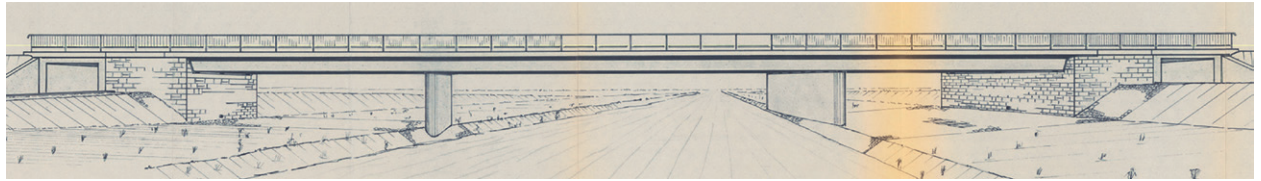


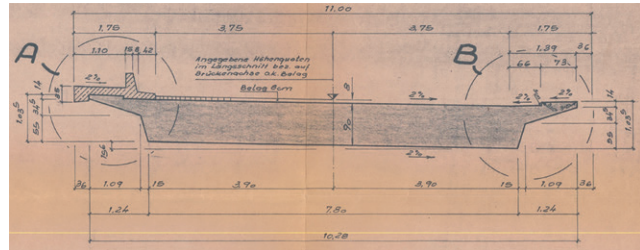
Schneller Wiederaufbau durch gemeinsames Handeln Brücke über die Ahr im Zuge der L 83

■ ■ ■ von Markus Hennecke, Marco Heinze, Thomas Becker



1 Ansicht des Bestandsbauwerks
© Straßenbauverwaltung Rheinland-Pfalz

Am 14. Juli 2021 wurde das Ahrtal von einer schweren Naturkatastrophe getroffen. Heftige Regenfälle haben die Ahr ansteigen lassen und eine 6–10 m mächtige Flutwelle hat sich durch das Tal gewälzt. Dabei wurde fast die komplette Infrastruktur in der Region zerstört. Neben zahlreichen Brücken, die die Ahr überqueren, war auch die gesamte Versorgung aus Strom-, Wasser-, Abwasser-, Gas- und Telefonnetz außer Betrieb. In der als »Großschadenslage« betitelten Region wurde zuerst eine koordinierte Erkundung mit allen Akteuren durchgeführt. Danach sorgte die Aufteilung des Vorgehens in Sofort- bzw. Notmaßnahmen, Provisorien und Planungen für Struktur im Handeln. Höchste Priorität lag dabei auf Sicherungs- und Abbruchmaßnahmen, um weitere Schäden zu vermeiden (Gefahrenabwehr). Eine der wenigen Brücken, die für einen provisorischen Wiederaufbau in Frage kamen, war die Querung der Ahr im Zuge der L 83. Die Flut hatte das südliche Widerlager unterspült und in der Lage verkippt, so dass das Randfeld der Brücke vollständig frei hing.

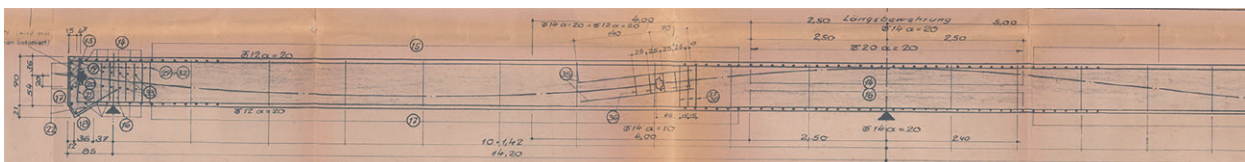


2 Überbauquerschnitt der bestehenden Brücke
© Straßenbauverwaltung Rheinland-Pfalz

