Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

Die Weinbergbrücke in Rathenow

M. Schlaich, A. Bleicher, M. Nier

Zusammenfassung Die 350 m lange Weinbergbrücke in Rathenow bei Berlin zeichnet sich durch zwei Hauptspannweiten aus, die von geneigten Bögen getragen werden. Die im Grundriss s-förmig geschwungene leichte Fußgängerbrücke aus Stahl wurde zur Bundesgartenschau 2015 Havelregion eingeweiht und wird auch nach dieser Veranstaltung hinaus einen Beitrag zur Infrastruktur und Baukultur der Region leisten. In diesem Beitrag werden die Entwurfsgeschichte der Brücke, die Detailplanung und der Bau besprochen. Außerdem wird auf das Tragverhalten von Brücken mit geneigten Bögen eingegangen.

Bild 1. Weinbergbrücke in Rathenow
Fig. 1. Weinberg Bridge in Rathenow

Abb.: Stephan Falk/Baubild

The Weinberg Bridge in Rathenow

Abstract The „Weinberg Bridge“ in the city of Rathenow some 70 km away from Berlin is an integral lightweight footbridge of 350 m length. It is characterized by two main spans which are carried by inclined arches and it consists of a slender steel box deck with a concrete slab lying on top for dynamic reasons, concrete-filled tied arches and tree type columns also made of steel. The bridge was opened in 2015 for the Federal Garden Show (BUGA) which took place in the region. It is S-shaped in plan and is carefully integrated in the park like area around the river Havel it crosses. The bridge will play its legacy role for the local infrastructure and „Baukultur“ also after the exhibition. In the paper, the conceptual and structural design as well as its construction will be described. The load bearing behaviour of inclined arches will also be treated shortly.

1 Einleitung

Als vier Studenten im Jahr 2008 beschlossen, gemeinsam eine Fußgängerbrücke zu entwerfen und für den Schinkel-Wettbewerb 2009 einzureichen, ahnte wohl noch niemand, dass aus dieser Idee Wirklichkeit werden sollte. Zur BUGA 2015 Havelregion wurde nun die 350 m lange, s-förmig geschwungene Brücke mit den zwei charakteristischen geneigten Stahlbögen fertig gestellt. Aus der Weiterentwicklung einer Entwurfsidee ist ein neuartiges Bauwerk entstanden, eine sehr leichte Fußgängerbrücke, eingepasst in die Landschaft der Havel und Impulsgeber für die touristische Infrastruktur in der Region auch über die Bundesgartenschau hinaus.

Jedes Jahr lobt der Architekten- und Ingenieur-Verein zu Berlin e. V. den Schinkel-Wettbewerb zur Förderung junger Architekten, Ingenieure und Studierender aus. Für 2009 stand die Region rund um die beiden Städte Brandenburg an der Havel und Rathenow im Nordwesten des Landes Brandenburg im Fokus. 2007 hatte die Region den Zuschlag für die Ausrichtung der BUGA 2015 erhalten, man arbeitete also bereits an Konzepten zur Durchführung. Die Stadt Ra-

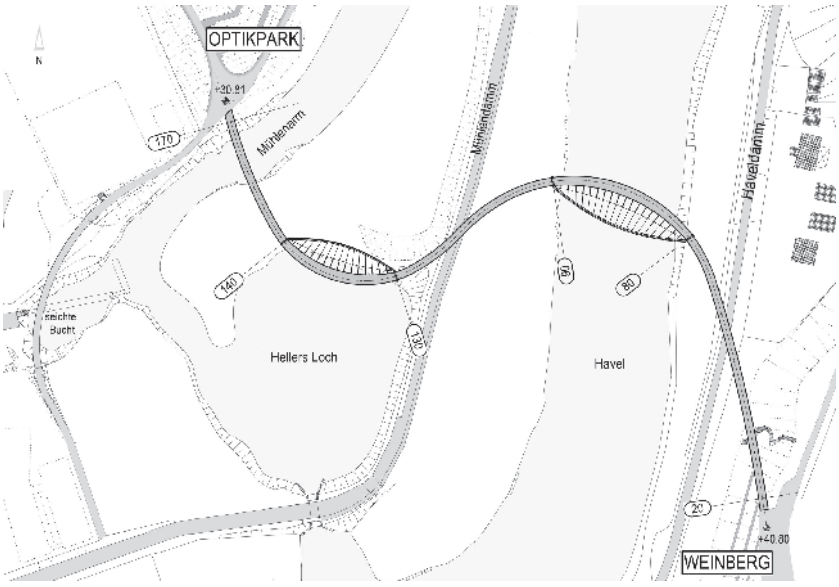

Bild 2. Lageplan
Fig. 2. Plan view

Abb.: schlaich bergermann partner

Prof. Dr. sc.techn. Mike Schlaich
Technische Universität Berlin,
Lehrstuhl Entwerfen und Konstruieren, Massivbau
schlaich bergermann partner

Prof. Dr.-Ing. Achim Bleicher
Brandenburgische Technische Universität
Cottbus – Senftenberg
Lehrstuhl Massivbau

Dipl-Ing. Mathias Nier
schlaich bergermann partner
Beratende Ingenieure im Bauwesen
Brunnenstaße 110c, 13355 Berlin
www.sbp.de

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

thenow, etwa 70 km von Berlin entfernt, gilt als Wiege der optischen Industrie in Deutschland. Von der Havel und ihren Nebenarmen und Auenlandschaften umgeben, liegt der knapp 25.000 Einwohner zählende Ort im größten zusammenhängenden Binnenland-Feuchtgebiet des westlichen Mitteleuropa.

Als Aufgabe in der Kategorie Konstruktiver Ingenieurbau des Schinkel-Wettbewerbs sollte die Havel überbrückt und somit der Optikpark, ein Gelände hervorgegangen aus der Landesgartenschau 2006, über den Fluss hinweg erweitert werden. Vom Park auf der sogenannten „Schwedendamminsel“ wünschte man sich eine direkte Anbindung zum gegenüberliegenden Weinbergpark. Zur Überwindung der Höhendifferenz von etwa 10 m zu dem waldartigen Park stellte man sich einen Turm mit Aussichtsplattform vor. Statt Brücke + Turm schlugen Kristina Brusius, Mirko Buff, Nadine Gisbert und Christina Heuschkel von der HafenCity Universität Hamburg eine s-förmig geschwungene Brücke vor. Durch deren Länge wird eine Steigung kleiner als 6 % erreicht, wodurch auf einen Turm verzichtet werden kann. Stattdessen spannen schräge Bogentragwerke über die Havel und entlang eines verbreiterten Nebenarms („Hellers Loch“), deren Brückendecks sich zur Mitte hin aufweiten und Platz für Sitzstufen mit Blick übers Wasser bieten (**Bild 3, 4**). Dieser elegante Vorschlag wurde mit dem Sonderpreis gestiftet vom Verband Beratender Ingenieure – Förderverein e. V. ausgezeichnet. Der Entwurf wurde betreut von den Professoren Michael Staffa und Klaus Sill.

