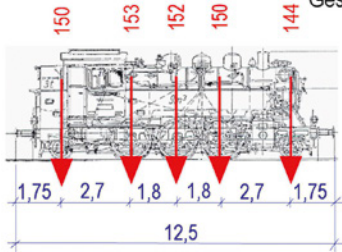
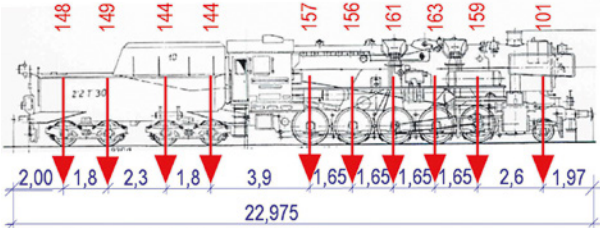


Abb. 9: Betriebsfahrzeuge des Nahverkehrs

BR 64 L_{ÜK} = 12,5 m Dienstmasse 71 t
Gesamtmasse 74,9 t



BR 50 Baureihe 52⁸⁰ L_{ÜK} = 22,975 m Dienstmasse 134,9 t
Gesamtmasse 148,2 t



Dampflok vereinfacht

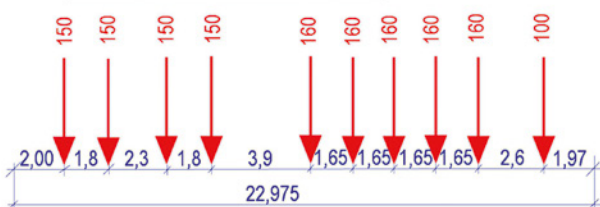


Abb. 10: Dampf betriebene Betriebsfahrzeuge

6 Geometrie/Systeme/Schnittgrößen

Geometrie und statische Systeme wurden nach stichprobenweiser Überprüfung vor Ort den Bestandsunterlagen, Plänen, Zeitungsartikeln und insbesondere der statischen Berechnung aus dem Jahre 1909 entnommen (Abb. 11 und 12).

► 3-Gelenk-Bogen VI

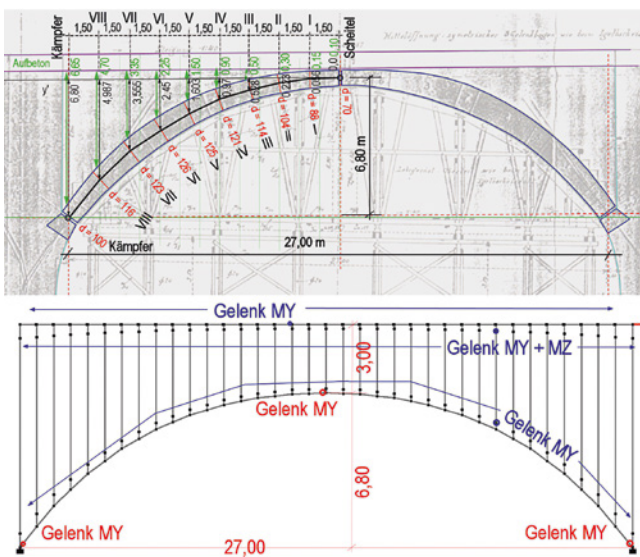


Abb. 11: Statisches System – 3-Gelenk-Bogen

► Biegesteifer Bogen III

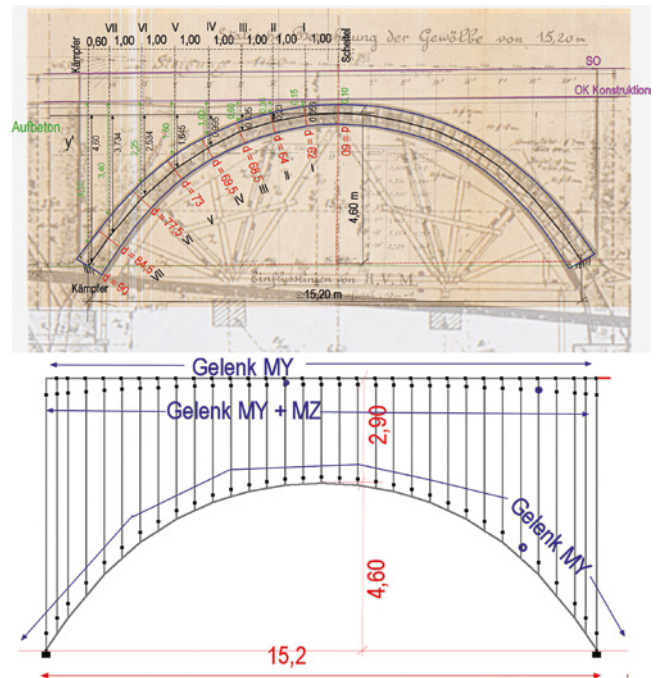


Abb. 12: Statisches System – biegesteifer Bogen

Die Ermittlung der Schnittgrößen (Abb. 13) erfolgte mit dem Finite-Elemente-Programm STAAD, wobei Fahrbahn und Überschüttung mittels Hilfsstäben abgebildet wurden.

► Maximaler Zug an der Unterseite Schnitt III:

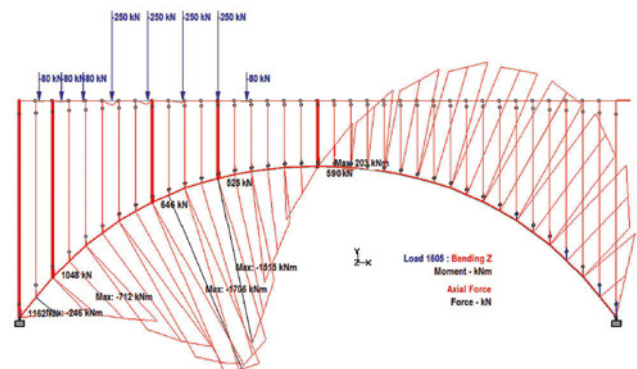


Abb. 13: Laststellung und Momentenlinie am 3-Gelenk-Bogen

7 Parameterstudie

Zunächst wurde eine Parameterstudie (Abb. 14) unter der Berücksichtigung verschiedener Geschwindigkeiten, Querschnittsminderungen bzw. Abplatzung bis zu 10 cm und Lastfaktoren β_{UIC} für das Lastbild UIC71 durchgeführt. Gleichzeitig wurde im Lastfall

Temperatur die Auswirkung einer Steifigkeitsveränderung untersucht.

Ergebnis dieser Studie war, dass bei Instandsetzung und Erreichen einer homogenen Betonfestigkeit, entsprechend in etwa einem Beton B10/B15, die Tragfähigkeit des Bauwerks für $\beta_{UIC} \sim 0,7$, Streckenklasse B2 und Dampflok

der Baureihe 50 nachgewiesen werden kann. Die Zwangsschnittgrößen infolge Temperaturschwankungen von $+15/-20^\circ\text{C}$ sind durch die vorhandene Bewehrung (Handelseisen, $f_{y,k} = 210 \text{ N/mm}^2$) und Umlagerung aufnehmbar.