1 Bauwerk

Bei der Brücke über die Ahr im Zuge der L 83, mit der historischen Bauwerksbezeichnung Ko 360 (BW-Nr. 5408-598), handelt es sich um ein dreifeldriges Bauwerk. Die Brücke wurde 1968 errichtet und überspannt die Ahr mit den seitlichen Vorlandbereichen. Die Spannweite der Randfelder beträgt jeweils 14,20 m und die des Flussfelds 24,00 m. Unmittelbar am nördlichen und südlichen Widerlager schließen zwei Durchlässe an, die zum Fluss parallel verlaufende Geh- und Radwege unterführen. Das Bauwerk ist in der Brückenklasse 60 nach DIN 1072 eingestuft. Der Überbau besteht aus einem Vollquerschnitt mit seitlichen Kragarmen. Seine Querschnittsabmessungen werden durch eine Gesamtbreite von 10,28 m und eine maximale Höhe von 90 cm beschrieben. Damit ergibt sich für das Innenfeld eine Überbauschlankheit von etwa $l/h = 27$. Die Brücke ist in Längsrichtung mit Spannmitgliedern VT 108 (St.125/140) vorgespannt. Ein Drittel von ihnen verläuft dabei über die gesamte Überbaulänge. Die restlichen Spannmitglieder erstrecken sich wechselseitig von den jeweiligen Widerlagerachsen aus bis in das gegenüberliegende Randfeld, wo sie kurz hinter der Pfeilerachse verankert wurden.

Die Spannabweisung konnte den Bestandsunterlagen entnommen werden. Danach wurden die Spannmitglieder entsprechend der damals geltenden Bauvorschriften vorgespannt. Beim Anspannen wurde die Spannkraft kurzzeitig um 18 % überspannt. Die durchlaufenden Spannmitglieder wurden beidseitig angespannt. Die Betonstahlbewehrung wurde in Bauwerkslängs- und -querrichtung in Form einer gleichmäßigen Grundbewehrung verlegt. In den Pfeilerachsen wurde der Bewehrungsgehalt an der Querschnittsoberseite und im Bereich der Festanker an der Ober- und Unterseite vergrößert. Der Überbau lagert schwimmend auf Elastomerlagern auf. In den Pfeilerachsen befinden sich jeweils sieben Lager. In den Widerlagerachsen lagert der Überbau auf vier Elastomerlagern auf. Die Unterbauten sind senkrecht zur Brückenachse angeordnet und bestehen aus zwei Kastenwiderlagern sowie zwei Pfeilerscheiben, die jeweils flach gegründet sind.



3 Bestandsplan: Spannmitgliedverlauf
© Straßenbauverwaltung Rheinland-Pfalz



4 Verklaustrer Durchflussquerschnitt mit Umspülung des südlichen Widerlagers
© Becker Ingenieure GmbH

2 Bauwerkszustand

2.1 Bewertung vor Ort

Durch die Flut hatte sich das mitgerissene Treibgut teils meterhoch vor der Brücke aufgetürmt und den Durchflussquerschnitt verringert. Das Wasser suchte sich daher über das südliche Widerlager mit der angrenzenden Gehwegunterführung seinen Weg. Die hohe Fließgeschwindigkeit mündete in einer Unterspülung der flachgegründeten Konstruktion. Das Widerlager samt Unterführung verkippte sich und wurde ≤ 6 m tief eingespült. Das Randfeld der Brücke hing damit an seinem südlichen Auflager vollständig frei und hatte sich deutlich sichtbar um mehrere Zentimeter nach unten verformt.

Der Bauwerkszustand vor Ort wurde, soweit zugänglich, durch eine handnahe Prüfung begutachtet. Die Untersuchungen vor Ort und die Koordinierung der Projektbeteiligten hat die Becker Ingenieure GmbH durchgeführt. Aus Sicht des Landesbetriebs Mobilität Rheinland-Pfalz wurde der Bauwerkszustand als irreparabel angesehen und das Bauwerk hätte durch einen Neubau ersetzt werden sollen.

Auf Vorschlag des Technischen Hilfswerks und der Becker Ingenieure GmbH stimmte der Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz der Ertüchtigung zu einer provisorischen Ahrquerung zu. Dank dem ortsansässigen Büro mit gut ausgebautem Netzwerk und vertrauensvollen Beziehungen zu den Entscheidungsträgern der regionalen Bauverwaltung konnten die notwendigen Maßnahmen initiiert werden.