Der Stadt Rathenow gefiel der Vorschlag, und die Idee wurde im Rahmen einer Vorplanung weiterverfolgt. Mitte 2011 wurde die Planung bis zur Bauüberwachung dann europaweit ausgeschrieben. Unsere Bewerbergemeinschaft bestehend aus schlaich bergermann partner (Berlin), Architekturbüro Pieper (Binz), Ingenieurbüro Küchler (Stralsund), Ingenieurgesellschaft Fischer (Brandenburg an der Havel) sowie Vermessungsbüro Gries (Rathenow) war erfolgreich und bekam den Zuschlag. Wir stiegen Anfang 2012 in den Planungsprozess ein mit einem Workshop mit allen Beteiligten sowie den vier studentischen Preisträgern. Die außergewöhnliche Brückengeometrie in einem Naturschutzgebiet mit beengten Bauverhältnissen sowie der Kostenrahmen von circa sechs Millionen Euro waren herausfordernde Rahmenbedingungen.

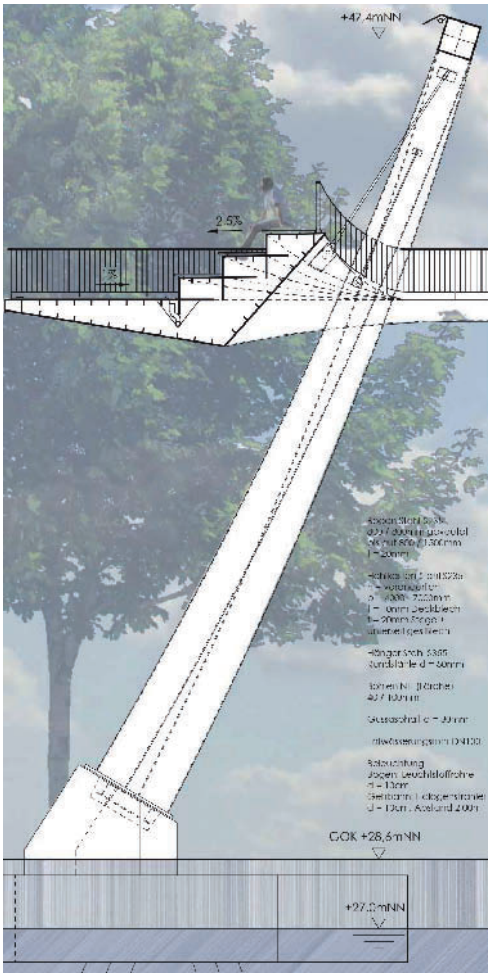

Bild 3. Entwurf Schinkelwettbewerb 2009; Querschnitte im Bereich des Bogens Abb.: K. Brusius, M. Buff, N. Gisbert, Ch. Heuschkel von der HafenCity Universität Hamburg
Fig. 3. Original design Schinkel competition 2009; Cross sections of arch bridge

2 Geneigte und räumlich gekrümmte Bögen

Bei einem geneigten Bogen und geradem Überbau ist die Bogenebene um die Verbindungsachse der beiden Kämpfer beziehungsweise um die Überbauachse aus der Vertikalen gedreht (**Bild 5**). Verbleiben die Hänger in der Bogenebene, wird der Bogen bei geometrie-affinen Lasten aus den Hängern auf Druck beansprucht. Allerdings verursacht das Eigengewicht des Bogens durch die Exzentrizität zu den Kämpfern Biegung im Bogen, weshalb er am Kämpfer eingespannt werden muss. Zudem entsteht bei einer einseitigen Aufhängung Torsion und durch die geneigten Hänger Querbiegung im Überbau.

Werden die Hänger aus der Bogenebene gedreht, um einen im Grundriss gekrümmten Überbau zu stützen (Bild 5), erzeugt die Kraftkomponente senkrecht zur Bogenebene Bie-

Bild 4. Entwurf Schinkelwettbewerb 2009; Ansicht Abb.: Abb.: K. Brusius, M. Buff, N. Gisbert, Ch. Heuschkel von der HafenCity Universität Hamburg
Fig. 4. Original design Schinkel competition 2009; Elevation

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

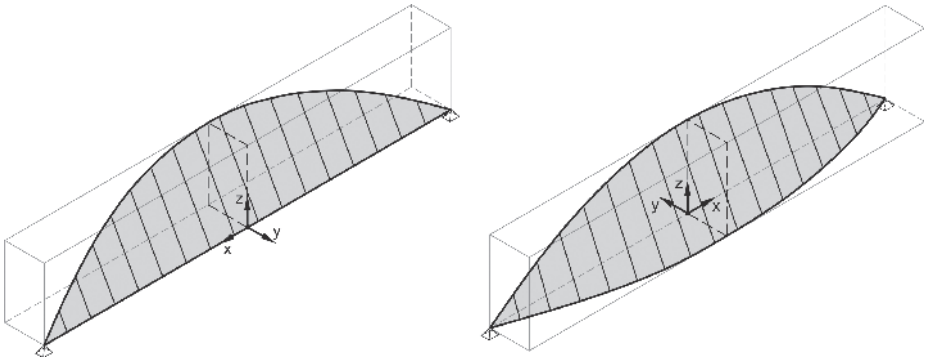

Bild 5. Geneigter Bogen mit geradem Überbau, Bogen mit gekrümmtem Überbau
Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 5. Inclined arch with straight bridge deck, arch with curved bridge deck

gung im Bogen. Das gilt für Eigengewichts- und Verkehrslasten. Unter Mitwirkung des Bogeneigengewichts lässt sich bestenfalls die Biegung aus dem Eigengewicht des Überbaues kompensieren, sodass der Bogen dafür rein druckbeansprucht ist.

„Mit diesem statisch nicht sehr überzeugenden Tragwerkstyp, der aber reizvolle Lösungen ermöglicht, hat sich fast die gesamte Riege der zeitgenössischen Fußgängerbrückenplaner beschäftigt“ [1]. Santiago Calatrava war einer der ersten, der sich intensiv mit geneigten Bögen auseinandersetzte und expressive Bogenkonstruktionen entwarf. Geneigte Bogenbrücken in zahlreichen Variationen wurden auch von Jiri Strasky, Wikinson Eyre mit Flint & Neil, Javier Manterola, Whitbybird und weiteren geplant [1], [2].

Statisch sinnvoller ist die Schrägstellung von zwei Bögen, die bei geradem Überbau keine Torsions- und Querbiegebeanspruchung im Überbau hervorrufen. Um die Biegemomente im Bogen aus dem Bogeneigengewicht zu kompensieren, könnte der Bogen mithilfe von Formfindungsmethoden räumlich gekrümmt ausgebildet werden. Bei dem hier gegebenen s-förmigen Grundrissverlauf des Überbaues wäre prinzipiell auch ein räumlich gekrümmter, seiner Stützlinie folgender Bogen möglich [1]. Eine solche Lösung wurde im Büro der Autoren für eine Brücke mit 100 m Spannweite in Belfast, Nordirland entwickelt. In Rathenow hätte der Bogen bei einer Spannweite von über 200 m jedoch pharaonische Ausmaße angenommen.