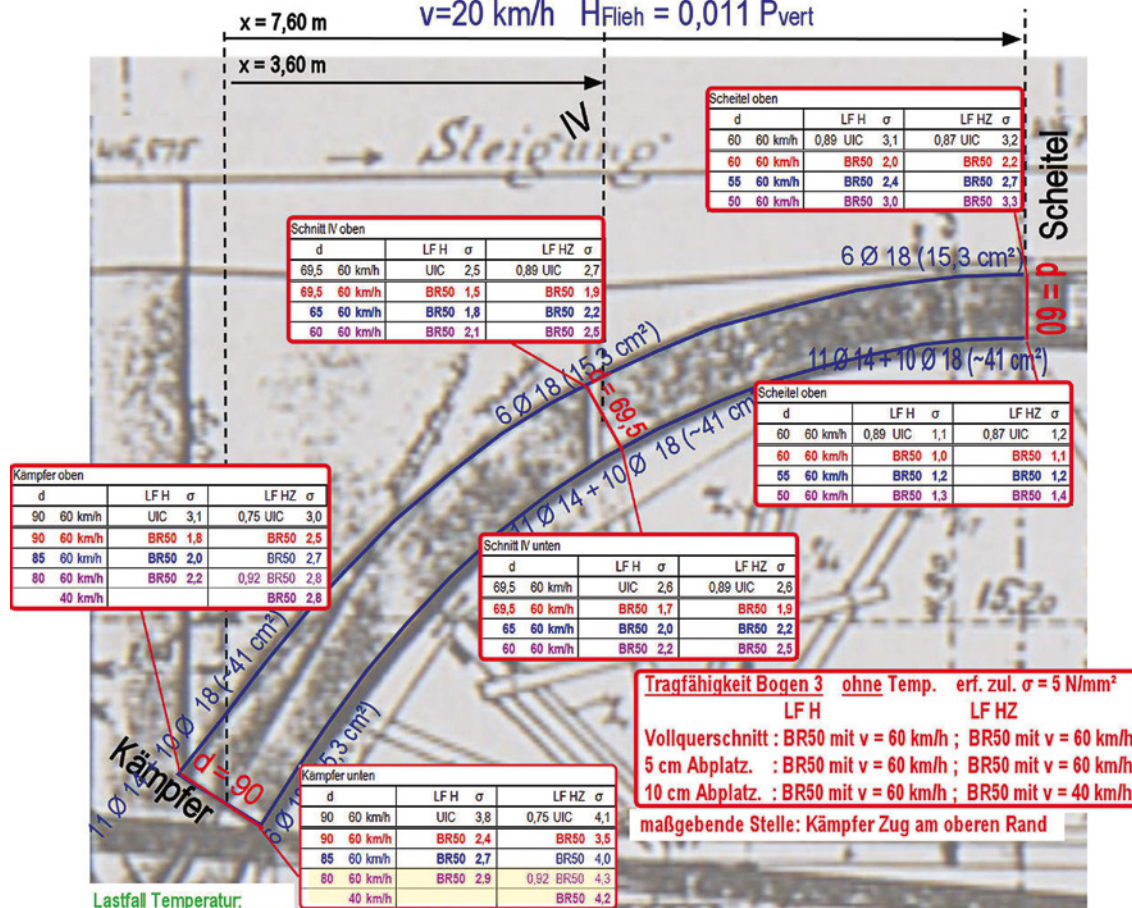
Gleichzeitig wurde festgestellt, dass stellenweise Querschnittsminderungen

Bogen 3 - LSt = 15,2 m

$$R = 300 \text{ m} \Rightarrow v=60 \text{ km/h} \quad H_{\text{Flieh}} = 0,095 P_{\text{vert}}$$

$$v=40 \text{ km/h} \quad H_{\text{Flieh}} = 0,042 P_{\text{vert}}$$

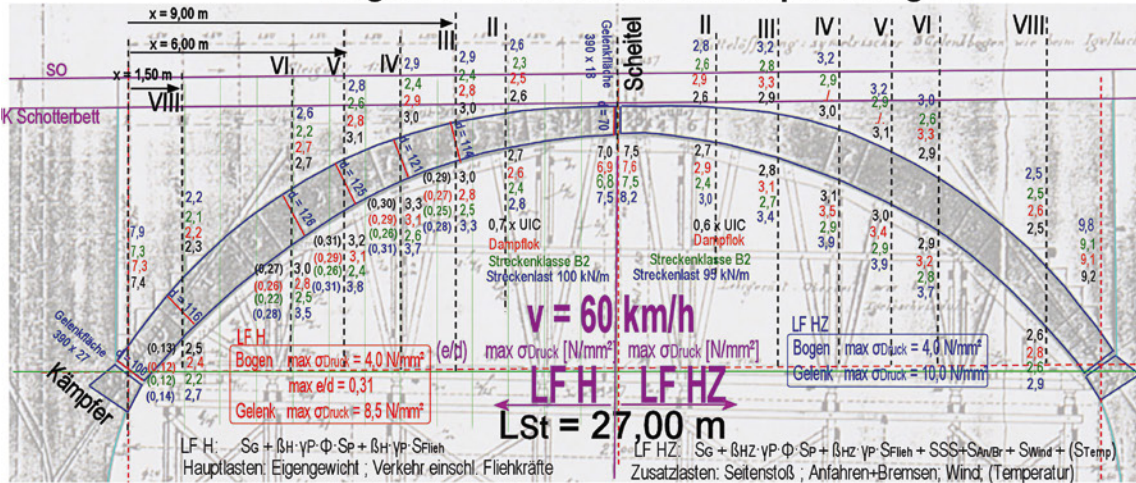
$$v=20 \text{ km/h} \quad H_{\text{Flieh}} = 0,011 P_{\text{vert}}$$



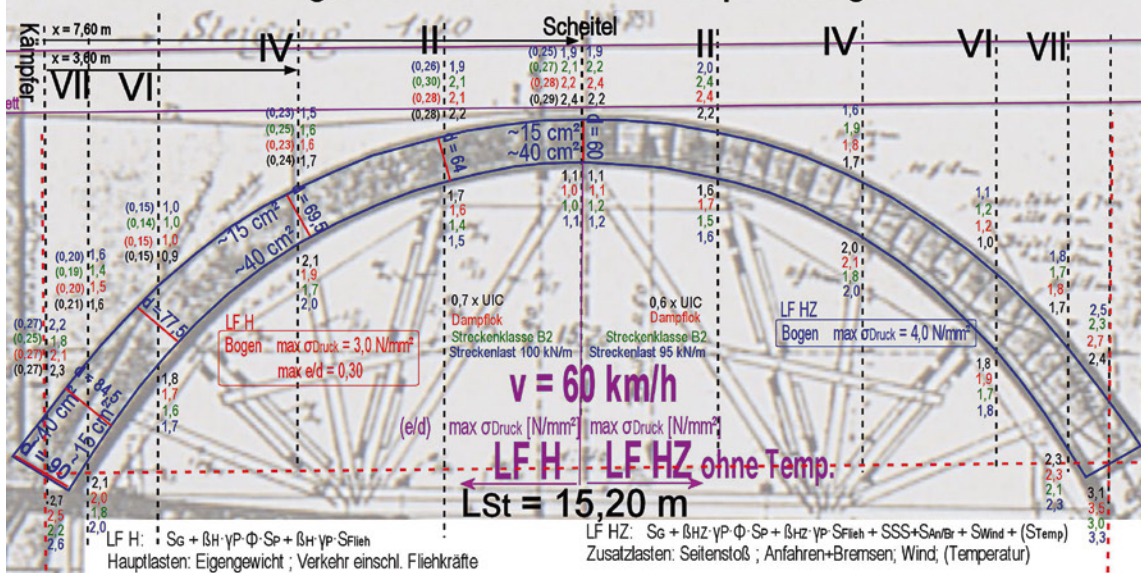
Lastfall Temperatur:
vorh. Bewehrung im Schnitt IV und am Scheitel bei $E = 30\,000 \text{ N/mm}^2$ u. $\beta_R = 5 \text{ N/mm}^2$ ausreichend
Am Kämpfer Bewehrung nicht ausreichend, hier sind jedoch starke SG-Änderungen durch teilweise Gelenkbildung möglich, eine Umlagerung zum Viertelpunkt hin ist möglich, da dort noch Tragreserven vorhanden sind
für $E = 15\,000 \text{ N/mm}^2$ u. $\beta_R = 10 \text{ N/mm}^2$ ist die Bewehrung für die BR50 am Kämpfer ausreichend