5 Havariierter Zustand des Überbaus
© Becker Ingenieure GmbH

Die aufgetretenen Verformungen wurden mittels Verformungsmessung aufgenommen. Größere Schäden in Form einer ausgeprägten Rissbildung an der tragenden Konstruktion des Brückenüberbaus wurden nicht festgestellt. Ein sichtbarer Riss mit einer Rissbreite von $> 0,30$ mm zeigte sich etwa auf Höhe der abgestuften Spanngliedbewehrung. Das Rissbild entsprach damit dem Kraftverlauf aus der Berechnung. Nach dem späteren Anheben des Randfelds hat sich der Riss geschlossen und war nicht mehr wahrnehmbar.

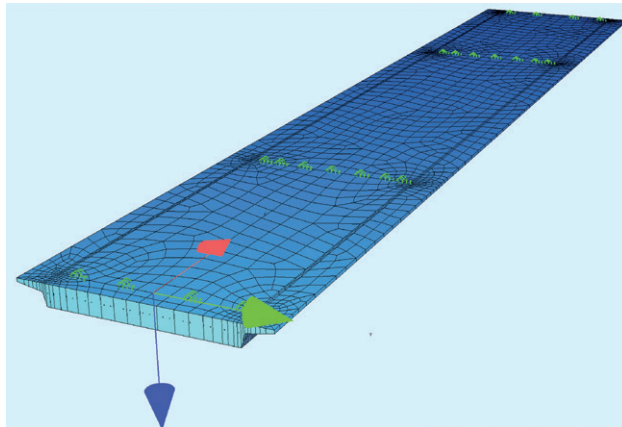
2.2 Rechnerische Beurteilung

Neben der Zustandsbeurteilung vor Ort galt es, den havarierten Zustand rechnerisch zu bewerten und nachzuweisen, damit die Einsatzmannschaften das Bauwerk sicher betreten können. Zusätzlich wurde untersucht, ob der Bauwerkszustand ein Anheben in den ursprünglichen Lagerungszustand ermöglicht und sich die Brücke im Anschluss wieder in Gebrauch nehmen lässt.

Mit einer Nachrechnung sollte der Zustand der tragenden Struktur infolge des eingetretenen Schadens bewertet werden. Dabei wurden die Beanspruchungen für das havarierte System mit auskragendem Randfeld ermittelt und der Spannungszustand auf Querschnittsebene berechnet.

Für die rechnerische Beurteilung wurde das Tragverhalten des Überbaus mittels finiter Elemente als räumliches Flächen-tragwerk eingegeben. Die Überbauelemente und die Lager wurden dabei in unterschiedliche Gruppen eingeteilt, um die eingprägten Zustände, die sich aus dem Entfall der Lagerung und dem späteren Anhub und Einbau der Lager ergaben, bewerten zu können.

Gegenüber dem Bestandssystem ergab sich durch das auskragende Randfeld ein geänderter Schnittgrößenverlauf in Überbaulängsrichtung. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die Bereiche mit einem negativen Momentenverlauf über eine größere Überbaulänge ausdehnen und in Abschnitten auftreten, bei denen im Bestandssystem positive Biegemomente vorhanden sind. Zudem vergrößert sich unter den äußeren Lasten das Stützmoment in der Pfeilerachse deutlich. Die Auswirkungen sind exemplarisch für das Konstruktionseigengewicht in der nachfolgenden Grafik dargestellt.



6 Räumliches Flächentragwerk als Berechnungsmodell
© Zilch + Müller Ingenieure GmbH

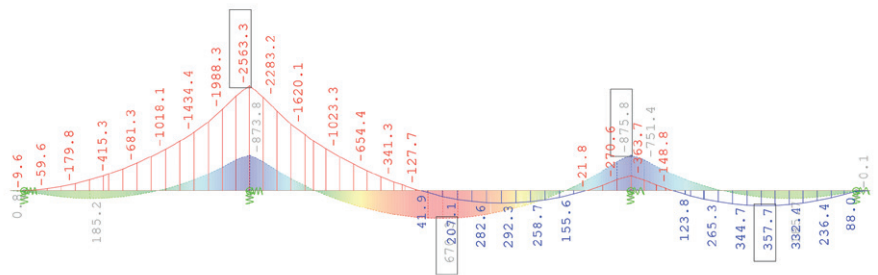
Neben den äußeren Lasten führt der Systemwechsel durch das fehlende Auflager zu einer Änderung des eingepprägten Zustands aus der Vorspannung. So baut sich die statisch unbestimmte Schnittgröße erst ab der Pfeilerachse auf. Dadurch fehlt auf Höhe der Pfeilerachse das positive Biegemoment des statisch unbestimmten Vorspannteils, der das Stützmoment in der Pfeilerachse aus äußeren Lasten entlastet.

Ein weiterer Effekt ergibt sich für die Berechnung der Querschnittstragfähigkeit. Für die Bemessung vorgespannter Querschnitte für Biegung und Längskraft wird die Vordehnung des Spannstahls bei der Ermittlung des Dehnungszustand am Gesamtquerschnitt auf der Bauteilwiderstandsseite berücksichtigt. Die Dehnungsverteilung über den Querschnitt hängt von der Lage des Spannstahls und den Materialfestigkeiten ab. Aus den resultierenden Zug- und Druckkräften der Dehnungsverteilung im Gleichgewichtszustand ergeben sich die widerstehenden Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit. In den Bereichen, in denen sich gegenüber dem Bestandssystem negative Bemessungsmomente einstellen, liegt die Spanngliedlage nicht mehr auf der Querschnittsseite, die zum größten inneren Hebelarm führt. Dadurch reduziert sich für den Grenzzustand der Tragfähigkeit der Querschnittswiderstand zum Teil maßgeblich.

Unter diesen Randbedingungen wurde die Tragfähigkeit des havarierten Zustands unter Ansatz eines außergewöhnlichen Ereignisses beurteilt. Auf der einwirkenden Seite wurden die ständigen Lasten auf charakteristischem Niveau angesetzt. Die Nachweise wurden an diskreten Schnitten in den Zehntelpunkten der Überbaulängsrichtung geführt.

Die Bemessungsergebnisse am Gesamtquerschnitt zeigten, dass sich die relative Tragfähigkeit (R_d/E_d) unter Ansatz jener außergewöhnlichen Kombination nachweisen lässt. Der maßgebende Nachweisschnitt hat sich dabei auf Höhe der innenliegenden Festanker (Schnitt 105) ergeben. Wegen des geringen inneren Hebelarms der unten liegenden Spanngliedbewehrung konnte durch die obere

Bewehrungszulage in diesem Bemessungsschnitt ein größerer Teil des einwirkenden Bemessungsmoments aufgenommen werden. Für den havarierten Zustand wurde damit ein stabiles Gleichgewicht nachgewiesen, so dass von einem unmittelbaren Einsturz des Bauwerks nicht auszugehen war. Die Arbeiten vor Ort konnten beginnen.



7 Verlauf des Biegemoments für das Konstruktionseigengewicht: Bestandssystem (flächige Farbfüllung) und havariertes System mit fehlendem Auflager in der Widerlagerachse (schraffierte Füllung)
© Zilch + Müller Ingenieure GmbH

	Schnitt	104	105	106	107	108	110	112	115
$M_{Ed,acci}$	[kNm]	-4.079	-6.708	-10.256	-13.623	-17.460	-27.048	-11.150	1.675
$\epsilon_{s,o}$	[‰]	1,41	5,78	4,40	2,67	0,99	1,60	1,00	0,25
$\epsilon_{Vt=\infty}$	[‰]	3,00	3,60	3,82	4,06	3,61	4,43	3,32	2,77
$\epsilon_{s,u}$	[‰]	-0,56	-1,35	-1,26	-1,02	-0,76	-1,50	-0,70	-0,40
R_d/E_d (acci)	[-]	1,30	1,07	1,12	1,26	1,55	1,30	1,53	22,3

8 Bemessungsergebnisse am Gesamtquerschnitt
© Zilch + Müller Ingenieure GmbH

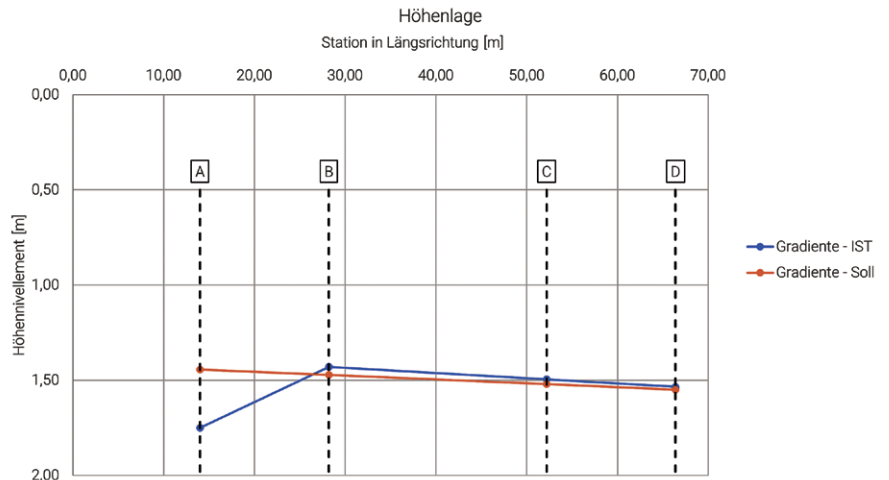
	Schnitt	104	105	106	107	108	110	112	115
$M_{Ed,acci}$	[kNm]	-4.079	-6.708	-10.256	-13.623	-17.460	-27.048	-11.150	1.675
$\sigma_{s,o}$	[N/mm ²]	310	420	420	420	215	346	222	54
$\sigma_{Vt=\infty}$	[N/mm ²]	611	732	777	826	735	900	675	564
$\sigma_{s,u}$	[N/mm ²]	-129	-316	-295	-238	-177	-338	-162	-84

9 Spannungszustände im Querschnitt
© Zilch + Müller Ingenieure GmbH

Messpunkte Nivellement				
	A	B	C	D
Station [m]	14,0	28,2	52,2	66,4
Höhe-IST [m]	1,750	1,430	1,495	1,535

10 Ergebnisse des Nivellements
© Becker Ingenieure GmbH

Neben dem Nachweis einer ausreichenden Querschnittstragfähigkeit sollte anhand des Spannungszustands im Querschnitt beurteilt werden, ob das Bauwerk nach der Instandsetzung die Einwirkungen aus dem eingestuftem Verkehrslastmodell der Brücke aufzunehmen vermag. Als Bewertungskriterium wurde dabei der Dehnungszustand von Beton- und Spannstahl herangezogen. Dabei wurde geprüft, ob der Stahl die Streck- bzw. Dehngrenze rechnerisch überschritten hat und ins Fließen gekommen ist. Für den Zustand mit frei auskragendem Randfeld hat sich im Ergebnis gezeigt, dass die maximalen Dehnungen für den Betonstahl bei 5,80 ‰ lagen. Damit hat der Stahl rechnerisch seine Streckgrenze erreicht, lag aber noch deutlich unterhalb der Bruchdehnung. Für den Spannstahl ergaben sich die maximalen Dehnungen zu 4,00 ‰, so dass er sich noch im elastischen Bereich befand. Aufgrund der parabelförmig verlaufenden Spanngliedgeometrie und der abgestuften Längsbewehrung haben sich dabei die maßgebenden Nachweisschnitte nicht an der Stelle des größten Biegemoments gezeigt, sondern, ausgehend von der Pfeilerachse, zwischen dem Viertelpunkt und der halben Spannweite des Randfelds. Für den Spannstahl und große Teile des Bewehrungsstahls kann damit ein elastisches Verhalten beim Anheben in die ursprüngliche Lage unterstellt werden. Spätere Einflüsse auf die Trag- und Gebrauchstauglichkeit sowie die Ermüdungsfestigkeit sind nicht zu erwarten. Nachdem der Überbau wieder angehoben und das Widerlager erneuert worden waren, wurde das ursprüngliche Lagerungssystem reaktiviert. Das statische System entspricht damit dem planmäßigen Endzustand vor der Flutkatastrophe. Da die Bemessungsergebnisse am auskragenden System zeigten, dass der Betonstahl bereichsweise ins Fließen gekommen ist, wurde die Tragfähigkeit lediglich unter Ansatz des Spannkraftzuwachses unter der ständigen und vorübergehenden Einwirkungskombination nachgewiesen. In Hinblick auf die Standicherheit war eine provisorische Nutzung des Bauwerks mit dem eingestuftem Lastbild der Brückenklasse 60 möglich.



11 Überbauverformungen in den Lagerachsen
© Becker Ingenieure GmbH

3 Wiederherstellung des Tragwerks

Für die Aufräumarbeiten und die Versorgung der Anwohner auf schnellstem Weg war es erforderlich, dass die Standicherheit und die Schäden an der Verkehrsinfrastruktur beurteilt werden und sie provisorisch wieder aufgebaut wird. Becker Ingenieure GmbH als ortsansässiges Ingenieurbüro betreute diese Arbeiten und koordinierte die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Stellen der Stadt, des Landesbetriebs Mobilität Rheinland-Pfalz und des Technischen Hilfswerks.

Eine besondere Herausforderung stellte dabei die täglich wechselnde Lage der Zuständigkeiten im Bereich der Infrastruktur dar. Um schnelle fachliche Entscheidungen und Absprachen treffen zu können, war ein enger Austausch erforderlich. Eine weitere Herausforderung bestand darin, flexibel handelnde Bauunternehmen zu finden, die in der Lage waren, die Planungen ohne Vorbereitungszeit umzusetzen.



12 Bauwerkszustand nach dem Anheben
© Becker Ingenieure GmbH

Die besonderen Herausforderungen bei der Wiederherstellung waren vielfältig. Neben den Randbedingungen eines Katastrophengebiets in Hinblick auf Materialverfügbarkeit, Transportwege und Zugänglichkeit waren einfache und kurze Entscheidungswege von großer Bedeutung. In diesem Zusammenhang wurde deutlich, dass mittelständische Unternehmen aufgrund ihrer Agilität und Flexibilität besonders geeignet sind, um schnell und effektiv Entscheidungen zu treffen.

Die Wiederherstellung erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt ging es darum, das Randfeld wieder in seine ursprüngliche Lage anzuheben, um anschließend ein neues Widerlager zur Auflagerung zu errichten. Im Vorfeld wurde die vorhandene Längsgradienten in der Brückenachse mittels Nivellements aufgenommen und der planmäßigen Gradienten von 0,20 % gegenübergestellt. Dabei wurden die Messpunkte jeweils in die Auflagerachsen und in den Streckenbereich gelegt. Aus den Messungen hat sich ein Durchhang des Randfelds von ca. 32 cm ergeben. Zusätzlich hat sich gezeigt, dass nur im Randfeld eine Abweichung zur Bestandsgradienten vorhanden ist. Größere Pfeilerstellungen, die sich aufgrund der höheren Auflagerlast infolge ständiger Einwirkungen hätten einstellen können, haben sich messtechnisch nicht gezeigt. Daher war es ausreichend, das Randfeld wieder in seine ursprüngliche Lage anzuheben.

Für das Anheben des Überbaus wurden vier Stahlstützen mit Stellingpressen auf Hilfsfundamenten aufgestellt. Der Überbau wurde auf die vorher berechneten Auflagerkräfte kraftgesteuert um ca. 20 cm angehoben und die Höhenlage messtechnisch überwacht. Die Pressenkonstruktion wurde von der Firma Other zur Verfügung gestellt, der Einbau vor Ort von der Firma Meurer durchgeführt. Das provisorische Widerlager wurde als Stahlbetonbalken in Fertigteilbauweise errichtet und auf Ortbetonfundamenten gegründet. Das Lagerungskonzept des Überbaus mit den Verformungslagern in der südlichen Widerlagerachse entsprach dem Bestandszustand. Nach der Herstellung der Fußgängerquerungen und der seitlichen Stützwände sowie der Ausführung der Erdarbeiten konnte die Brücke gemäß der eingestuften Brückenklasse wieder für den Verkehr freigegeben werden.

4 Fazit

Das Hochwasser an der Ahr hat neben dem menschlichen Leid auch gezeigt, mit welcher Wucht und Vernichtungskraft die Infrastruktur einer ganzen Region innerhalb kürzester Zeit zerstört werden kann. In solchen Katastrophenfällen sind schnelle Entscheidungen auf kurzem Weg von entscheidender Bedeutung, um die notwendigen Einrichtungen so rasch wie möglich wieder funktionsfähig zu machen.

Innerhalb von nur zwei Monaten konnte das schwer beschädigte Brückenbauwerk über die Ahr im Zuge der L 83 als erste Brücke in der Region gemäß ihrer ursprünglichen Brückenklasse wieder für den Verkehr freigegeben werden. Dank der Erfahrungen bei der Bewertung beschädigter Brückenbauwerke, der Anwendung moderner Berechnungsmethoden und vor allem des unermüdlischen Einsatzes aller Projektbeteiligten ließ sich das Bauwerk für die provisorische Nutzung wiederherstellen.



13 Überbaulagerung auf neuem Widerlager
© Becker Ingenieure GmbH



14 Fußgängerquerung nach Fertigstellung
© Becker Ingenieure GmbH

Für die schnelle und aussagekräftige Beurteilung des Bauwerkszustands war es essenziell, dass die erforderlichen Bestandsunterlagen vollständig und in einem lesbaren Zustand im Archiv des Baulastträgers vorhanden waren. Der digitale Bauwerksbestand ermöglichte es hier, die benötigten Unterlagen kurzfristig und ortsunabhängig den beurteilenden Ingenieuren zur Verfügung zu stellen. Dank einer robust konstruierten Tragstruktur konnten die Nachweise einer ausreichenden Tragfähigkeit für den havarierten Zustand geführt werden. Im Vergleich zum Abriss des Bauwerks und einer späteren Neuerrichtung hat der schnelle Wiederaufbau der Brücke nicht nur eine infrastrukturelle Bedeutung für den Ort, sondern auch eine symbolische Leuchtturm-Wirkung für die durch Naturgewalten zerstörte Region. Der rasche und unbürokratische Einsatz aller Beteiligten und Entscheidungsträger beim provisorischen Wiederaufbau der Brücke Ko 360 war auf seine Art einzigartig. Er zeigt, dass zu unserem Berufsstand mehr gehört als nur die Anwendung von Normen und Richtlinien. Vielmehr ist intuitives Wissen über Technik und Strukturen gefragt, um reaktionsschnell pragmatische Lösungen für außergewöhnliche Situationen zu entwickeln. Durch die überregionale Vernetzung und das vertrauensvolle Miteinander wurden gemeinschaftliche Interessen in den Vordergrund gerückt und die Prozesse des Wiederaufbaus beschleunigt. Das Projekt erhielt beim Bayerischen Ingenieurpreis 2023 als eines von sechs Finalisten eine Anerkennung.

Autoren:

Dr.-Ing. Markus Hennecke
Dipl.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. Marco Heinze
 Zilch + Müller Ingenieure GmbH,
 München
Dipl.-Ing. Thomas Becker
 Becker Ingenieure GmbH,
 Graftschaf

Baulastträger

Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz

Nachrechnung

Zilch + Müller Ingenieure GmbH, München

Ausführungsplanung und Gesamtkoordination

Becker Ingenieure GmbH, Graftschaf

Ausführung

Martin Meurer GmbH & Co. KG, Koborn-Gondorf
 Other Montagen, München