3 Entwurf

Im Mittelpunkt der Entwurfsüberarbeitung stand die Formfindung und Querschnittoptimierung der geneigten Bögen mit Spannweiten von 60 m und 48 m. Um hierbei auch den Einfluss der Bogenneigung auf die Bogen- und Hängergeometrie zu untersuchen, wurde eine Variantenstudie (V 1 bis V 7) durch Verschiebung der Kämpfer als Ausgang für eine

Bild 6. La Devesa Brücke von S. Calatrava in Ripoll, Spanien
Abb.: wilfried-dechau.de
Fig. 6. La Devesa Bridge by S. Calatrava in Ripoll, Spain

Bild 7. Merchants Bridge in Manchester, Großbritannien von Whitbybird
Abb.: wilfried-dechau.de
Fig. 7. Merchants Bridge in Manchester, Great Britain by Whitbybird

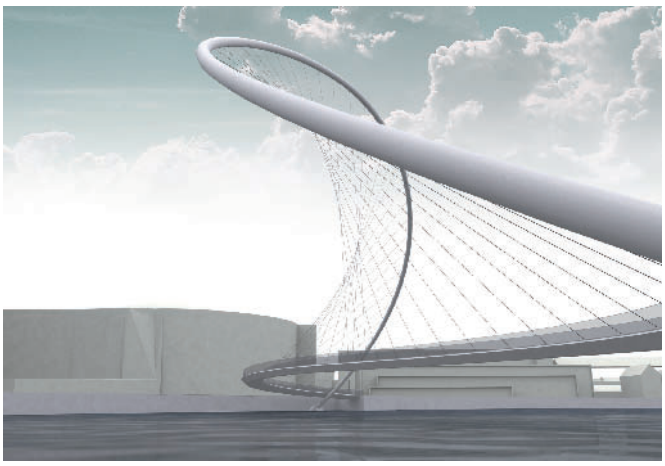

Bild 8. Bogenbrücke in Belfast, sbp, Nordirland, 2010 (nicht gebaut)
Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 8. Arch bridge in Belfast, sbp, Northern Ireland, 2010 (not built)

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

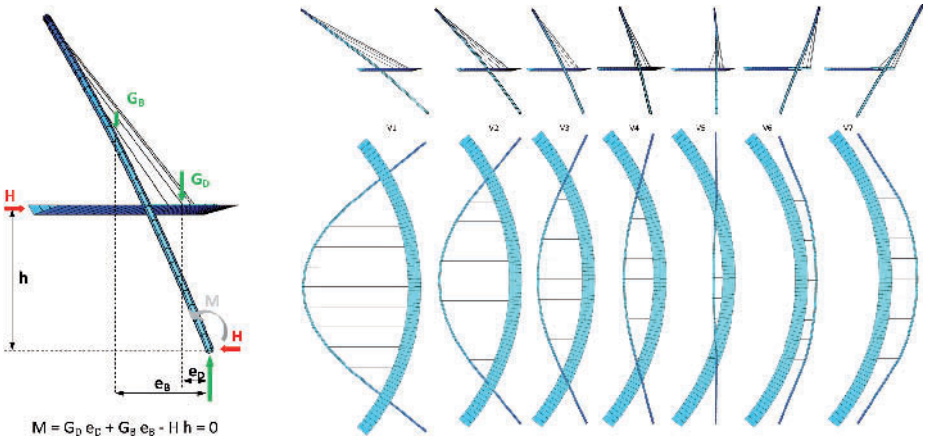

Bild 9. Formgefundene momentenfreie Bogengeometrien unter Eigengewicht Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 9. Bending moment free arch geometries for dead load by form-finding

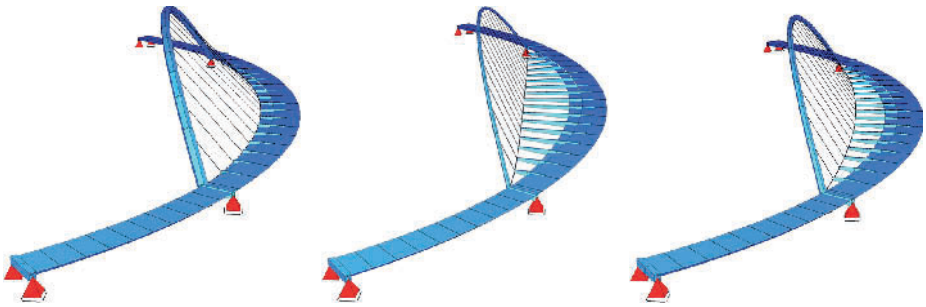

Bild 10. Ausgangsbogen (d = 1.200 mm), Bogen (d = 400 mm) mit Hängern in der Ebene und gewählter Bogen mit leicht aus der Bogenebene gedrehten Hängern (d = 600 mm). Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 10. Original arch (d = 1 200 mm), arch (d = 400 mm) with hangers in the plane und chosen arch with slightly rotated hangers out of plane (d = 600 mm).

neue Formfindung durchgeführt (**Bild 9**). Die Formfindung für einen momentenfreien Bogen erfolgte für Eigengewicht, wobei das äußere Gleichgewicht durch die Bedingung in Bild 9erfüllt wird.

Es wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Variante V 1: Die starke Neigung von Bogen und Hänger bewirkt hohe Seilkräfte infolge von Eigen- und Verkehrslasten, wobei Verkehrslasten große Biegung im Bogen und dadurch große Überbauverformung verursachen.
- Variante V 2, V 3 und V 4: Der Bogen durchläuft den Überbau. Das Lichtraumprofil des Überbaues ist durch Bogen und Hänger eingeschränkt.
- Variante V 5: Bei diesem räumlich gekrümmten Bogen verläuft die Resultierende der Hängerkräfte durch den Bogenkämpfer. Eigen- und Verkehrslasten des Überbaues werden ohne Biegung im Bogen abgetragen, wodurch ein schlanker Bogenquerschnitt möglich ist. Diese unter statischen Aspekten optimale Lösung genügte jedoch nicht dem formalen Anspruch eines geneigten Bogens in Anlehnung an den Ursprungsentwurf.
- Variante V 6 und V 7: Bogen und Überbau überkreuzen sich nicht mehr, was eine zu starke Abweichung vom Ursprungsentwurf darstellt.

Die Formfindung im Rahmen der Variantenstudie führte unter den gegebenen Randbedingungen nicht zum gewünschten Ergebnis eines geneigten, räumlich gekrümmten und sehr schlanken Bogens. Durch weitere Überlegungen wurde schließlich eine optimale Verteilung der Beanspruchungen auf Bogen und Überbau gewählt, die zu folgendem Tragwerk führt: Die Hänger sind an radial angeordneten Kragarmen angeschlossen, die im Grundriss nicht ganz bis zur Bogenebene führen, sondern einem gekrümmten Verlauf folgen. Dadurch neigt sich die Resultierende der Hänger nur ein wenig aus der um 25° aus der Vertikalen geneigten Bogenebene. So können Biegemomente im Bogen aus dem Eigengewicht des Überbaues und aus dem Eigengewicht des Bogens, der mit Beton gefüllt ist, nahezu kompensiert werden. Im Vergleich zum direkten Hängeranschluss können so die Biegemomente im Bogen aus Verkehrslasten deutlich reduziert werden, was einen sehr schlanken Querschnitt von 600 mm x 600 mm ermöglicht. Die exzentrische Aufhängung des im Grundriss gekrümmten Überbaues, des sogenannten Kreisringträgers, muss jedoch durch ein Krempelmoment bezahlt werden, das über Biegung im Überbauquerschnitt abgetragen wird [3]. Durch die ohnehin vorgesehene Aufweitung des Überbauquerschnitts für den Verweilbereich hält sich der Mehraufwand jedoch in Grenzen.