Abb. 14: Übersicht der Ergebnisse der Parameterstudie am biegesteifen Bogen

Bogen 6 - Übersicht Druckspannungen



Bogen 3 - Übersicht Druckspannungen



Bogen 3 - Übersicht erf Bewehrung im LF HZ mit Temp

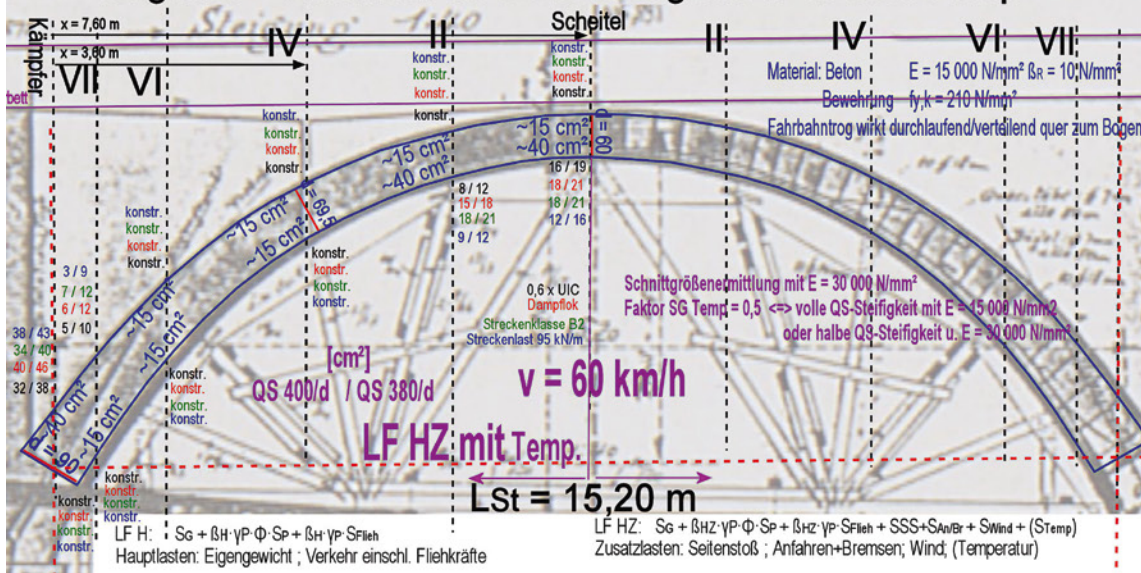


Abb. 15: Übersicht der Ergebnisse des Tragsicherheitsnachweises der festgelegten Betriebslasten

Korrelation der Ergebnisse aus dem Bauradar mit den Druckfestigkeitswerten	Umrechnung der charakteristischen Würfeldruckfestigkeit ($f_{ck, cube}$) nach DIN EN 206 zur Nennfestigkeit (β_{WN}) nach DIN 1045:1988		
	Variante 1 Gesamte Bohrkernlänge ca. 2 - 50 cm	Variante 2 Oberflächennaher Bereich ca. 2 - 15 cm	Variante 3 Kernbeton ca. 15 - 50 cm
Bereich 1: geringe Reflexionsstärke Farbkodierung: Blau	B 25 / $\beta_{WN}=25$ N/mm ² (DIN EN 206: C20/25)	B 15* / $\beta_{WN}=15$ N/mm ² # $\beta_{WN}=20$ N/mm (DIN EN 206: C16/20)	B 25 / $\beta_{WN}=25$ N/mm ² (DIN EN 206: C20/25)
Bereich 2: erhöhte Reflexionsstärke Farbkodierung: Grün	B 10 / $\beta_{WN}=10$ N/mm ² (DIN EN 206: C8/10)	B 5 / $\beta_{WN}=5$ N/mm ² # $\beta_{WN}=5$ N/mm < C8/10 ($f_{ck, is} \approx 4,2$ kN/mm ²)	B 15 / $\beta_{WN}=15$ N/mm ² # $\beta_{WN}=20$ N/mm (DIN EN 206: C16/20)
Bereich 3: stark erhöhte Reflexionsstärke Farbkodierung: Gelb	B 10 / $\beta_{WN}=10$ N/mm ² (DIN EN 206: C8/10)	B 10 / $\beta_{WN}=10$ N/mm ² (DIN EN 206: C8/10)	B 10 / $\beta_{WN}=10$ N/mm ² # $\beta_{WN}=10$ N/mm < C8/10 ($f_{ck, is} \approx 8,4$ N/mm ²)

maßgebend für die Bogenunterseite

maßgebend für die Bogenoberseite

Abb. 16: Ergebnisse der Materialuntersuchung der IONYS AG

kod. Bereich	△ Bogenunterseite		△ Bogenoberseite	
	Var 1 2 - 50 cm	Var 2 2 - 15 cm	Var 3 15 - 50 cm	
Blau	$\beta_{WN} = 25.0$ N/mm ² $\beta_R = 17.5$ N/mm ² zul $\sigma = 8.75$ N/mm ²	$\beta_{WN} = 20.0$ N/mm ² $\beta_R = 14.0$ N/mm ² zul $\sigma = 7.0$ N/mm ²	$\beta_{WN} = 25.0$ N/mm ² $\beta_R = 17.5$ N/mm ² zul $\sigma = 8.75$ N/mm ²	
Grün	$\beta_{WN} = 10.0$ N/mm ² $\beta_R = 7.0$ N/mm ² zul $\sigma = 3.5$ N/mm ²	$\beta_{WN} = 5.0$ N/mm ² $\beta_R = 3.5$ N/mm ² zul $\sigma = 1.75$ N/mm ²	$\beta_{WN} = 20.0$ N/mm ² $\beta_R = 14.0$ N/mm ² zul $\sigma = 7.0$ N/mm ²	
Gelb	$\beta_{WN} = 10.0$ N/mm ² $\beta_R = 7.0$ N/mm ² zul $\sigma = 3.5$ N/mm ²	$\beta_{WN} = 10.0$ N/mm ² $\beta_R = 7.0$ N/mm ² zul $\sigma = 3.5$ N/mm ²	$\beta_{WN} = 10.0$ N/mm ² $\beta_R = 7.0$ N/mm ² zul $\sigma = 3.5$ N/mm ²	

Abb. 17: Zulässige Spannungen

rungen bis 10 cm, zum Teil unter Herabsetzen der gefahrenen Geschwindigkeit, die Tragfähigkeit nicht herabsetzen, demzufolge eine Instandsetzung unter laufendem Verkehr mit Einschränkungen möglich wäre.

Durch die Ergebnisse der Parameterstudie konnte dem Betrieb der Schwäbischen Waldbahn auch über das Jahr 2015 hinaus stattgegeben werden, unterer der Voraussetzung, dass regelmäßige Bauwerksprüfungen im Abstand von drei Monaten (Beobachtung der Schäden hinsichtlich Veränderung, Monitoring) stattfinden, vorbehaltlich der Ergebnisse der Material- und Radaruntersuchung bzgl. Betonfestigkeiten. Gleichzeitig wurden aufgrund der Studie in Zusammenarbeit mit der IONYS AG Referenzstellen für Probenentnahmen festgelegt.