Allen bisher dargestellten Varianten gemeinsam ist der weiterführende lange Bogen unterhalb des Überbaues der diagonal ins Unterholz führt und dort mit geneigten Bohrpfählen gegründet werden müsste. Zur Vereinfachung des Gründungsbauwerks lag es nahe, den Bogenschub auf Höhe des Überbaues durch ein Zugband kurz zu schließen, was eine vertikale Stützung von Überbau und Bogen ermöglicht. Der Gleichgewichtspunkt aus Bogen und Überbau unter Eigengewicht, an dem die vertikale Stützung nahezu keine Biegung erfährt, liegt zwischen der Systemlinie des Überbaues und der Außenkante des Kreisringträgers. Um den Bogen am Kämpfer direkter zu stützen, was formal auch harmonischer wirkt, wurde die Y-Stütze in Richtung Bogen verschoben und asymmetrisch ausgebildet. Weiter unten wird das Knotendetail ausführlicher beschrieben.

Der rund 350 m lange Überbau besteht aus einem nur 550 mm hohen polygonal geschweißten, torsionssteifen Stahlhohlkasten, um die planmäßige Biege- und Torsionsbeanspruchung aus unsymmetrischen Lasten aufzunehmen. Die Gradiente neigt sich abschnittsweise von 1,7 % auf maximal 5 % und verliert dabei an Höhe von +41,00 m am Weinberg auf +30,81 m NHN am Optikpark. Im Bereich der Bogenbrücken weitet sich das Brückendeck im Grundriss kontinuierlich von 3 m zwischen den Geländern am Kämpfer auf 4 m in der Bogenmitte auf und bietet einen herrlichen Blick auf die Havel und Platz für ein Verweilbereich mit Bänken. Hier wird der Überbau im Abstand von circa 3 m über die radial angeordneten Kragarme aufgehängt. Im Anschluss an die Bogenbrücken wird der Überbau mit gleichem Querschnitt als Durchlaufträger fortge-

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

führt und durch mittig angeordnete Y-Stützen bei einer Regelspannweite von 18 m unterstützt. Um die Horizontallasten des hoch aufgeständerten Brückendecks abzutragen, werden die Bogen- und Rampenstützen biegesteif am Brückendeck und am Stützenfuß angeschlossen. An den Widerlagern ist der Überbau durch großformatige Stahl-Einbauteile monolithisch mit den Unterbauten aus Stahlbeton verbunden. Die Gründung der Widerlager und Stützen erfolgt über Bohrpfähle im tragfähigen Sand. Mit der integralen Ausführung wird eine sehr robuste und nahezu wartungsfreie Konstruktion erreicht. Die Ausdehnungen infolge von Temperatur werden durch den s-förmigen Verlauf nahezu zwängungsfrei abgetragen.

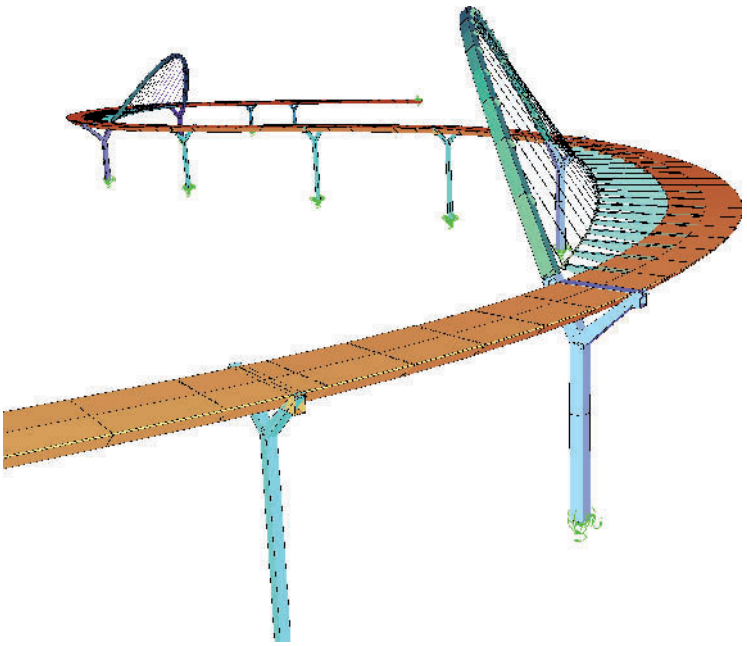

Bild 11. Finite-Elemente-Modell der gesamten Brücke Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 11. Finite-element-model of entire bridge structure

4 Berechnung und Bemessung

Gesamtsystem

Die statischen Berechnungen erfolgten am räumlichen Gesamtsystem geometrisch nicht-linear (Theorie III. Ordnung) mit den Programmen der Sofistik AG. Die Nachgiebigkeit der Gründungsbauwerke wurde über separate FE-Modelle ermittelt. Die daraus ermittelten Ersatzfedersteifigkeiten wurden als Lagerungsbedingungen im räumlichen Gesamtsystem berücksichtigt, wobei Grenzwertbetrachtungen mit geringen und großen Pfahlsteifigkeiten betrachtet wurden.

Zur Beurteilung des globalen Stabilitätsverhaltens der Bögen wurden zunächst für die wesentlichen Lastfallkombinationen die ersten Beulformen unter Traglastniveau sowie die zugehörigen Traglastfaktoren mit der kleinsten Sicherheit gegen globales Beulen bestimmt. Anschließend wurden die ermittelten zugehörigen Beuleigenformen als Imperfektionsfigur auf das System aufgebracht. Eine Skalierung der Beuleigenformen, die als Relativverschiebung auf die perfekte Bogenform positiv und negativ aufgesetzt wurde, erfolgte mit den Imperfektionen nach DIN EN 1993–2. Des Weiteren wurden globale Schiefstellungen nach DIN EN 1993–1–1 für die Rampen- und Bogenstützen angesetzt. Die globalen Stabilitätsnachweise sind dann mit Einhaltung der Vergleichsspannungen nach Theorie III. Ordnung erfüllt. Für den Bogen resultierte aus dieser Untersuchung ein Spannungszunahme von ~ 15 %.

In den statischen Berechnungen wurden die folgenden Belastungen berücksichtigt:

- Eigengewichts- und Ausbaulasten.
- Vorspannkräfte: Die Brücke wird so eingestellt, dass sie sich unter den 1,0-fachen Eigengewichts- und Ausbaulasten sowie den Vorspannkräften (Vorspannung der Hänger und Zugbänder, axiale Verlängerung der Bögen,) in der Sollgeometrie befindet.
- Verkehrslasten nach DIN Fachbericht 101 (unsymmetrische Laststellungen in Längs- und Querrichtung), Einzellasten aus Dienstfahrzeugen mit 4,5 Tonnen.
- Windlasten nach Windgutachten.
- Temperaturschwankungen des Gesamtsystems von +41 K/- 36 K, Temperaturunterschiede zwischen verschiedenen Bauteilen.
- Auflagersetzungen von 2 cm.