8 Nachrechnung/Belastbarkeit

In Abstimmung mit dem Betreiber wurden anschließend dem Bahnbetrieb genügende Verkehrsbelastungen festgelegt, für die der Tragfähigkeitsnachweis zu erbringen war.

- 0,7/0,6 (LF H/HZ) x Lastbild UIC71
- Streckenklasse B2: 18 t Achslast; kleinster Achsabstand 1,8 m, Meterlast 6,4 t/m
- Betriebslastenzug: 16 t Achslast; kleinster Achsabstand 1,65 m (abdeckendes Lastbild für Nahverkehr, Dampf- und Diesellok)
- Streckenlast 10 t/m LF H; 9,5 t/m LF HZ

bei einer max. gefahrenen Geschwindigkeit von $v \leq 60$ km/h. Diese Lasten decken auch die Mindestbelastbarkeit

INJEKTION MIT MINERALISCHEN FÜLLSTOFFEN

DESOI®



Hersteller von Injektionstechnik

DESOI GmbH | Gewerbestraße 16 | D-36148 Kalbach/Rhön | Tel.: +49 6655 9636-0 | Fax: +49 6655 9636-6666 | info@desoi.de | www.desoi.de

(18 t Radsatzlast, 5,6 t/m Fahrzeuggewicht je Längeneinheit) nach EBO § 8 (1) ab.

Für diese Betriebslasten wurden erneut die Nachweise geführt und die Beanspruchungen sowie maximalen Druckspannungen in den Bögen ermittelt (Abb. 15).

Die Beanspruchungen wurden den Ergebnissen aus den Material- und Bauradaruntersuchungen der IONYS AG und des Ingenieurbüros IGP gegenübergestellt.

Aufgrund der Materialuntersuchungen und Angaben zur Betonnnennfestigkeit β_{WN} (Abb. 16) konnten zulässige

Spannungen festgelegt werden mit

zul $\sigma = 0,5 \cdot \beta_R$ mit $\beta_R = 0,7 \cdot \beta_{WN}$ (Abb. 17)

Die Gegenüberstellung (Abb. 18) zeigte, dass die ermittelten Pressungen i. d. R. die minimal zulässige Spannung von 3,5 N/mm² (gelb codierte Bereiche) nicht überstiegen. In einigen Teilbereichen des Bogens VI war die ermittelte Pressung geringfügig größer. Diese erhöhten Pressungen traten jedoch nur in überwiegend im Bauradar blau codierten Bereichen, d.h. in Bereichen mit höheren zulässigen

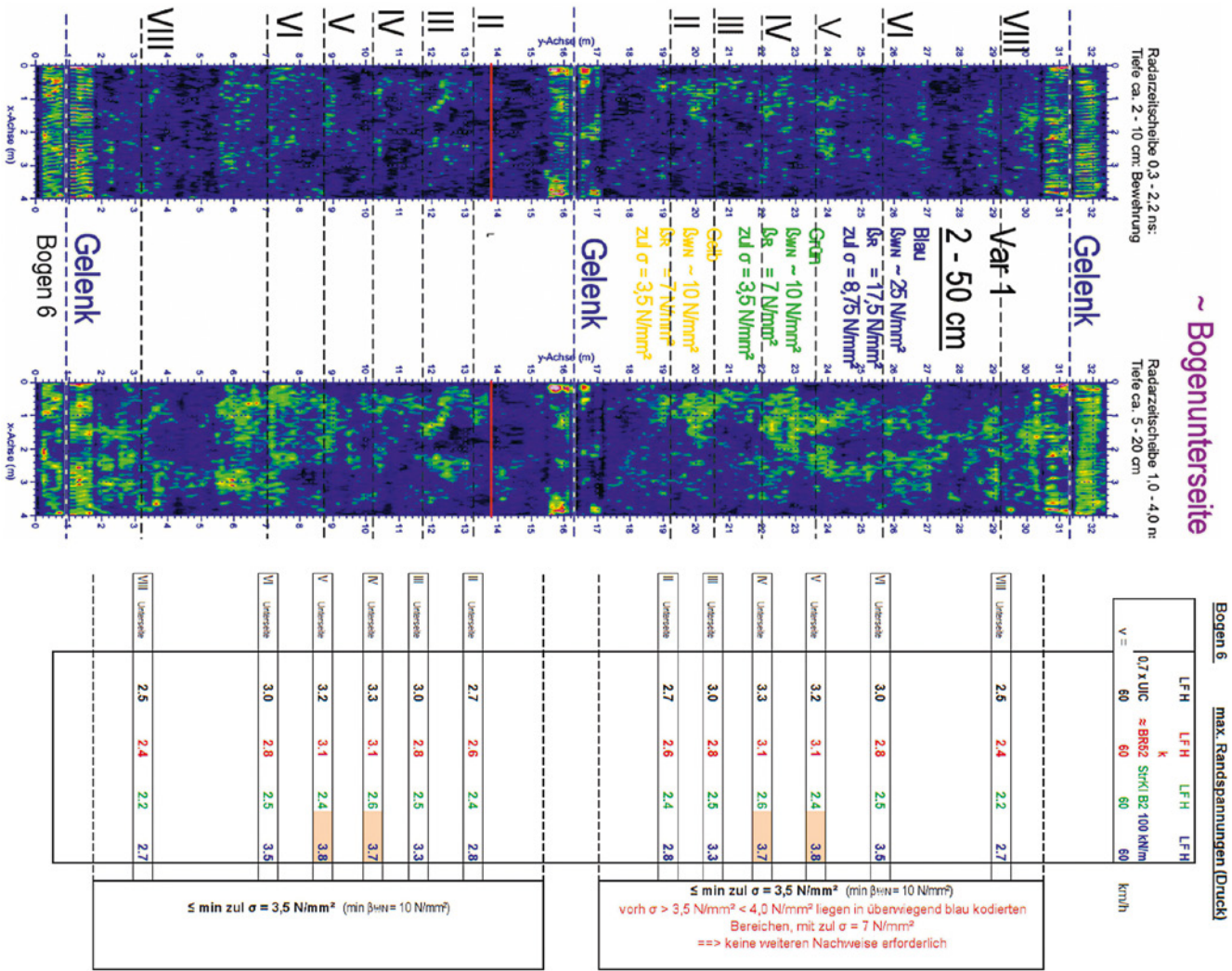


Abb. 18: Gegenüberstellung der Ergebnisse Bauradar und statische Berechnung

Spannungen, auf, sodass keine Bedenken hinsichtlich der Tragfähigkeit bestehen.

Aufgrund der Nachrechnung konnte dem Betreiber folgende Empfehlung für die zukünftige Befahrbarkeit und Belastbarkeit gegeben werden:

- ▶ 0,5 x Lastbild UIC71 $v_{\max} = 60 \text{ km/h}$
- ▶ Streckenklasse B2 $v_{\max} = 40 \text{ km/h}$
18 t Achslast; kleinster Achsabstand 1,8 m, Meterlast 6,4 t/m
- ▶ BLZ Dampfklo ($\approx \text{BR52}$): $v_{\max} = 30 \text{ km/h}$
16 t Achslast; kleinster Achsabstand 1,65 m
- ▶ Streckenlast 8 t/m $v_{\max} = 40 \text{ km/h}$

Die empfohlene zukünftige Belastbarkeit wurde unter der Berücksichtigung des Bauwerksalters, der bereits vorhandenen Schäden und Unsicherheiten in den geometrischen Annahmen gegenüber der rechnerisch ermittelten Tragfähigkeit reduziert und ist für die Belange des Betreibers ausreichend.