Auf Grundlage der Ergebnisse des Gesamtsystems wurden die einzelnen Bauteile dimensioniert. Lokale Stabilitätsnachweise wurden unter Berücksichtigung von lokalen Vorkrümmungen mit dem Ersatzstabverfahren geführt. Die Beulnachweise für den Überbauhohlkasten erfolgten nach DIN EN 1993–1–5, Kapitel 10 über eine Spannungsbeschränkung zur Einhaltung der Bedingungen für Querschnittklasse 3. Für einzelne Anschlussdetails, wie zum Beispiel den Stahl-Einbauteilen in den Widerlagern zur Realisierung des integralen Anschlusses (**Bild 12** und **Bild 13**) und den mit Spanngliedern verankerten Fußpunkten der Bogen- und Rampenstützen, wurden detailliertere FE-Berechnungen durchgeführt. Die Weiterführung der Kräfte in die Bohrpfähle sowie die Bemessung der Widerlager und Pfahlkopfplatten erfolgte mit Stabwerkmodellen.

Dynamisches Tragverhalten

Das dynamische Verhalten einer filigranen Fußgängerbrücke hängt entscheidend von deren Eigendämpfung ab, die erst nach Fertigstellung der Brücke genau bestimmt werden kann. Daher werden im Rahmen der Planung zunächst rechnerische Untersuchungen zu fußgängerinduzierten Schwingungen durchgeführt und planmäßig Kammern für mögliche Schwingungstilger vorgesehen. Die Notwendigkeit von Schwingungsmessungen und schwingungsdämpfenden Maßnahmen wird erst nach Fertigstellung der Brücke durch den Bauherrn / Tragwerksplaner in Abstimmung mit dem Prüfingenieur geklärt.

Hier hat die dynamische Analyse gezeigt, dass es im Bereich der Bogenbrücken eine Schwingungskopplung zwischen Überbau und Bogen gibt. Dadurch können Fußgänger möglicherweise durch eine vertikale Anregung des Überbaues den Bogen in horizontale Schwingung versetzen. In **Bild 14** ist diese Kopplung in der 7. Eigenform mit einer Eigenfrequenz von 1,36 Hz und einer modalen Masse von 78 Tonnen zu erkennen.

5 Konstruktive Durchbildung

Bogen und Bogenkämpfer

Die beiden 60 m sowie 48 m weit spannenden polygonal ausgebildeten Bögen mit Scheitelhöhen von 10,8 m sowie

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

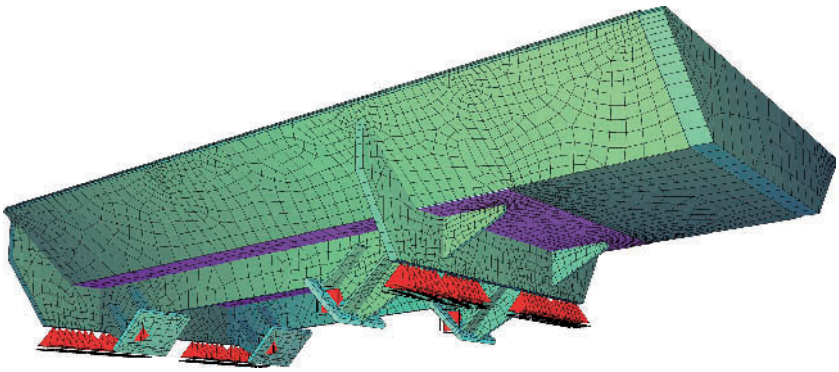

Bild 12. Finite-Elemente-Modell des integralen Anschlusses Überbau – Widerlager

Abb.: schlaich bergermann partner

Fig. 12. Finite-element-model of integral connection between bridge deck and abutment

Bild 13. Einbauteil des integralen Anschlusses Überbau – Widerlager

Abb.: schlaich bergermann partner

Fig. 13. Built-in steel part of integral connection between bridge deck and abutment

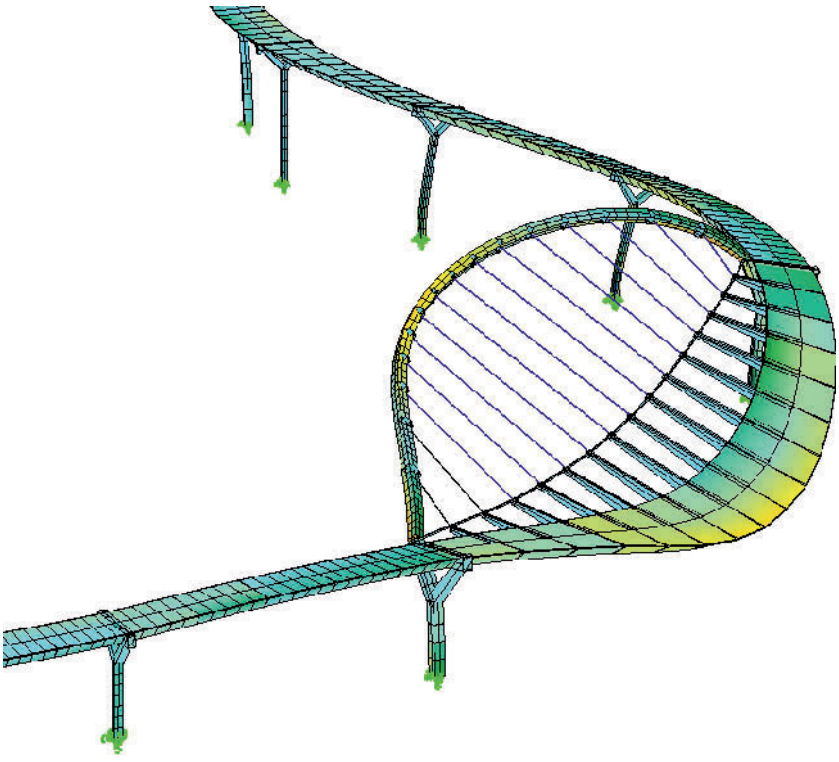

Bild 14. Schwingungskopplung zwischen Überbau und Bogen (7. Eigenform)

Abb.: schlaich bergermann partner

Fig. 14. Vibration coupling of bridge deck and arch (7. Mode shape)

8,0 m bestehen aus geschweißten Hohlprofilen mit Abmessungen von 600 mm x 600 mm x 30 mm sowie 500 mm x 500 mm x 25 mm der Güte S 355. Am Bogenkämpfer wird der Bogenquerschnitt durch zwei Gehrungsschnitte in den Stützenquerschnitt mit den gleichen Abmessungen überführt. Der so entstandene Knick wirkt auf den ersten Blick etwas unnatürlich für einen Bogen, doch das genau in diesem Schnittpunkt angeschlossene Zugband für den Kurzschluss des Bogenschubs begründet die wohl durchdachte Lösung. So können auch die scharfen Kanten des Bogenhohlprofils ohne Querschnittverdrehung und ohne Kopfplattenüberstände analog einer Glanzlinie bis zum Stützenfuß fortgeführt werden. Neben Bogen, Stütze und Zugband musste an dieser Stelle auch der Kreisringträger konstruktiv sauber angeschlossen werden. Zur Lösung dieser geometrisch komplexen Herausforderung wurde ein ausführungsreifes 3D-Modell (Rhino) erstellt.

Überbau

Der s-förmige Verlauf des Überbaues im Grundriss in Verbindung mit der vorhandenen Steigung erzeugt für den Hohlkasten verwundene Flächen sowie Bleche. Obwohl doppelt gekrümmte Bleche wirtschaftlich hergestellt werden können [4], entschied man sich die einzelnen Überbausegmente aus ebenen Blechen zu fertigen und an den planmäßigen Überständen der Querschotte im Abstand von 3 m zu verdrehen. Grund hierfür war unter anderem, dass im Bereich der Bogenbrücken die Kragarme, aus geschweißten und gevouteten T-Profilen mit Blechstärken von 40 mm in S 355, zur Krafteinleitung in den Hohlkasten geführt werden. Die Blechstärken des Hohlkastens wurden entsprechend der Beanspruchung zwischen 15 mm und 40 mm abgestuft und in S 355 sowie S 460 ausgeführt. Zur Aussteifung der Einzelbleche werden Längssteifen nach Erfordernis im Inneren des Hohlkastens aufgeschweißt.

Die beiden vollverschlossenen Zugbänder zur Aufnahme des Bogenschubs mit Durchmesser 90 mm für den großen und Durchmesser 75 mm für den kleinen Bogen werden am Ende der Kragarmen durch gefräste Sättel und Klemmen aus S 460 in Position gehalten. Hier sind auch die Hänger aus Edelstahl-Spiralseilen mit Durchmesser 28,6 mm sowie 24,1 mm über einen Gabelfitting angeschlossen.

Auf dem Hohlkasten liegt eine im Mittel 14 cm hohe nichttragende Betonplatte, die als robuster Gehbelag dient und mit ihrem Gewicht und ihrer Dämpfung das dynamische Verhalten der Brücke begünstigt. Zur Abdichtung wurde ein Dünnschichtbelag aufge-

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

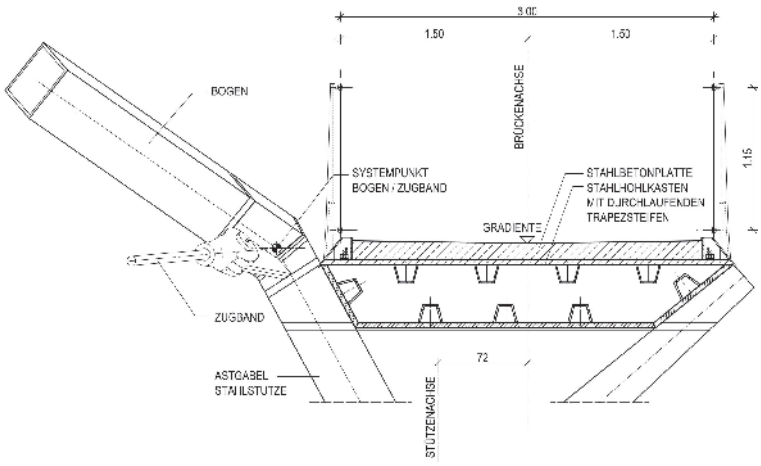

Bild 15. Anschluss von Bogen, Zugband, Stütze und Überbauquerschnitt
Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 15. Detail of arch, tieback cable, column and bridge deck connection

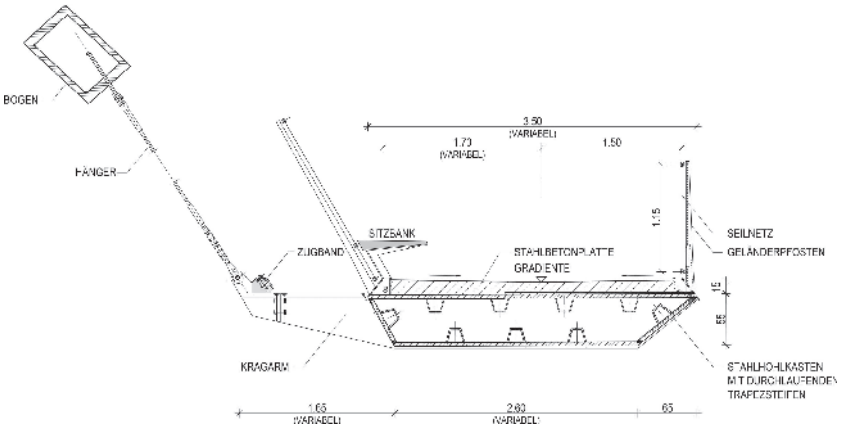

Bild 16. Querschnitte im Bereich des Bogens
Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 16. Cross sections of arch bridge

Bild 17. Hängeranschluss Bogenbrücke
Abb.: Stephan Falk/Baubild
Fig. 17. Hanger connection at arch bridge

bracht. Die Entwässerung erfolgt über ein Quergefälle der Betonplatte zur Mitte und weiter über das natürliche Gefälle der Gradiente zu regelmäßig angeordneten Brückenabläufen mit direkter Entwässerung in die Vorflut. Beidseitig der Betonplatte ist ein Kabelkanal für den Anschluss der Orientierungsbeleuchtung in den Geländerpfosten und für die Bogenbeleuchtung angeordnet.

Das transparente Seilnetzgeländer aus Edelstahl spannt zwischen zwei Edelstahl-Randseilen und ist im Abstand von 3 m an die Geländerpfosten angeschlossen. Im Bereich der Bogenbrücken neigen diese sich kontinuierlich aus der Vertikalen um bis zu 30° zum Bogen und bilden damit gleichzeitig eine weiche Rückenlehnen für den Sitzbereich, der sich zur Bogenmitte kontinuierlich verbreitert. Um das Geländer so transparent wie möglich zu gestalten und die Aussicht auch im Sitzen nicht einzuschränken wird als Handlauf auf das obere Randseil mit Durchmesser 16 mm zurückgegriffen.

Stützen und Gründung

Die Y-förmigen Stützen nehmen den Überbauquerschnitt sowohl bei den Rampen- als auch bei den Bogenstützen konsequent auf. Durch die Voutung der Astgabeln und Stützenquerschnitte von 350 mm x 350 mm bei einer Blechstärke von 25 mm in S 355 wirken die Rampenstützen sehr schlank. Bei den Bogenstützen geht der „Hauptast“ mit gleichen Abmessungen in den Bogen über, der „Seitenast“ stützt den Überbau analog zur Rampenstütze. Am Fußpunkt wird ein biegesteifer Anschluss der Stützen an den Gründungskörper aus Stahlbeton der Güte C 40/50 über Spannglieder der Güte St 950/1050 realisiert. Die Vorspannung ist dabei so gewählt, dass zwischen der Fußplatte und dem Betonsockel keine klaffende Fuge unter Gebrauchslasten auftreten kann. Die Weiterführung der Kräfte erfolgt bei den Rampenstützen über vier Bohrpfähle und bei den Bogenstützen über neun Bohrpfähle mit Durchmesser 60 cm, teilweise geneigt und mit Längen von bis zu 17 m.