Voraussetzung für ein auch zukünftig verkehrssicheres Betreiben der Strecke sind regelmäßige Brückenprüfungen durch einen Sachverständigen, insbesondere im Hinblick auf Querrisse, Abplatzungen an der Bogenunterseite und auf Überbelastung hindeutende Schäden.

9 Zusammenfassung

Durch enge Zusammenarbeit von Bauingenieuren, Bauwerksprüfern, Geophysikern, Bauchemikern und Baustoffingenieuren konnte die Tragfähigkeit des denkmalgeschützten Laufenmühle-Viadukts für die vom Betreiber für den Weiterbetrieb erforderlichen Belastungen nachgewiesen werden.

Es konnte ein wirtschaftliches denkmalgerechtes Instandsetzungskonzept entwickelt werden, das eine Fortführung des Betriebs bis zu den und während der Instandsetzungsmaßnahmen erlaubt.

Literatur

- [1] Jori; Schaechterle: Neuere Bauausführungen in Eisenbeton – I. Bogenbrücken. Berlin: Verlag v. Wilhelm Ernst & Sohn, 1911
- [2] Schöler, R.: Einführung in den Brückenbau. Leipzig: Verlag von Bernh. Friedr. Voigt, 1911
- [3] Taschenbuch für Bauingenieure. 3. Aufl. Berlin: Verlag Julius Springer, 1919
- [4] Sonderdruck Beton und Eisen, 2011
- [5] Schneider, K.-J. (Hrsg.): Bautabellen mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 7. Aufl. Düsseldorf: Werner Verlag
- [6] Richtlinien der DB Netz AG (RL)
- [7] Geißler, K.: Handbuch Brückenbau. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 2014
- [8] Fingerloos, F.: Historische technische Regelwerke für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 2009
- [9] Bargmann, H.: Historische Bautabellen. Berlin, Werner Verlag

INFO/KONTAKT



Dipl.-Ing. (FH) Hermann Rothenhöfer

1972 Staatsexamen Bauingenieurwesen, Vertiefungsrichtung Konstruktiver Ingenieurbau, FH Karlsruhe; 1978 Schweißfachingenieur; 1982/84 Prüflingenieur für Baustatik bei der Deutschen Bundesbahn; 1986 Sachverständiger für Eisenbahnbrücken und Durchlässe; seit 2001 Inhaber des Ingenieurbüros H. Rothenhöfer Dipl.-Ing. (FH) in Karlsruhe; 2010 Zertifikat zur Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (VFIB).



Dipl.-Ing. Bettina Marquardt

Hochschulstudium Bauingenieurwesen, Fachrichtung Konstruktiver Ingenieurbau an der Universität Karlsruhe (TH); Mitarbeiterin der Ingenieurgruppe Bauen; bis 2014 selbständig tätig als freie Mitarbeiterin für verschiedene Ingenieurbüros, insbesondere seit 2002 für das Ingenieurbüro Rothenhöfer, Karlsruhe; 2011 Ausbildung zum Schweißfachingenieur; Erlangung Zertifikat zur Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (Nr. F 1206); seit 2014 Mitinhaberin des Ingenieurbüros für Tragwerksplanung und Ingenieurbauwerke J. und B. Marquardt GbR, Karlsruhe.

Ingenieurbüro H. Rothenhöfer Dipl.-Ing. (FH)
Kriegsstraße 5
76137 Karlsruhe
Tel.: 0721 4647356
Internet: www.ing-rothenhoefer.de

BAUSUBSTANZ AUCH DIGITAL



Die **BAUSUBSTANZ**-App kann im App-Store oder in Google Play kostenfrei heruntergeladen werden. Nach dem einmaligen Anmelden mit der Kundennummer erscheinen im Kiosk alle verfügbaren Ausgaben.

BAUSUBSTANZ ist die Fachzeitschrift für alle, die sich professionell mit der Instandhaltung, Sanierung, Restaurierung und Pflege alter Bauwerke beschäftigen. Mit einer Mischung aus Reportagen über gelungene Sanierungsobjekte, der Vorstellung von Techniken, Baustoffen und Verfahren sowie wissenschaftlichen Beiträgen bietet die Bausubstanz viermal im Jahr Neues, Bewährtes und Wichtiges aus dem weiten Feld der Bausanierung.

Mit dem **BAUSUBSTANZ** Premium-Abonnement erhalten Sie zusätzlich Zugriff auf weitere exklusive Online-Angebote. Neben einem vollständigen Online-Archiv mit Schlagwortrecherche gibt es für **BAUSUBSTANZ** Premium-Abonnenten die Zeitschrift gleichzeitig als E-Journal für Tablet-PCs oder für das Smartphone. Abonnenten erhalten so die neueste Ausgabe früher, mit allen Inhalten des gedruckten Heftes, ergänzt um Zusatzinformationen, ergänzende Bildstrecken und weitere multimediale Elemente. Lesen Sie die **BAUSUBSTANZ** überall, wo und wie Sie wollen.

ca. 80 Seiten je Heft
ISSN 2190-4278
erscheint viermal im Jahr

Jahresabonnement
BAUSUBSTANZ Premium
€ 80,40 | Ausland € 86,40

www.bausubstanz.de

Jetzt abonnieren und Prämie sichern!

Abonnieren Sie die Zeitschrift **BAUSUBSTANZ** im Jahresabonnement und sichern Sie sich eine Prämie Ihrer Wahl:



Prämie Nr. 1: »Messograf«



Prämie Nr. 2: »Glasdickenmesser«

Fraunhofer IRB Verlag
Der Fachverlag zum Planen und Bauen

Bestellung:
Tel. 0711 970-2500 | Fax -2508 | E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de



Abb. 1: Computeranimation des sanierten Laufenmühle-Viadukts

Guido Buschbacher, Alexander Amann

Objektplanung zur Umsetzung des Instandsetzungskonzepts am Laufenmühle-Viadukt

Die BWN-Bauingenieure wurden 2015 mit der Objektplanung für die Instandsetzung des Laufenmühle-Viadukts beauftragt.

Bereits 2013/14 wurde mit den BWN-Bauingenieuren als Objektplaner das Vorgänger-Bauwerk Strümpfelbach-Viadukt mit den gemäß ZTV-ING gängigen Methoden erfolgreich instand gesetzt. Das Strümpfelbach-Viadukt ähnelt in Konstruktion und Bauart sehr stark dem jetzt zu sanierenden Laufenmühle-Viadukt.

Die Voruntersuchungen am Laufenmühle-Viadukt ergaben jedoch wesentlich schlechtere Betondruckfestigkeiten als am bauähnlichen Strümpfelbach-Viadukt, weshalb hier eine gleichartige Sanierung nicht ausreichte.

In der Folge wurden insgesamt sieben Ausführungsvarianten (Verstärkung mit neuen Stahlbetonbögen, Verstärkung mit Stahlbau, Erneuerung des Überbaus, vollflächiges Verpressen, ...) untersucht.

Die dann angedachte Verstärkung des Tragwerks mittels neuer Stahlbetonbögen unterhalb der bestehen-

den Bögen hätte zu einer wesentlichen Kostensteigerung geführt.

Um den Gesamtüberblick für die SWB zu konkretisieren, wurde 2015 dann auch das Igelsbach-Viadukt, das kleinste der insgesamt drei Viadukte (nur ein Bogen), untersucht, um auch dessen Zustand festzustellen und die zu erwartenden Kosten gesamthaft abschätzen zu können.