Beleuchtung

Das Beleuchtungskonzept für die Brücke im naturnahen Raum wurde so dezent wie möglich gehalten. Als Orientierungsbeleuchtung ist in jedem Geländerpfosten knapp oberhalb des Gehwegs eine 17,5 cm lange LED-Leuchte mit einer weißen breitstrahlenden symmetrischen Lichtverteilung integriert. Im Bereich der Bogenbrücken ist eine für besondere Anlässe zuschaltbare grafische Beleuchtung installiert. Hierbei werden zum einen die radialen Achsen von Hänger und Kragarm durch LED Strahler mit einer weißen engstrahlenden Lichtverteilung auf dem Überbau fortgeführt, wodurch auch der Sitzbereich hervorgehoben wird. Zum anderen wird mit den auf den Kragarmen installierten LED Leuchten der geneigte Bogenverlauf durch Anstrahlen des Bogens inszeniert.

6 Bau

Nach dem Spatenstich im Dezember 2012 wurde mit den Arbeiten auf der Baustelle begonnen. Zunächst wurden die Pfahlgründungen mit Pfahldurchmessern von 60 cm und Längen bis zu 17 m sowie die Pfahlkopfplatten hergestellt.

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

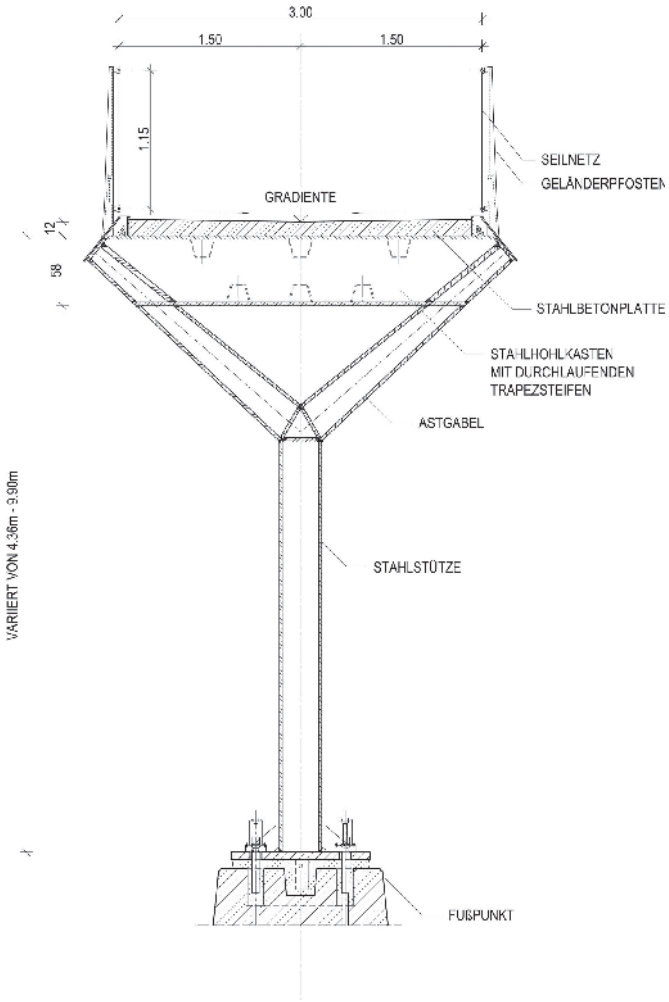

Bild 18. Querschnitt Rampenbrücke Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 18. Cross section of ramp bridge deck

Bild 19. Anschluss Brückendeck
Abb.: Stephan Falk/Baubild
Fig. 19. Connection to bridge deck

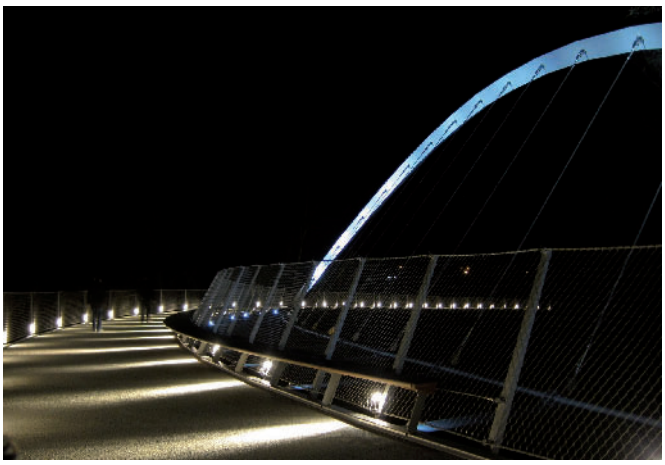

Bild 20. Beleuchtung der Bogenbrücke Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 20. Lighting of arch bridge

Nach Fertigstellung der Gründungen wurden die Stützen montiert und ausgerichtet. Auf diese Stützen wurden dann die vorgefertigten Überbausegmente, inklusive des oberen v-förmigen Teils der Stützen gesetzt und temporär befestigt und verschweißt. Um den gewünschten Momentenverlauf des Durchlaufträgers im Endzustand einzustellen und um den tangentialen Übergang zwischen den einzelnen Abschnitten zu gewährleisten, war es erforderlich, die Stützen überhöht einzubauen. Nach Anschluss des Folgesegments und dem vollständigen Verschweißen der Überbausegmente wurde die Stütze des vorherigen Bauabschnitts dann auf die endgültige Lage abgesenkt. Ausgehend von den Bogenbrückenbereichen wurde so der komplette Überbau montiert. Die Bögen wurden in jeweils zwei Teilen auf die Baustelle geliefert und auf Hilfsstützen temporär gelagert, mit dem Überbau verschweißt und danach vor Ort mit Beton gefüllt. Nach der Montage der Kragarme wurden die horizontalen vollverschlossenen Seile zwischen die Bogenfußpunkte eingehängt. Da keine Spannschlösser für die horizontalen Seile vorgesehen waren, wurden die Seile erst nach genauer Einmessung der vorhandenen Stahlbaugeometrie konfektioniert. Das Spannen der Seile wurde dann schrittweise über das Heranziehen und Einhängen der Seile in die an den Enden der Kragarme befestigten Seilklemmen realisiert. Nach der Montage der horizontalen Koppelseile, erfolgte der schrittweise Einbau und das Spannen der Edelstahlhängerseile. Nach Fertigstellung des Stahlbaus wurde die Betonplatte vor Ort hergestellt, wobei die Bereiche der Schwingungstilgerkammern ausgespart wurden.