In diesem Zusammenhang entstand dann auch die Zusammenarbeit mit dem KIT, der Ionys AG und dem Ingenieurbüro Patitz, mit welchen, in Abstimmung mit dem für die Tragwerksplanung verantwortlichen Ingenieurbüro Rothenhöfer, die Instandsetzungsplanung weiterentwickelt wurde.

Das Ergebnis ist der nun entwickelte und in Ausführung befindliche Instandsetzungsplan:

- Verpressen lediglich an den per Radarscan aufgefundenen und kartierten Bereichen mit Hohlstellen und Kiestern,

Projekt: Laufenmühle Viadukt, Schwäbische Waldbahn

Bauteil: Bogen 8, Abtrag mittlerer Bereich

Ermittlung Abtragsmengen

Tabellentyp	Volumen
Einheiten	Meter
Methode	Daten zu Daten
Richtung	Oberhalb Ebene
Ref Daten	Netz aus IMAAlign Bestand Vor Beginn
Ist Daten	IMAAlign Abtrag Mitte Bogen 08
Aufteilungsschrittweite	0,002000
Positives Volumen	1,165305

Tabellentyp Vergleich (Referenzfläche)

Name	reference surfaces 1
Einheiten	Meter
CSYS	Welt
Ausrichtungen	Best-Fit 1
Daten	IMAAlign Abtrag Mitte Bogen 08
Referenz	Netz aus IMAAlign Bestand Vor Beginn
Max Abstand	0,200000
Max Winkel	45,000000
Richtung	Kürzeste(r) (Ignorieren)
# Punkte	23304482
Abw Mittel	-0,038849

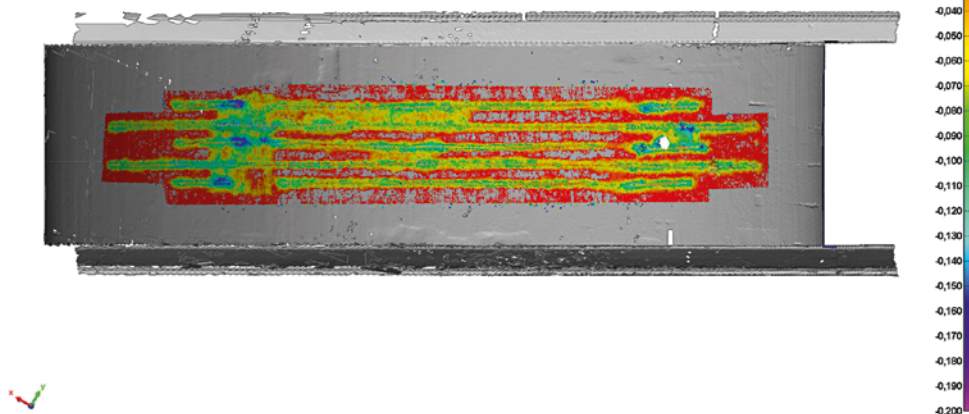


Abb. 2: Grafische Darstellung des ermittelten Abtrags im Mittelbereich von Bogen 8

- herkömmliche Instandsetzung der Schadhstellen im Bereich der Bewehrung.

Das Instandsetzungskonzept wurde aufgrund aller Informationen und Erkenntnisse sowie der Einbindung aller beteiligten Stellen individuell für das Laufenmühle-Viadukt erstellt. Je nach Erfordernis wurden für die verschiedenen Bauteile folgende Oberflächenschutzsysteme festgelegt:

- Kappen: OS-F-Beschichtung (farbig),
- Gesimse: OS-C-Beschichtung (farbig),
- Füllbeton und Pfeiler: OS-B-Beschichtung (transparent),
- Bogenuntersichten: OS-C-Beschichtung (farbig) auf 20 mm Spritzmörtelschale,
- Bogenseitenflächen: OS-C-Beschichtung (farbig),
- erdberührende Flächen: OS-DI-Beschichtung (Grauton).

Seit April 2017 werden die Arbeiten nun von der Firma Bauschutz, Niederlassung Asperg, vor Ort umgesetzt.

Da die Viadukte unter Denkmalschutz stehen, muss die gesamte Maßnahme auch eng mit dem zuständigen Referat des Landesamts für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart abgestimmt und besprochen werden.

In Zusammenarbeit mit der Baufirma wurde gleich zu Beginn mit der Württembergischen Eisenbahn GmbH in Waiblingen die geplante Ausführung im Detail besprochen und eine entsprechende Betriebs- und Bauanweisung erstellt, um die sichere Durchführung des Bahnbetriebs und der Bauarbeiten zu gewährleisten.

Bereits im Zuge der Planung wurden von der Viscan Solutions GmbH mithilfe eines 3-D-Scanners eine Bestandsaufnahme durchgeführt und mit Drohnenflügen Übersichtsbilder des Viadukts erstellt. Mit diesen Bestandsdaten wurden bisher nicht vorhandene Bestandspläne als Grundlage für die Sanierungsplanung erstellt, welche zusammen mit den Bildern zur Dokumentation für die Denkmalpflege erforderlich waren. Mit den Daten und Bildern der Bauwerksaufnahme konnte durch die Viscan Solutions GmbH auch die in Abb. 1 gezeigte Animation der Ansicht des instand gesetzten Viadukts erstellt werden.

Im Zuge der Planung und Ausschreibung wurde festgelegt, dass die Sanierung von Bogen 8 rückwärts nach Bogen 1 erfolgt. Aufgrund der erforderlichen Sicherstellung der Be-

fahrbarkeit in allen Bauphasen und dem damit verbundenen abschnittsweisen Vorgehen musste die Bauzeit auf zwei Jahre festgelegt werden. Der Terminplan sieht vor, die Bögen 8 bis 5 im Jahr 2017, die Bögen 4 bis 1 im Jahr 2018 instand zu setzen.

Dazu werden nach dem Aufstellen des Arbeits- und Schutzgerüsts die per Radar festgestellten Hohlstellen in den Bogenträgern bereichsweise verpresst, die schadhaften, lockeren Stellen abgetragen, die korrodierten Eiseneinlagen freigelegt und fachgerecht instand gesetzt. Der Abtrag des schadhaften Betons sowie das Freilegen der Bewehrungsseisen erfolgt durch Höchstdruckwasserstrahlen (HDW) mit einem Druck von ca. 2500 bar. Die Reprofilierung erfolgt mit Spritzmörtel.

Die nicht vorhersehbaren Abmessungen der HDW-Abträge unter den Viaduktbögen und die schwierigen örtlichen Verhältnisse haben alle Beteiligten überzeugt, dass auch beim Aufmaß für die Abrechnung der Leistungen ein weiteres innovatives Ver-

fahren zur Anwendung kommt. In enger Abstimmung mit der Baufirma hat die Viscan Solutions GmbH nach den HDW-Abträgen die Bogenuntersichten erneut gescannt und das Volumen des Abtrags mit einem 3-D-Modell als Differenz im Vergleich zur ursprünglichen Aufnahme ermittelt. Auch das Aufmaß der freigelegten Stahllängen wird mit dem 3-D-Scanning durchgeführt.

Mit dieser Methode ist auch die Massenermittlung bei einer abschnittsweisen Instandsetzung (in Abb. 2 ist der Mittelteil von Bogen 8 zu sehen) kein Problem. Die Scanflächen können fast beliebig aufgeteilt werden.

Die bisher gut verlaufende Baumaßnahme befindet sich, Stand Juni 2017, mitten in den Arbeiten an den Bögen 7 und 8. Die Verpressarbeiten wie auch der Abtrag und die Reprofilierung der Bogenuntersichten sind fast abgeschlossen. Die Vorbereitungen für die Beschichtungen an den weiteren Bauteilen sind in vollem Gange.

Die BWN-Bauingenieure wünschen allen Beteiligten eine weiterhin

unfallfreie Baustelle und einen weiterhin guten Baufortschritt, sodass die Baumaßnahme wie geplant im Juli 2018 abgeschlossen und das Viadukt in neuem alten Glanz der Schwäbischen Waldbahn übergeben werden kann.

INFO/KONTAKT



Dipl.-Ing. (FH)
Guido Buschbacher

1994 bis 1999 Studium Bauingenieurwesen an der Fachhochschule Konstanz; 1999 bis 2001 angestellter Ingenieur bei der Domostatik AG in Zürich; 2001 bis 2011 angestellter Ingenieur im Ingenieurbüro Bitzer-Weber-Nolle in Albstadt-Lautlingen; 2009 Zertifizierung als Sachkundiger Planer für Schutz- und Instandsetzung von Betonbauteilen; 2011 Zertifizierung für die Bauwerksprüfung nach DIN 1076; seit 2012 Gesellschafter bei BWN-Bauingenieure.



Dipl.-Ing. (FH)
Alexander Amann

1995 bis 1999 Studium Bauingenieurwesen an der Fachhochschule Konstanz, Vertiefungsrichtung: Konstruktiver Ingenieurbau; 1999 bis 2013 Bau- und Projektleitung im schlüsselfertigen Hochbau; seit 2014 angestellter Ingenieur (Projektleiter) im Ingenieurbüro BWN in Albstadt-Lautlingen; 2015 Zertifizierung für die Bauwerksprüfung nach DIN 1076; 2016 Lehrgang zum »Sachkundigen Planer für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen«.

BWN-Bauingenieure GbR
Am Schloß 10
72459 Albstadt-Lautlingen
Tel.: 07431 9577-0
Fax: 07431 9577-39
E-Mail: sekretariat@bwn-bauingenieure.de
Internet: www.bwn-bauingenieure.de



Bauingenieure

Prof. Dr.-Ing. Hans-A. Bitzer
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Nolle
Dipl.-Ing. (FH) Guido Buschbacher

Objektplanung Ingenieurbauwerke Betoninstandsetzung

Lautlingen Am Schloss 10
72459 Albstadt

Telefon 0 74 31/ 95 77 – 0
Telefax 0 74 31/ 95 77 – 39
E-mail sekretariat@bwn-bauingenieure.de
web www.bwn-bauingenieure.de

Bestandsdokumentation und Massenermittlung

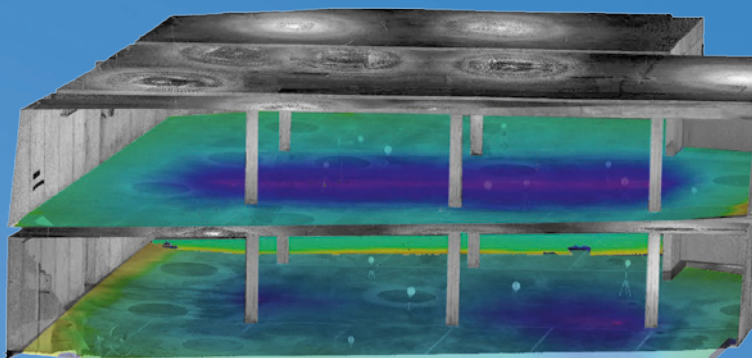
Qualitätssicherung für Sanierungsmaßnahmen



Unserer Leistungen für Ihr Sanierungsprojekt

- Exakte 3D-Aufmaße aller Bauteile
- Messpunktauflösung bis 1x1mm
- Einfache Datenbereitstellung
- Prüfen von Schichtstärken
- Ermitteln von Auf- & Abtragsmengen
- Gefälle- & Fließwasseranalysen
- Klassifizieren von Extrempunkten

Viscan Solutions ist Ihr zuverlässiger Partner bei der ergänzenden und unabhängigen Überwachung für Sanierungsprojekte in Deutschland. Schnelle und exakte Aufmaße helfen nicht nur im Vorfeld einer Sanierungsplanung, die erhobenen Daten dienen auch als Basis für eine flächige Qualitätssicherung und bietet allen Beteiligten Massensicherheit bei der Abnahme und Abrechnung.



Fließwasseranalyse (vorher/nachher)

Tiefgaragen | Parkhäuser | Hochbehälter | Klärbecken | Brückenbauwerke | Rippendecken | Faultürme



www.viscan.de



Der Förderverein Welzheimer Bahn

Reaktivierung und Erhalt der denkmalgeschützten Bahnstrecke Rudersberg – Welzheim als Tourismusbahn

1908 fuhr der erste Zug von Schorndorf nach Rudersberg. Nach aufwendigen Bauarbeiten mit für die damalige Zeit bewundernswerten ingenieurtechnischen Leistungen wurde am 25. November 1911 Welzheim als letzte württembergische Oberamtsstadt an das Eisenbahnnetz angeschlossen. Schon damals erhoffte man sich dadurch eine Belebung der Wirtschaft und des Fremdenverkehrs. So wurde im »Bote vom Welzheimer Wald« zur feierlichen Einweihung der Eisenbahn gedichtet:

*Die bekränzte Dampfmaschine
bringe künftig recht viel Glück!
Industrie und alle Zweige
Mannigfach entwickeln sich.*

*Unsere »Waldluft« sei gepriesen,
Jedem Städter sei's bekannt,
Daß er jetzt hier haben kann,
Ruhe – Luft – und Eisenbahn !*

Am Rande der Region Stuttgart führt von Rudersberg nach Welzheim in den Naturpark Schwäbisch-Fränkischer Wald eine der schönsten Nebenbahnstrecken Baden-Württembergs. Über drei einmalige Viadukte mit herrlicher Aussicht ins Wieslaufstal, durch verträumte Abschnitte mitten in der Nähe des Naherholungsparadieses Ebnisee erreicht die Wieslaufalbahn ihren Endpunkt Welzheim im Zentrum des Welzheimer Waldes. Seit 1992 steht die gesamte Strecke mit

allen Bauwerken unter Denkmalschutz als Kulturdenkmal, da sie die am aufwendigsten gebaute Nebenbahnstrecke mit Bergbahncharakter ist, die derart komplett erhalten ist.

Seit der vorläufigen Einstellung des Verkehrs durch die Deutsche Bundesbahn 1988 nach einem Hangrutsch gab es jahrelang immer wieder Diskussionen um die Zukunft dieser Bahnstrecke. Seit 1995 fährt im unteren Streckenabschnitt zwischen Schorndorf und Rudersberg-Nord die

privatisierte Wieslaufalbahn, die bundesweit als Vorzeigeprojekt für modernisierten Schienennahverkehr gilt. Für den Streckenabschnitt nach Welzheim wurden einem Tourismusverkehr gute Chancen eingeräumt.

Der Förderverein Welzheimer Bahn e.V. (FWB)

Am 17. März 2000 wurde in Welzheim der Förderverein Welzheimer Bahn e.V. (FWB) gegründet. Seit 1993 haben sich Welzheimer Bürgerinnen und Bürger zusammen mit bereits bestehenden Vereinen und Gruppierungen (DBK Historische Bahn e.V., Bürgerinitiative Wieslaufalbahn bis Welzheim, Verein zur Erhaltung der Wieslaufalbahn e.V.) und mit dem damaligen Bürgermeister Welzheims Hermann Holzner um den Erhalt der denkmalgeschützten Strecke bemüht. Das Ergebnis dieser jahrelangen erfolgreichen Zusammenarbeit war die Vereinsgründung 2000.

Betriebskonzept der Tourismusbahn

Bereits 1995 und dann 1998 in ausgearbeiteter Form wurde ein Konzept für eine Reaktivierung der denkmalgeschützten Bahnstrecke Rudersberg–Welzheim als Tourismusbahn dem Gemeinderat in Welzheim vorgelegt: Das inzwischen umgesetzte Betriebskonzept sieht Touristikbetrieb auf der Strecke zwischen Schorndorf und Welzheim unter Mitbenutzung der WEG-Strecke Schorndorf–Rudersberg an allen Sonn- und Feiertagen von Ostern bis Oktober und an den Sonntagen vor Weihnachten vor. Mindestens einmal im Monat soll ein Dampfzug und an allen anderen Sonntagen ein historischer Diesellokomotiv eingesetzt werden. Vorgesehen sind drei Zugpaare pro Fahrtag. Die Höchstgeschwindigkeit soll im Abschnitt Rudersberg–Welzheim 30 km/h betragen.

Inbetriebnahme der »Schwäbischen Waldbahn« am 8. Mai 2010

Von der ersten Idee in den 1990er-Jahren bis zur Wiedereröffnungsfahrt am 8. Mai 2010 war ein hindernisreicher Weg für alle Beteiligten zurückzulegen. Nach Klärung der Finanzierung mussten viele rechtliche und planerische Hürden genommen werden. Die Ausführung der Baumaßnahmen von 2007 bis 2010 stellten die Baufirmen und Kos-

tensträger auch vor manche unvorhergesehene Aufgabe. All dies wurde gemeinsam gemeistert.

Dem Förderverein Welzheimer Bahn e.V. kam dabei der wichtige Part zu, mit inzwischen über 200 Mitgliedern und 20 aktiven Mitarbeitern die ehrenamtliche Seite des bürgerschaftlichen Engagements für das von Stadt Welzheim, Rems-Murr-Kreis und Land Baden-Württemberg unterstützte Projekt zu bestreiten. Durch das über all die Jahre nie nachlassende Engagement des Vereins wurden viele öffentliche und private Geldgeber überzeugt, dass das Projekt in der Bevölkerung verankert ist und dass der Förderverein durch das trotz vieler Rückschläge nie nachlassende Engagement auch für die Zukunft der Bahn ein verlässlicher Partner ist.

Der Verein verfolgt in seiner Satzung folgende Ziele: Förderung des Erhalts der nach § 2 Denkmalschutzgesetz als Kulturdenkmal geschützten Schienenstrecke nach Welzheim als Eisenbahninfrastruktureinrichtung

- durch aktiven Einsatz auf der Strecke mit ehrenamtlichen Arbeitseinsätzen,
- durch ideelle Förderung,
- durch materielle Unterstützung bei Maßnahmen Dritter, die dem Vereinszweck dienen,
- durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit und Werbung für die Bahnstrecke nach Welzheim als eine der landschaftlich reizvollsten Nebenbahnen Baden-Württembergs und die Heimat- und Kulturgeschichte des Welzheimer Waldes prägende Infrastruktureinrichtung.

Der Verein ist vom Finanzamt Schorndorf als gemeinnützig im Rahmen der Denkmalpflege anerkannt.

Der Förderverein Welzheimer Bahn e.V. hat sich in den zurückliegenden 17 Jahren finanziell mit über 150 000 Euro aus Spenden und Mitgliedsbeiträgen an den Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen beteiligt. Außerdem haben sich die Aktiven des Vereins mit über 50 000 ehrenamtlichen Arbeitsstunden bei Inbetriebnahme der Bahn und zum Streckenerhalt eingebracht, um dieses für die Geschichte der Eisenbahn in der Region Stuttgart einmalige Denkmal zu erhalten und für den sanften Tourismus in der gesamten Region zu beleben.

Diese Aufgaben werden von den Aktiven des Fördervereins wahrgenommen:

- ehrenamtliche Unterhaltungsarbeiten an der Strecke (u. a. Herstellung und Pflege des Lichtraumprofils, Freimachen von Gräben, Renovierung von Drainagen und Durchlässen, Wartung der signaltechnischen Anlagen),



Gruppenbild der aktiven Mitarbeiter des Fördervereins Welzheimer Bahn e.V. im Herbst 2009

- ▀ Ausstellungen, Werbung und Öffentlichkeitsarbeit (DVD, Kalender, Flyer),
- ▀ Zusammenarbeit mit der Stadt Welzheim in der SWB GmbH,
- ▀ Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden.

Zu seinem zehnjährigen Jubiläum hat der Verein eine Festschrift in Form eines Bildbandes im Eigenverlag in einer Auflage von 3000 Stück herausgegeben. Die beiden Autoren (beide Mitglieder im Verein) dokumentieren in »Die Wieslaufbahn im Wandel der Zeit« im ersten historischen Teil die Geschichte der Bahn von 1911 bis 1988, im zweiten Teil den jahrelangen Kampf um die Wiederinbetriebnahme der Strecke.

Erfolgreicher Betrieb der Schwäbischen Waldbahn seit 2010

Die Schwäbische Waldbahn hat sich, derzeit bereits im achten Betriebsjahr, zu einem unverzichtbaren Bestandteil und touristischen Angebot des Rems-Murr-Kreises entwickelt. Jährlich über 20000 Fahrgäste und viele weitere Naherholungssuchende kommen Sonntag für Sonntag in die Gemeinden entlang der Strecke und entdecken die Schönheiten des Schwäbischen Waldes als Naherholungsgebiet. Die Schwäbische Waldbahn verbindet im Sinne eines sanften Tourismus Naturerlebnis, Denkmalpflege und Heimatverbundenheit.

Der Förderverein Welzheimer Bahn e.V. unterstützt mit den anderen am Projekt Beteiligten (z.B. dem Verein DBK Historische Bahn e.V., der für das fahrende Material auf der Strecke zuständig ist) auch nach Erreichen der Wiederinbetriebnahme der Bahn nach Welzheim diese Ziele durch nachhaltige ehrenamtliche Arbeiten, die den wirtschaftlichen Betrieb der Tourismusbahn erst möglich machen.

Der Verein hat neben den ständig anfallenden Unterhaltungsmaßnahmen an der Strecke auch einzelne Bau-Projekte in Angriff genommen, die das Ambiente rund um die Bahn nach historischen Vorbildern ergänzen sollen. So wurde im Bahnhof ein historischer Wasserkran aufgearbeitet und aufgebaut. An den Haltepunkten Laufenmühle und Tannwald wurden Beleuchtungen nach historischem Vorbild installiert. Außerdem wurde – initiiert und geplant von Mitgliedern des Vereins – 2013 ein Bahnerlebnispfad entlang der Strecke eingeweiht.

Förderverein Welzheimer Bahn e.V.

Vorsitzender: Johannes Friz
Gemeindehausstraße 2
73642 Welzheim
Tel.: 0700 25111911
E-Mail: info@welzheimer-bahn.de
Internet: www.welzheimer-bahn.de

Bankverbindung:

Volksbank Welzheim
IBAN: DE02 6139 1410 0019 2730 02
BIC: GENODE31WEL



Längsschnitt, Querschnitte, Grundriss, Lehrer



ISBN 978-3-7388-0013-5