Aus Zeit- und Kapazitätsgründen wurden große Teile der Stahlbaufertigung zu Nachunternehmern in Polen und der Tschechischen Republik ausgelagert. Nur die großen Widerlagersegmente wurden noch bei RW-Montage direkt in Österreich gefertigt. Im Werk wurden die Stützen, der Überbau- und die Bogenquerschnitte bis zur maximal transportfähigen Größe vorgefertigt. Da eine Probemontage der einzelnen Teile, die in den unterschiedlichen Werken gefertigt wurden aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden konnte, war eine besondere Sorgfalt hinsichtlich der Passgenauigkeit und Maßkontrolle der Einzelbauteile vor allem an den Schnittstellen erforderlich. Es konnte letztlich durch eine Vielzahl von Kontrollmessungen gewährleistet werden, dass auf der Baustelle alle Teile gut zusammenpassten. Aufgrund der größeren Breite der Überbauquer-

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

schnitte in den Bogenbereichen, entschied sich der Unternehmer diese Teile per Schiff auf dem Wasserweg über die Havel zur Baustelle zu transportieren. Auf diese Weise konnten aufwendige Vorbereitungen der Zulieferwege entfallen. Alle anderen Stahlbausegmente konnten problemlos auf dem Landweg antransportiert werden. Die Entladung der einzelnen Segmente wurde mit einem großen Mobilkran realisiert. Als erschwerende Bedingungen vor Ort waren die engen Zeitfenster für die Montage der Bogenbrücken über Hellers Grund und der Havel sowie die, aufgrund des hohen Baumbestandes und der Hanglagen, beengten örtlichen Platzverhältnisse zu sehen. Aus Naturschutzgründen bestand beispielsweise zwischen Anfang März und Ende Juli eine vollständige Bauzeitenbeschränkungen für Arbeiten in der Havel und dem angrenzenden „Hellers Loch“, wo für die Montage der Überbau- und Bogensegmente temporäre Hilfsstützen in den Gewässern gestellt werden mussten.

Schwingungsmessungen

Nach Fertigstellung der Arbeiten wurde in einem ersten Ortstermin das Schwingungsverhalten der Brücke zusammen mit dem Bauherren und den Planern getestet. Neben deutlich spürbaren Vertikalschwingungen im Bereich der Bogenbrücken und im ersten langen Brückenfeld auf der Optikparkseite wurden auch Horizontalschwingungen in Längsrichtung beobachtet, die infolge der Vertikalbewegung der Brücke auftraten. Um den höchstmöglichen Nutzungskomfort zu gewährleisten, wurde entschieden, weitere genauere Messungen an der Brücke durchführen zu lassen und die vorgesehenen Schwingungstilger einzubauen.
Die Messungen der Eigenfrequenzen und Beschleunigungen der Brücke wurden durch Maurer Söhne durchgeführt, die ebenfalls für die finale Auslegung der Schwingungstilger verantwortlich waren.
Für die Bestimmung der Eigenfrequenzen, Modalformen und Dämpfungen wurden vier ambiente Schwingungsmessungen mit einer Abtastrate von 100 Hz für jeweils 15 Minuten durchgeführt. Anhand der ermittelten Eigenfrequenzen wurden einer Fußgängergruppe dann bestimmte Schrittfrequenzen vorgegeben, um die fußgängerinduzierte Schwingungsanfälligkeit der Brücke zu testen.

Zusammenfassung der Messergebnisse

Große Bogenbrücke
Mitte: 1,70 Hz, a = 0,7 m / s², $\varkappa$ = 0,54 %
(7 Personen) (berechnet 1,53 Hz)
Viertelspunkte: 2,22 Hz, a = 1,2 m / s², $\varkappa$ = 0,36 %
(3 Personen) (berechnet 1,59 Hz)

Kleine Bogenbrücke
Mitte: 2,08 Hz, a = 1,5 m / s², $\varkappa$ = 0,62 %
(6 Personen) (berechnet 1,36 Hz)

Erstes Brückenfeld (Optikpark)
Mitte: 4,00 Hz*, a = 1,35 m / s², $\varkappa$ = 0,6 %
(1 Person) (berechnet 2,59 Hz)
*Anregung bei einer Frequenz von 2.0 Hz

Die Auswertung der Messergebnisse zeigte, dass die gemessenen Eigenfrequenzen der Brücke durchgehend über den rechnerisch ermittelten Frequenzen lagen. Das lässt sich auf die höhere Bauwerksteifigkeit durch die, in den FE-Berechnungen nicht in Ansatz gebrachten, internen Beulsteifen der Stahlhohlkästen und die zusätzlich statisch wirksame Betonplatte zurückführen.

Bild 21. Montage der Bögen mit Schweißzelten Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 21. Assembly of the arches with welding tents

Bild 22. Spannen der Hänger Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 22. Pre-stressing of the hangers

Bild 23. Einbau Schwingungstilger Abb.: schlaich bergermann partner
Fig. 23. Installation of tuned mass damper

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

7 Schlussbemerkung

Aus der Weiterentwicklung eines studentischen Entwurfskonzeptes für eine barrierefreie Verbindung mit geneigten Bögen als „Eyecatcher“ und integrierten Verweilflächen konnte durch die Zusammenarbeit von erfahrenen Planern und Bauunternehmen, eine plausible Weiterentwicklung und Detaillierung der Konstruktion und nicht zuletzt durch einen aufgeschlossenen Bauherrn ein innovatives Bauwerk realisiert werden: eine leichte und elegante Fußgängerbrücke, ein ressourcenschonendes und wartungsarmes Bauwerk, das auch über die Bundesgartenschau hinaus als Landmarke in der Region und Beispiel der Ingenieurbaukunst dienen kann.

Literatur

[1] *Baus, U.; Schlaich, M.*: Fußgängerbrücken – Konstruktion, Gestalt, Geschichte. Birkhäuser Verlag, Berlin, 2007.

[2] *Jorquera Lucerga, J. J.*: Estudio del comportamiento resistente de los puentes arco espaciales. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Tesis Doctoral, 2007.

[3] *Schlaich, J.*: Der kontinuierlich gelagerte Kreisringträger unter antimetrischer Belastung. *In*: Beton- und Stahlbetonbau, Januar (1967), S. 21-23.

[4] *Schlaich, M. ; Bleicher, A.; Pasternak, H.*: Der Porsche Pavillon in Monocoque-Bauweise. *In*: Bauingenieur 89 (2014), Heft 1, S.1 – 10.

Beteiligte

Bauherr	Stadt Rathenow
Projektsteuerung	IbB Ingenieurbüro für Bauleitung Arndt, Rathenow
Verfasser des Entwurfskonzeptes im Rahmen des Schinkelwettbewerbs	Kristina Brusius, Mirko Buff, Nadine Gisbert, Christina Heuschkel
Arbeitsgemeinschaft	
Objektplanung, Tragwerksplanung Überarbeitung des Entwurfskonzeptes, Genehmigungs- und Ausführungsplanung Stahl- und Seilbau, Ingenieurtechnische Kontrolle, Beleuchtungsplanung	schlaich bergermann partner: Mike Schlaich, Achim Bleicher, Mathias Nier, Ria Dierichen, Peter Schulze, Christiane Sander
Objektplanung, Tragwerksplanung Genehmigungs- und Ausführungsplanung Gründung, örtliche Bauüberwachung	Ingenieurbüro Küchler GmbH, Stralsund
Örtliche Bauüberwachung	Architekturbüro GbR – Hartmut und Ilona Pieper
Baugrundbeurteilung	Ingenieurgesellschaft Fischer mbH, Brandenburg an der Havel
Vermessung	Vermessungs- und Sachverständigenbüro Steffen Gries, Rathenow
Ausführung	RW Montage GmbH, Perg, Österreich
Windgutachten	WACKER INGENIEURE, Birkenfeld
Bautechnische Prüfung	Prüfingenieur Hans-Gerd Lindlar, KREBS+KIEFER, Berlin
Landschaftsplanung	Hagen Roßmann, Seeblick

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf