



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau www.dbbs.tu-dresden.de



26. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

**PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN**

14./15. MÄRZ 2016



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

Tagungsband

26. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau
Freunde des Bauingenieurwesens e.V.

14. und 15. März 2016

© 2016 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen.

Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Technische Universität Dresden
Institut für Massivbau
01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer, Angela Heller

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Fußgängerbrücke Schierstein. Foto: Cengiz Dicleli

Druck: addprint AG, Am Spitzberg 8a, 01728 Bannewitz / Possendorf

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-467-7

Inhalt

| | |
|---|------------|
| Herzlich willkommen zum 26. Dresdner Brückenbausymposium | 13 |
| <i>Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen</i> | |
| Außer Konkurrenz | 15 |
| <i>Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i> | |
| Realisierungswettbewerb zum Ersatzneubau der Eisenbahnüberführungen über die Oder und die Odervorflut bei Küstrin-Kietz | 23 |
| <i>Auszug aus der Broschüre der DB Netz AG 2016, Redaktion: Dipl.-Ing. Hartmut Schreiter</i> | |
| Zur Gestaltung von Brücken der Bundesfernstraßen – Die Suche nach der besten Lösung ... | 37 |
| <i>Dr.-Ing. Gero Marzahn, Dr.-Ing. Heinz-Hubert Benning</i> | |
| Search for the true structural solution | 47 |
| <i>Prof. Jiri Strasky, DSc.</i> | |
| Der Ersatzneubau der Lahntalbrücke Limburg | 67 |
| <i>Dipl.-Ing. Annett Nusch, Dr.-Ing. Stefan Franz</i> | |
| Wirtschaftliche Selbstkletterschalung für Europas aktuell größtes Brückenbauprojekt „Hochmoselbrücke | 85 |
| <i>Dipl.-Ing. Sebastian Riegel</i> | |
| Verstärkung von Brücken mit externer Vorspannung – Einsatzbereiche und Randbedingungen | 103 |
| <i>Dipl.-Ing. Michael Buschlinger, Dipl.-Ing., MBA Annette Jarosch</i> | |
| Ulrich Finsterwalder (1897–1988) – Doyen des Brückenbaus | 119 |
| <i>Prof. Cengiz Dicleli</i> | |
| Gestaltungskonzept für die Brückenbauwerke im Zuge der BAB A 3 zwischen AK Biebelried und AK Fürth/Erlangen | 153 |
| <i>LBD Dipl.-Ing. Bernd Endres, Dipl.-Ing. Rolf Jung</i> | |
| Reparatur der Autobahnbrücke über die Süderelbbrücke nach schwerem Schiffsanprall – Nachrechnung, Planung, Ausführung, Analyse | 165 |
| <i>Dipl.-Ing. Dirk Seipelt, Dipl.-Ing. Stefan Eschweiler, Dipl.-Ing. Thomas Neysters, Brinja Coors M.Sc., Dipl.-Ing. Martin Grassl</i> | |
| Langzeitverhalten von geokunststoffbewehrten Stützkonstruktionen – zukünftig eine Standardbauweise auch für Brückenwiderlager? | 177 |
| <i>Dipl.-Ing. Hartmut Hangen, M.Sc. July Ellen Jaramillo Castro</i> | |
| Die Herausforderungen und Möglichkeiten einer umfassenden Grundlagenanalyse am Beispiel des Hovenringes in Eindhoven (NL) | 193 |
| <i>Dipl.-Ing. Adriaan Kok, Dipl.-Des. Marion Kresken</i> | |
| Die Butterfly-Bridge in Kopenhagen | 211 |
| <i>Dr.-Ing. Karl Morgen, Dipl.-Ing. Jan Lüdders</i> | |
| Militärischer Einfluss auf Konstruktion und Architektur von Eisenbahnbrücken im Deutschen Reich | 221 |
| <i>Volker Mende M.A.</i> | |

| | |
|---|------------|
| Verstärken mit Carbonbeton im Brückenbau | 235 |
| <i>Dr.-Ing. Harald Michler</i> | |
| Zur Anwendung von Szenario-Spektren beim seismischen Nachweis von Brücken | 249 |
| <i>Dr.-Ing. habil. Dirk Proske</i> | |
| Brücken bauen mit Eisenbeton – Gedanken zum denkmalgerechten Umgang | 263 |
| <i>Dipl.-Ing. Oliver Steinbock</i> | |
| Brückenbauexkursion 2015 – Infrastrukturprojekte in Tschechien, Österreich und Deutschland | 273 |
| <i>Dipl.-Ing. Sebastian Wilhelm, Dipl.-Ing. Robert Zobel</i> | |
| Chronik des Brückenbaus | 283 |
| <i>Zusammenstellung: Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner</i> | |
| Inserentenverzeichnis | 311 |

Im gedruckten Tagungsband stand hier eine Anzeige. Sie wurde für die Online-Fassung entfernt.

Wirtschaftliche Selbstkletterschalung für Europas aktuell größtes Brückenbauprojekt „Hochmoselbrücke“

Dipl.-Ing. Sebastian Riegel

Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen

1 Bauwerksgeometrie

1.1 Lage und Zweck

Die 1.702,4 m lange Hochmoselbrücke in Rheinland-Pfalz ist Deutschlands derzeit größtes und gleichzeitig anspruchsvollstes Brückenbauprojekt (Bild 1). In bis zu 158 m Höhe quert sie das tief eingeschnittene Moseltal zwischen Ürzig und Zeltingen-Rachtig und verbindet die Eifel mit dem Hunsrück. Das Brückenbauprojekt gehört zur Bundesstraße 50neu und ist Teil einer internationalen Straßenachse zwischen den Beneluxstaaten und dem Rhein-Main-Gebiet. Die insgesamt 25 km lange B 50neu hat die Aufgabe, die Fernstraßenlücke von der A 60 bei Wittlich zur A 61 bei Mainz zu schließen und damit auch die südliche Eifel besser an das Rhein-Main-Gebiet und den Flughafen Frankfurt-Hahn anzubinden.

Das Bauwerk wird durch eine ARGE aus Eiffel Deutschland Stahltechnologie GmbH, Eiffage

Construction Metallique (beide Teil der Eiffage-Gruppe) und PORR Deutschland GmbH errichtet. Innerhalb dieser ARGE sind Eiffel und Eiffage für den gesamten Stahlbauteil verantwortlich und PORR Deutschland stellt alle Stahlbetonbauteile her, das heißt insbesondere die Widerlager und Pfeiler.

1.2 Generelle Konstruktion

Die Brücke ist als Balkenbrücke mit einem Stahlhohlkastenüberbau und einer 29 m breiten orthotropen Fahrbahnplatte ausgeführt. Der Überbau ist in Längsrichtung als Durchlaufträger mit elf Feldern ausgebildet (Stützweiten von 104,8 m, 131,0 m, 157,1 m, 209,5 m, 196,4 m, 183,3 m, 170,2 m, 157,1 m, 144,1 m, 131,0 m und 117,9 m). Der Überbau hat in Längsrichtung ein Gefälle von ca. 0,5 %, wobei das westliche Widerlager (NN +258,06 m) um ca. 8,45 m tiefer als das östliche Widerlager (NN +266,51 m) liegt [1].



Bild 1: Animation der fertigen Brücke, Blick von Süden (©LBM: Landesbetrieb Mobilität Trier, Rheinland-Pfalz)

1.2.1 Überbau

Die Bauhöhe des Überbaus variiert zwischen maximal 7,55 m und minimal 4,8 m am östlichen Widerlager. Die einzelnen Teile des Überbaus werden in den Werken von Eiffel in Hannover und Eiffage in Lauterbourg (Frankreich) vormontiert und per Schwertransport zur Baustelle transportiert.

Der Einbau des Überbaus erfolgt im Taktschiebverfahren unter Einsatz eines Hilfspylons (Bild 2). Beim Einbau des Überbaus gibt es zwei Besonderheiten:

- ❑ Im Westen schließt sich im Verlauf der Trasse ein Tunnel unmittelbar an das Widerlager an, womit hier kein Platz für die Montage des Überbaus vorhanden ist. Aus diesem Grund muss der Überbau hinter dem höheren Widerlager montiert und abfallend verschoben werden. Um ein unbeabsichtigtes Abrutschen des Überbaus beim Verschieb zu verhindern, wird dieser während des Verschiebens zusätzlich mit Spannritzen rückwärtig gesichert.
- ❑ Um die Biegung in den Pfeilern beim Verschieb des Überbaus zu vermeiden, wird auf jedem Pfeiler ein zusätzlicher Verschiebbalken ange-



Bild 2: Überbau mit Hilfspylon, Stand Juni 2015
(© LBM: Landesbetrieb Mobilität Trier, Rheinland-Pfalz)



Bild 3: Verschiebbalken auf Pfeiler Achse 09
(©LBM: Landesbetrieb Mobilität Trier, Rheinland-Pfalz)



Bild 4: Blick auf die Baustelle vom linken Moselufer, Stand November 2015 (© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

ordnet (Bild 3), der mit der Hauptverschiebeinheit am Widerlager Ost synchron arbeitet. Damit werden während des Verschiebens der Pfeilerkopf an Ort und Stelle gehalten und die Biegung im Pfeiler auf Grund der Reibung zwischen Pfeilerkopf und Überbau minimiert. Durch diese Maßnahme konnte die Bewehrung der Pfeiler deutlich reduziert werden.

1.2.2 Pfeiler

Der Überbau ruht auf insgesamt zehn Pfeilern mit Höhen zwischen 20,8 m und 150,7 m sowie zwei Widerlagern (Bild 4). Von den zehn Pfeilern stehen sieben auf der Seite zum Hunsrück (Ostseite bzw. rechtes Moselufer) und drei auf der Seite zur Eifel (Westseite bzw. links der Mosel). Die Pfeiler wurden als Hohl Pfeiler ausgeführt, die Wandstärken variierten entsprechend der Belastung – auch innerhalb eines Pfeilers. Die beiden kleinsten Pfeiler (Achse 1 und 10) wurden mit Zwischenpodesten ausgeführt, alle anderen Pfeiler haben nur ein Podest direkt unter dem Kopf. Zur Inspektion sind diese Pfeiler mit einer Hubbühne befahrbar.

Alle Pfeiler weisen – vom Kopf beginnend – die gleiche Form auf. Um die Pfeiler möglichst schlank erscheinen zu lassen, wurden diese quer zur Brückenachse tailliert ausgeführt (Übersicht s. Bild 5). In der Ansicht parallel zur Brückenachse – im Folgenden ‚Längsseite der Pfeiler‘ genannt – folgen die Kanten der Flächen bzw. die Seitenflächen einer hyperbolischen Formel. Die Taille des Pfeilers liegt dabei immer genau 47,5 m unterhalb des Pfeilerkopfes. Die Formel und das Koordinatensystem, nach der sich der Verlauf der Kante berechnet, sind in Bild 6 dargestellt. Die Kanten der Seitenflächen in der Ansicht quer zur Brückenachse – im Folgenden ‚Schmalseite der Pfeiler‘ genannt – haben einen linearen Anzug von 80:1.

Die Wandstärken variieren bei den höchsten Pfeilern (Achsen 3–6) zwischen 60 cm am oberen

und unteren Ende sowie 55 cm in der Mitte. Im Pfeiler Achse 7 variiert die Wandstärke zwischen 60 cm an den Enden und 40 cm in der Mitte. Die Pfeiler in den Achsen 2 und 8 weisen Wandstärken zwischen 50 cm oben bzw. unten sowie 30 cm in der Mitte auf. Der Pfeiler Achse 9 hat eine Wandstärke von konstant 40 cm, die Pfeiler in den Achsen 1 und 10 konstant 30 cm. Die Veränderung der Wandstärken erfolgt dabei mehr oder weniger kontinuierlich – je nach statisch erforderlichem Betonquerschnitt.

Die Größe des Innenraums variiert dabei entsprechend stark. Parallel zur Brückennachse verjüngt sich der Innenraum von 6,32 m (OK Anfänger Achse 04) bis auf nur 2,83 m unter der Zwischendecke (Pfeiler Achsen 3–6) – jedoch nicht linear, da sich die Wandstärke ebenfalls wie oben beschrieben ändert. Quer zur Brückennachse folgt die Größe des Innenraums der Entwicklung der Außenkante – aber auch nur ungefähr, da die Veränderung der Wandstärken hier ebenfalls eine Rolle spielt. In der Achse 4 verändert sich die Breite des Innenraums von 14,46 m an der Oberkante des Anfängertakts über 8,40 m in Höhe der Taille bis zu 11,40 m an der Unterkante der Zwischendecke.

Bis auf die Pfeiler Achse 1 (Bild 7) und Achse 10 werden alle Pfeiler in 5 m hohen Betonierabschnitten hergestellt. Die Einteilung erfolgt vom Kopf abwärts, wobei der oberste Schuss nur 4,9 m hoch war. Diese Abweichung von der Regelhöhe erleichterte den Einbau der Zwischendecke, da der vorletzte Takt bis zur OK dieser Zwischendecke hergestellt werden konnte. Die notwendige Anpassung an die Pfeilerhöhe erfolgte durch die entsprechende Wahl der Höhe des Anfängertakts. Die Pfeiler Achse 1 und Achse 10 wurden in unregelmäßigen Schusshöhen hergestellt, die durch die Positionen der Zwischendecken definiert wurden.

Die Außenseite der Pfeiler wird als Sichtbeton mit einer Brettstruktur

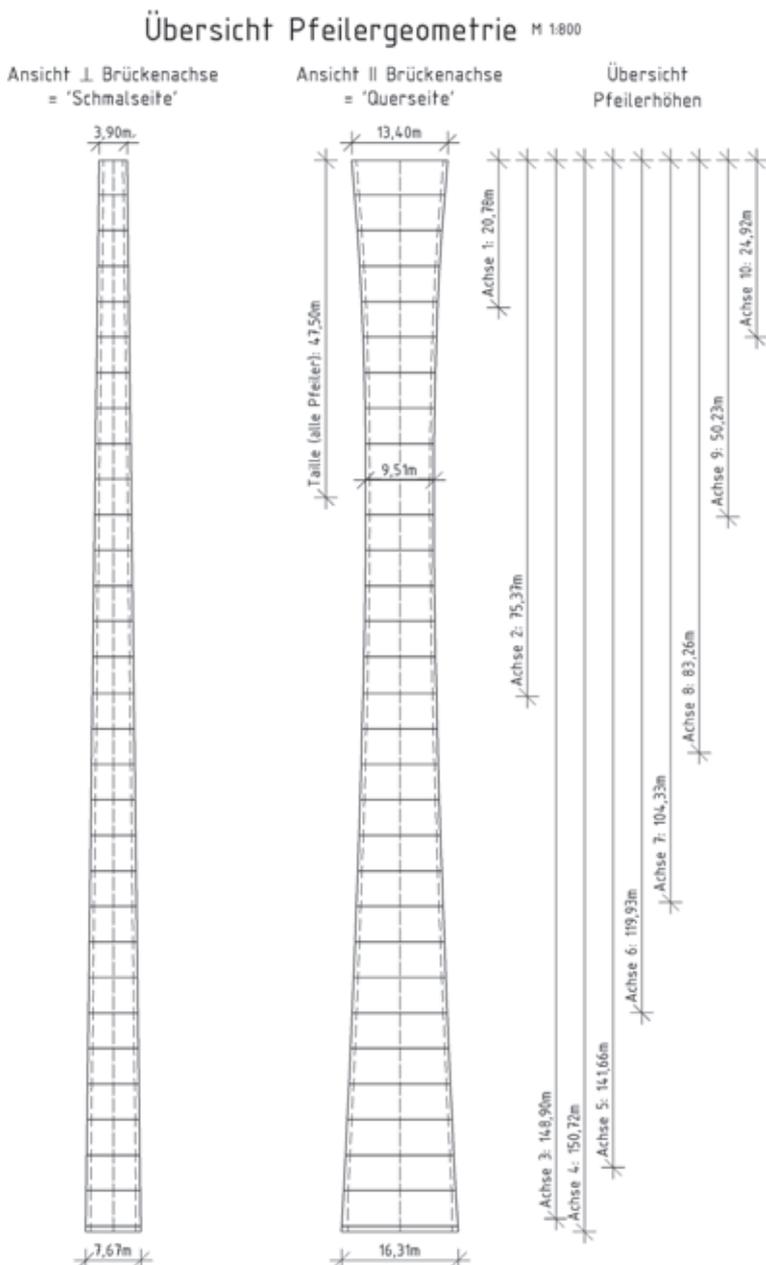


Bild 5 (oben): Übersicht Pfeilergeometrie
 Bild 6 (unten): Formel zur Ableitung der Pfeilerform
 (beide © Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

kubische Parabel min b=9,5m

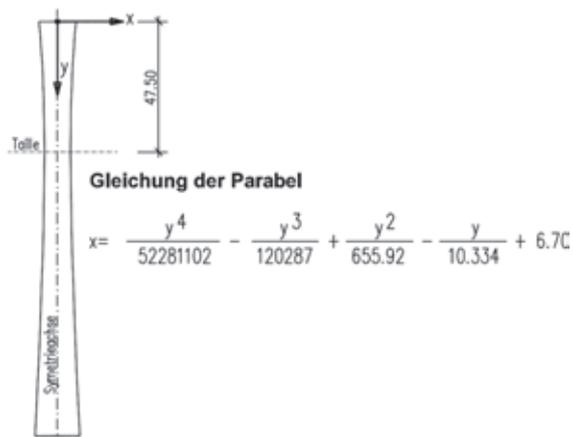




Bild 7: Pfeiler Achse 1 am linken Moselufer, Stand November 2015,

(Foto: © Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)



Bild 8: Oberflächenqualität des Betons
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

ausgeführt (Bild 8), die jedoch nicht saugend sein musste. Für die Innenseiten gab es keine erhöhten Anforderungen an die Oberfläche.

2 Selbstkletterbühnen

Im Folgenden wird nur die Herstellung der Pfeiler Achse 2 bis Achse 8 behandelt, die von Hünnebeck Deutschland konzipiert, geplant und geliefert wurde.

Die Pfeiler Achse 1 und Achse 10 wurden auf Grund der geringen Höhe und unregelmäßiger Betonierhöhen mit Krankletterschalung – ebenfalls von Hünnebeck – hergestellt, wobei die Innenschalung auf den Zwischendecken aufgestellt wurde. Weiterhin wurde durch Hünnebeck auch die Schalung für die Widerlager, Anfänger und Fundamente geliefert.

2.1 Anforderungen an Schalung und Bühnen

Aus der Geometrie der Pfeiler ergibt sich für die Schalung eine Reihe von Anforderungen, denen bei der Planung und Ausführung der Schalung Rechnung getragen werden muss:

- ❑ Die Schmalseite verjüngt sich in jedem Schritt um 12,5 cm ($2 \times 5 \text{ m} / 80 = 12,5 \text{ cm}$), insgesamt um 3,8 m am Pfeiler Achse 4.
- ❑ Die Längsseite verjüngt sich am höchsten Pfeiler (Achse 4) vom Fuß bis zur Taille um 6,8 m und weitet sich dann wieder um 3,9 m auf.

- ❑ Die Abmessungen der Innenräume verändern sich ähnlich wie die Außenabmessungen, jedoch noch stärker, da auch die Unterschiede in den Wanddicken kompensiert werden müssen.
- ❑ Alle Anpassungen müssen kontinuierlich erfolgen, da Absätze in den Oberflächen nicht zulässig waren.
- ❑ Aus der Forderung nach Sichtbetonqualität auf der Außenseite ergibt sich die Notwendigkeit eines geordneten Fugen- und Ankerrasters.

Weiterhin gab es auch Anforderungen durch die bauausführende Firma, die Hünnebeck natürlich berücksichtigt hat – schon um den Auftrag zu erhalten:

- ❑ Die große Höhe der Bauwerke erfordert, dass besonderes Augenmerk auf die Arbeitssicherheit gelegt wird. Auf allen Arbeitsebenen muss der Seitenschutz daher mindestens 2 m hoch sein (Bild 9 und Bild 10). Das gilt auch für die Zeiten von Umbauarbeiten und Montagen.
- ❑ Auf den Arbeitsbühnen muss genug Arbeits- und Stauraum zur Verfügung stehen, um dort

notwendige Werkzeuge, Materialien und Baustelleneinrichtungen lagern zu können – bis hin zur Baustellentoilette.

- ❑ Der notwendige Umbau von Schalung und Kletterbühnen zur Anpassung an die veränderliche Pfeilergeometrie muss in möglichst einfachen Arbeitsschritten erfolgen und sicher durchzuführen sein. ‚Sicher‘ bezieht sich dabei sowohl auf die Arbeitssicherheit während der Umbauten, als auch auf die Prozesssicherheit, d. h. leicht planbare und auszuführende Arbeitsschritte. In Bezug auf die Arbeitssicherheit gilt es insbesondere zu vermeiden, dass Umbauarbeiten ohne Seitenschutz (z. B. am offenen Rand) oder unter enormem Zeitdruck (z. B. während des Kletterprozesses) durchgeführt werden müssen.
- ❑ Im Zuge des Projekts sollen mit der Selbstkletterschalung insgesamt acht Pfeiler mit zwei Schalsätzen hergestellt werden, beginnend mit dem kleinsten Pfeiler in Achse 9 (50,2 m Höhe). Um Kosten für zusätzliche Schalsätze zu sparen verlangte PORR, dass die Schalungen auf allen Pfeilern wiederverwendbar sind. Das schloss eine Anpassung der Schalung durch simples Abschneiden aus.



Bild 9: Pfeiler Achse 6, Stand August 2014
(Foto: Sebastian Riegel)



Bild 10: Kletterschalung am Pfeilerkopf
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

- Die Schalung und die Bühnen müssen von einem Pfeiler auf den nächsten umgesetzt werden. Damit mussten sowohl die Schalung als auch die Bühnen so konstruiert sein, dass sie in möglichst großen Einheiten umgesetzt werden können. Das maximal zulässige Einzelgewicht beträgt 6 t, bedingt durch die maximale Traglast des Krans.

2.2 Systemauswahl und grundsätzlicher Aufbau

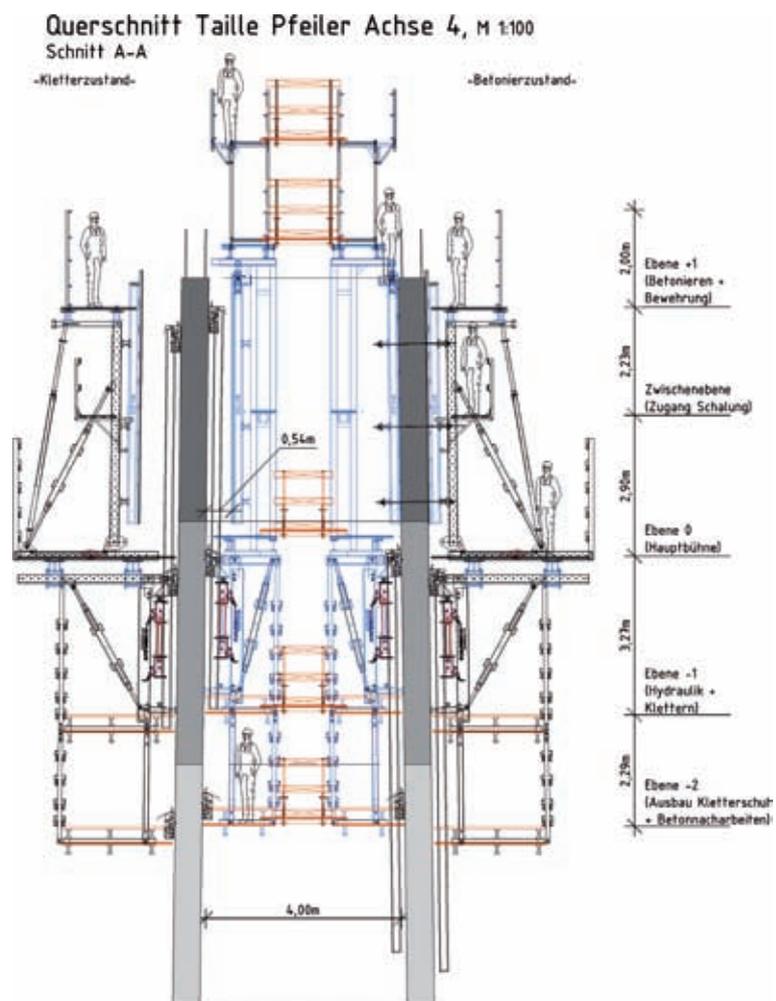
Aus den oben aufgeführten Anforderungen wird relativ schnell deutlich, dass die Kletterbühnen, auf denen die Schalung montiert wird, auf sehr hohe Lasten und eine große Flexibilität ausgelegt sein müssen. Gleichzeitig muss das Konzept so gewählt werden, dass die Umbauten einfach durchzuführen sind und nicht auf dem kritischen Weg im Bauzeitenplan liegen dürfen.

Grundsätzlich bietet sich bei Bauwerken dieser Höhe die Benutzung von klassischen Selbstklettersystemen mit separat arbeitenden Kletterschienen an, denn:

- Diese Systeme haben eine höhere Tragfähigkeit als normale Krankletterbühnen sowie geführte Klettersysteme mit integrierter Kletterschiene.
- Selbstkletterbühnen sind beim Umsetzen von einem in den nächsten Betoniertakt am Bauwerk geführt und können damit auch bei höheren Windgeschwindigkeiten umgesetzt werden.
- Bei Klettersystemen mit separater Schiene wird die Kletterschiene im ersten Kletterschritt lastfrei in den nächsten Kletterschuh geschoben und dort verankert. Im zweiten Schritt klettert die Bühne dann entlang dieser Schiene in den nächsten Verankerungspunkt. Damit eignet sich das System besonders für hohe Lasten sowie bei Änderungen der Kletterrichtung, wie es bei diesen Pfeilern u. a. durch die gekrümmten Seiten notwendig ist.

vor dem Klettern nicht vollständig geräumt werden. Es genügt, alle losen Teile von den Kanten wegzuräumen.

Die Höhe der Schalung wurde mit 5,20 m festgelegt (5 m Takthöhe + 15 cm Überstand oben und 5 cm Überlappung zum vorhergehenden Abschnitt). Die Schalung ist außen mit einer gebürsteten 3S-Dreischichtplatte belegt, die auf der Betonseite versiegelt ist. Diese Platte liefert auf der einen Seite die vom Bauherrn geforderte Brettstruktur und war gleichzeitig haltbar genug für die geforderte Einsatzdauer. Durch besonderes Augenmerk auf eine handwerklich gute Verarbeitung der Platten und den Einsatz metallener Bohrlochverstärkungen konnte die Platte über 60 Einsätze bestehen. Um das zu erreichen, muss bei der Verarbeitung besonders auf die Versiegelung der Schnittkanten und Bohrlöcher geachtet werden, da die Platte sonst an diesen Stellen aufreißt bzw. aufquellen kann. Die Schalung der Innenseite ist mit einer filmbeschichteten Sperrholzplatte belegt, die über das gesamte Projekt nicht ausgetauscht werden soll (ca. 90 Einsätze).



- Da Selbstkletterbühnen am Bauwerk geführt sind, müssen sie

Bild 11: Schnitt durch Kletterschalung parallel zur Brückenachse
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

Bild 11 zeigt einen Schnitt parallel zur Brückenachse durch Bühnen in Höhe der Pfeilertaille in Achse 4. Insgesamt sind die Bühnen mit folgenden Arbeitsebenen ausgestattet:

- ❑ 1 Betonierbühne (für Betonierarbeiten, auf der Innenbühne mit einer zusätzlichen Ebene auch für Bewehrungsarbeiten),
- ❑ 1 Zwischenebene (nur Zugang zur Ankerbedienung),
- ❑ 1 Hauptarbeitsbühne (Schalungsbedienung und Materiallagerung),
- ❑ 2 Nachlaufbühnen (Bedienung der Kletterwerke und Nacharbeiten am Beton).

Ergänzend dazu zeigt Bild 12 drei Schnitte quer zur Brückenachse für den Pfeiler Achse 4, in denen sich die Neigungsänderungen der Schmalseiten sowie die Anpassungen der Innenbühnen erkennen lassen. Die Schnitte zeigen die Bühnen am Pfeilerfuß, an der Taille und am Pfeilerkopf (vorletzter Takt, d. h. direkt vor Ausbau der Innenbühnen).

Die Außenbühnen klettern zuerst und in deren Schutz wird anschließend die Innenbühne geklettert und die Bewehrung eingebaut. Eine Besonderheit stellen der teilweise massive Pfeilerkopf mit dem Innenraum und die Zwischendecke darunter dar. Dazu wurde zuerst der vorletzte Takt des Pfeilers mit einer Abstufung hergestellt, d. h. außen bis Oberkante der Zwischendecke und innen bis Unterkante der Decke (s. Bild 13). Danach wurden Innenschalung und -bühnen ausgebaut, die Decke als Halbfertigteil eingelegt und anschließend fertig betoniert. Die Innenwände des Pfeilerkopfraums und dessen Decke wurden ebenfalls mit Halbfertigteilen hergestellt. Für die Betonage wurden diese mit Schalungsankern gegen die Außenschalung verspannt. Die Herstellung mit Halbfertigteilen ersparte der Baustelle den Ausbau der Schalung durch die kleine Luke im Pfeilerkopf.

Die Kletterbühnen bestehen in der Draufsicht aus sechs Hauptbühnen mit insgesamt 20 SCF-Konsolen. Davon sind jeweils zwei auf den Schmal-

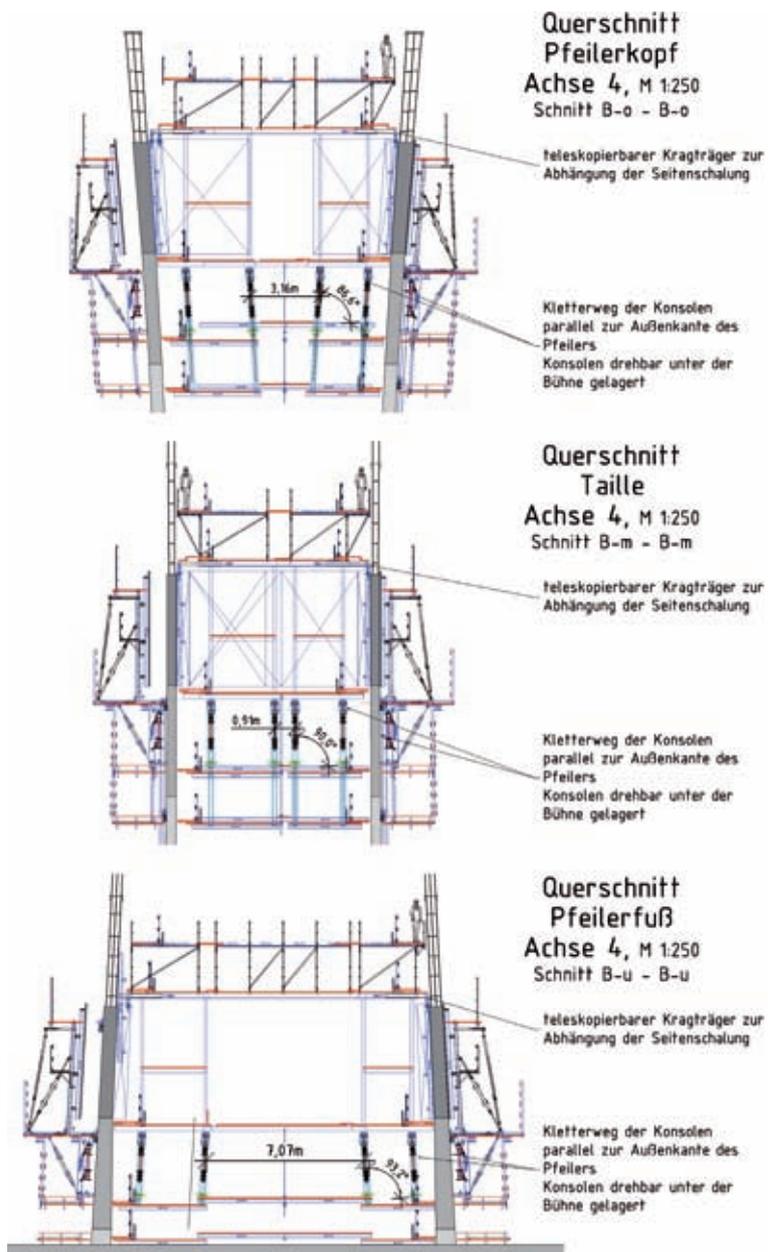


Bild 12: Schnitt B-B quer zur Brückenachse
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

seiten außen, jeweils vier auf beiden Längsseiten außen und jeweils vier auf jeder Längsseite im Innenraum. Die Breite der Außenbühnen ist mit 3,30 m auf der HauptarbeitsEbene deutlich größer als bei vergleichbaren Wettbewerbssystemen und bietet damit deutlich mehr Platz zum Lagern von Ausrüstung und Material. Die Breite der Innenbühne wurde durch die minimale Breite des Innenraums bestimmt, diese beträgt an der Unterkante der Zwischendecke in den Pfeilern Achse 3 bis Achse 6 nur noch 2,83 m.

Bei der Konzeption der Bühnen musste darauf geachtet werden, dass sich die Schalung an allen entscheidenden Stellen weit genug zurückfahren lässt, um einen ausreichenden Zugang zu haben.



Bild 13: Ausbau Innenbühne am Pfeilerkopf
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

Der Zugang ist notwendig für die Reinigung und Wartung der Schalung, den Einbau der Kletterschuhe und -schiene sowie – in diesem speziellen Fall – für den Umbau der Schalung zur Anpassung an Geometrieänderungen. Um den Zugang zur Schalung zu gewährleisten, musste ein Abfahrweg von 75 cm auf den Außenbühnen sowie 50 cm auf den geometrisch beengten Innenbühnen realisiert werden. Die Schalung in den Innenecken wurde als wartungsfreie Stahlschalung ausgeführt, die nicht abgefahren werden muss.



Bild 14: Selbstkletterbühnen im Bereich der Pfeilertaille
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

2.3 Anpassung von Schalung und Bühnen an die Geometrie der Pfeiler

Die Anpassung der Schalung geht meist einher mit der Anpassung der Bühnengeometrie an die Veränderung der Pfeiler (Bild 14). Dabei ist natürlich zu beachten, dass die Schalungen in der Regel von den Bühnen getragen werden müssen und die Standsicherheit dieses Verbundes und die Arbeitssicherheit zu jeder Zeit gewährleistet sein muss – auch während der Umbauten. Die besonderen Herausforderungen für die Planung der Umbauten bei diesem Projekt sind hierbei:

- ❑ dass der Pfeiler mit der Höhe nicht nur kleiner wird (Bild 15), sondern auch wieder breiter. Dadurch müssen Schalungsteile nicht nur entfernt, sondern auch ergänzt werden,
- ❑ dass sich durch die Taillierung der Pfeiler die Neigung der Bauwerkskanten über die Höhe verändert, was besonders in den Eckbereichen zu zusätzlichem Anpassungsbedarf führt,
- ❑ dass die Wandstärken der Pfeiler immer unterschiedlich sind, womit eine zusätzliche Anpassung der Innenschalung notwendig wird,
- ❑ dass PORR die komplette Schalung mehrfach verwenden wollte, womit die Schalung komplett modular aufgebaut sein muss.

Gleichzeitig führt die notwendige Verankerung gegenüberliegender Schalelemente dazu, dass die Außen- und Innenschalungselemente in einer ähnlichen Weise verändert bzw. verschoben werden müssen. Das gilt hier besonders, da Sichtbetonqualität gefordert wurde und damit die Anzahl und Lageveränderung der Ankerlöcher in der Schalung eingeschränkt ist.

Zum Dritten bedingt die Verwendung von Kletterschalungen, dass besonderes Augenmerk auf den exakten Einbau der Kletterkonen gelegt werden muss. Das gilt besonders dafür, dass Kletterkonen, die zur gleichen Bühne gehören, immer die gleiche Höhenlage und den gleichen Abstand haben sollten. Wird das nicht berücksichtigt, kann es zu erheblichen Problemen beim Klettern oder Umhängen der Bühnen kommen. Da unsaubere Montagen von Schalungselementen eine wesentliche Quelle für solche Fehler sind, sollten die Konen für eine Büh-

ne möglichst immer auf dem gleichen Schalelement liegen.

Bei der Konzeption der Schalungsmodule und auch der Umbauten an den Bühnen stand der Aspekt der Prozesssicherheit im Fokus. Um einen gut planbaren, sicheren und zügigen Arbeitsablauf zu erreichen, müssen die einzelnen durchzuführenden Arbeitsschritte möglichst viele der folgenden Kriterien erfüllen:

- ❑ Möglichst einfache und zeitlich überschaubare Arbeitsschritte, die, wenn möglich, auch repetitiv sind,
- ❑ Alle Arbeitsschritte sollten eine gewisse Fehlertoleranz haben, damit kleine Fehler im System aufgefangen werden können und keine bzw. nur minimale Auswirkungen auf den gesamten Bauablauf haben.
- ❑ Wichtige und komplizierte Arbeitsschritte müssen im Vorfeld ausreichend geplant, abgestimmt und dokumentiert werden. Dazu gehörte unter anderem die Erstellung detaillierter Ablaufpläne für die Durchführung der einzelnen Änderungsschritte.
- ❑ Der Einfluss des Wetters auf alle Arbeitsschritte sollte soweit wie möglich begrenzt werden, damit die Arbeiten auch bei schlechten Wetterbedingungen und im Winter ausgeführt werden können.

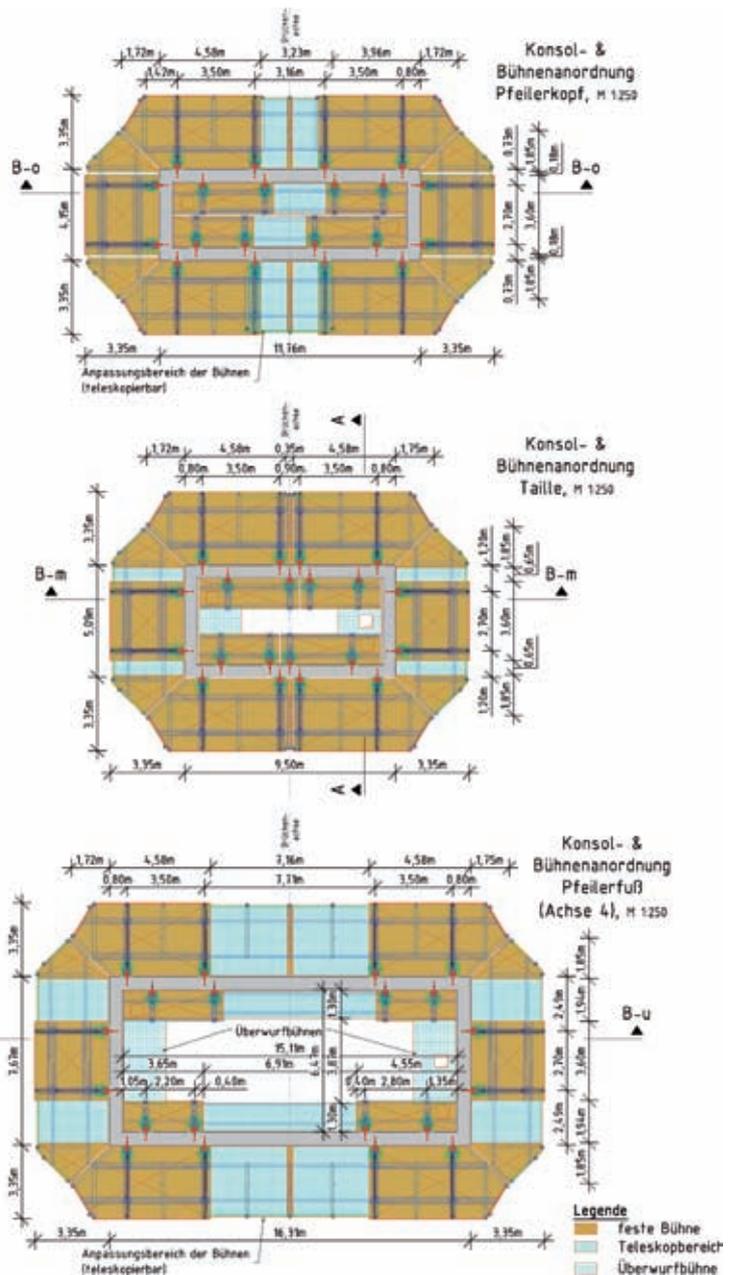


Bild 15: Draufsicht Selbstkletterbühnen
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

In Bezug auf die Arbeitssicherheit sind die folgenden beiden Punkte besonders wichtig:

- ❑ So weit möglich sollten Anpassungsarbeiten nicht am offenen Rand bzw. ohne Seitenschutz stattfinden. Ein bewährtes Konzept dafür ist, Längenanpassungen wenn möglich in der Mitte von Bühnen anzuordnen. Ist eine Anpassung an den Bühnenenden trotzdem notwendig, so sollte am Bühnenrand ein Seitenschutz angeordnet werden, der auf einem Teleskopträger montiert ist und mittels dieses Trägers verschoben werden kann. Für eine Änderung der Bühne wird der Bühnenbelag an der Stelle entfernt oder ergänzt, wobei der Träger im fes-

ten Bühnenteil steckt. Damit entsteht bei Anpassungsarbeiten immer nur ein kleiner Spalt, der mit einer Platte abgedeckt werden kann. Ein zusätzlicher, positiver Effekt dieser Konstruktion ist, dass durchlaufende Teleskopträger statisch günstiger sind als viele kurze, mit Stößen gekoppelte Träger.

- ❑ Im Anpassungsbereich sollte der Seitenschutz immer überlappend ausgeführt werden. Die Überlappung sollte entweder den gesamten Anpassungsbereich überbrücken können oder zumindest so groß sein, dass es möglich ist, im Schutze dieser Überlappung den nächsten Seitenschutz montieren zu können.

2.3.1 Bühnen Schmalseite außen

Die Bühnen auf der Schmalseite sind ein gutes Beispiel für einen Fall, wo eine Anpassung am Rand die günstigste Ausführung ist. Die Seitenfläche verjüngt sich linear (Anzug 80:1) um max. 1,81 m je Seite (29 Schritte à 6,25 cm ab OK Anfängertakt Achse 4) auf 3,90 m am Kopf. Auf einer so kurzen Länge wäre der Einsatz von mehr als zwei Kletterkonsolen unwirtschaftlich. Daher fiel die Wahl auf ein Konzept mit einem zentralen rechteckigen Schalungselement von 3,6 m Breite sowie 2 Seitenstücken mit schrägen, der Neigung der Pfeilerkanten angepassten Kanten. Die Anpassung der Gesamtbreite der Schalseite erfolgt durch Einfügen von Schalungsstreifen von jeweils 6,25 cm Breite zwischen Hauptelement und Seitenstück. Um die Stabilität der Schalung zu gewährleisten und die Anzahl der zu verwendenden Teile zu reduzieren, wurden für größere Anpassungen auch Module mit 25 cm, 50 cm und 100 cm Breite verwendet. Das Bühnenkonzept folgt dabei weitgehend dem Schalungskonzept. Es gibt eine ca. 3,6 m breite Hauptbühne, die beidseitig durch dreieckige Bühnen auf Teleskopträgern ergänzt wird. Die Konsole klettert entlang der Mittellinie der Fläche senkrecht nach oben. Die Längenanpassung erfolgt zwischen Hauptbühne und Teleskopteilen. Die Anpassung an die Neigung der Wandfläche erfolgt über Spindeln, so dass die Arbeitsebene stets waagrecht bleibt. Da die Schalung der Längsseiten über die Schmalseiten übersteht, mussten die einzelnen Module der Schmalseiten sehr genau gefertigt werden.

2.3.2 Längsseite außen

Die Entwicklung eines überzeugenden Konzeptes für die Schalung der Längsseite gestaltete sich auf Grund der Taillierung deutlich schwieriger. Auch für diese Seite wurde zuerst darüber nachgedacht, mit einem zentralen Schalungselement

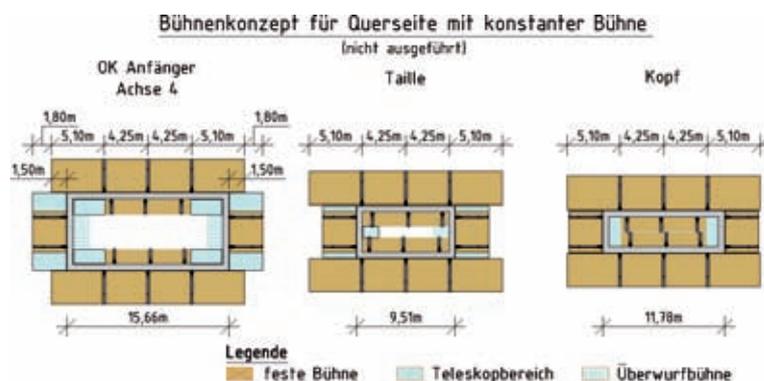


Bild 16: Konzept für Längsseitenschalung mit konstanter Bühne (nicht ausgeführt) (© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

und der zugehörigen Bühne mittig am Pfeiler nach oben zu klettern (Skizze s. Bild 16). Allerdings wären die notwendigen Auskragungen zu den Seiten hin dann so groß, dass die mittlere der drei Konsolen überhaupt keine Last mehr tragen würde. Dadurch wären die beiden äußeren Konsolen trotz der großen Tragfähigkeit des SCF-Systems überlastet. Außerdem würde die Auskragung der Bühne von über 5 m und der Schalung von mehr als 3 m bedeuten, dass diese selbst sehr stark ausgesteift werden müssten, was wiederum zu einer deutlichen Erhöhung der Lasten führen würde.

Um die Auskragungen an den Bühnenenden zu reduzieren, wäre es am besten, die Konsolen soweit außen wie möglich anzuordnen. Durch die Taillierung der Pfeiler bedeutet das aber, dass sich dieser Verankerungspunkt in der Draufsicht in jedem Takt an einer anderen Stelle befindet. Gleichzeitig muss ein gewisser Randabstand für die Verankerung der Konsolen eingehalten werden. Auf der anderen Seite lassen sich die Gewichte von Schalung und Bühnen durch dieses Konzept deutlich verringern. Der statische Nachweis von Konsole und Verankerungspunkt wird dadurch leichter und die für das Klettern notwendige Betonfestigkeit sinkt, womit schneller geklettert werden kann. Auch aus Sicht der Arbeitssicherheit lassen sich eine Menge Probleme mit Arbeiten am offenen Rand beheben, besonders in den Nachlaufbühnen und im Bewehrungsgerüst.

Aus diesem Grund wurde entschieden, auf jeder Seite einen Bühnenteil anzuordnen. Die Länge wurde so gewählt, dass an der Pfeilertaille zwischen den beiden Bühnenteilen nur ein Spalt von 35 cm blieb. Dieser Spalt war aus technischen Gründen notwendig, denn der Abstand der Bühnen am Pfeilerfuß Achse 4 war immerhin 7,16 m! Dadurch sind eine zusätzliche Unterstützung der Schalung in der Mitte sowie zusätzliche Geländerpfosten notwendig, die an der Taille in dem Spalt geparkt werden konnten. Ein Ausbau der Geländerpfosten ist nicht möglich, denn dafür müsste der Seitenschutz geöffnet werden – was wiederum Arbeiten am offenen Bühnenrand zur Folge haben würde.

Der Bereich zwischen den Bühnenteilen wird – auf allen Bühnenebenen – mit Teleskopträgern überbrückt, die auf beiden Seiten in den festen Bühnenteilen aufgelagert sind. Die Schalung folgt diesem Konzept und wird durch senkrecht stehende Abfahreinheiten getragen, auf welchen auch die Betonierbühne aufgelagert wird.



Bild 17: Drehlager unter Innenbühne
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)



Bild 18: Rückansicht Drehlager unter Innenbühne
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

Durch den konstanten Abstand der Verankerungen zur hyperbolischen Außenkante hat auch der Kletterweg der Konsolen eine hyperbolische Form. Damit die Kletterkonsolen und damit die gesamte Bühne dieser Form folgen können, müssen die Konsolen immer parallel zur Pfeilerkante liegen. Gleichzeitig ist es durch die teleskopische Ausführung der Hauptbühne zwingend notwendig, dass diese Bühnenebene und die Schalung permanent waagrecht gehalten werden, sonst müsste der Teleskopträger ‚knickbar‘ sein. Ein Abnehmen der Bühnen zwecks Umbaus erwies sich schon aufgrund der Pfeilerhöhe als nur schwer durchführbar. Als Lösung dieses Problems wurde die Hauptbühne drehbar auf den Konsolen gelagert. Dadurch können die Konsolen unter der Arbeitsebene – ohne vorherige Entlastung – in der Neigung verändert werden. In Bild 12 ist der notwendige Verstellwinkel der Konsolen in der Rückansicht dargestellt und Bilder 17 und 18 zeigen die Ausführung eines Drehlagers auf der Innenseite. Die Neigung der Konsolen wurde durch die Querneigung der Kletterschienen erzwungen, konnte aber zusätzlich auch durch Spindeln zwischen den Konsolen reguliert werden.

2.3.3 Längsseite innen

Wie bereits weiter oben beschrieben, muss das Konzept der Innenschalung dem der Außenschalung folgen, um eine geordnete und sichere Ankerung der Schalung zu ermöglichen. Dabei spielen zwei Aspekte eine besondere Rolle:

- Für die Außenseite der Pfeiler ist Sichtbetonqualität gefordert. Dazu gehört ein geordnetes Ankerbild, was sich nur erreichen lässt, wenn die Innenschalung der Verschiebung der Außenschalung folgt.

- Ein geordnetes und sich wiederholendes Ankerschema mit relativ wenigen möglichen Ankerpositionen verringert auch die Gefahr einer fehlerhaften Verankerung der Schalung.

Aus diesen Anforderungen ergibt sich, dass es auf der Längsseite – genau wie außen – zwei Grundelemente gibt und dazwischen einen Ausgleichsbereich. Auf der Schmalseite gibt es ein jeweils zentrales Schalelement, das an den äußeren Enden in der Länge angepasst wird. Da innen keine erhöhten Anforderungen an die Betonoberfläche gestellt werden, kann die Längenanpassung an den Ecken mittels eines Schleppbleches erfolgen.

Aus der Geometrie der Pfeiler ergaben sich aber noch zwei weitere notwendige Anpassungen, die bei der Konzeption der Innenschalung gelöst werden mussten: Zum ersten verändert sich – wie bereits beschrieben – die Wandstärke um teilweise 20 cm innerhalb eines Pfeilers bzw. 30 cm insgesamt. Damit wurde der Innenraum – relativ zum Umfang – größer bzw. die einzelnen Seiten länger. Um ein einfaches Ankerschema zu gewährleisten, müssen die Hauptelemente aber genau gegenüber den entsprechenden Außenelementen liegen. Alle zusätzlichen Anpassungen für diese Teile der Änderungen müssen also direkt an der Ecke durchgeführt werden.

Dazu kommt noch eine weitere Anpassung: Durch die Taillierung des Pfeilers veränderte sich die Neigung der Schmalseite um fast 7°. Der dadurch entstehende dreiecksförmige Anpassungsbereich muss ebenfalls durch die Eckschalung abgedeckt werden (vgl. Bild 12 und Bild 19).

Diese Eckschalung hätte alle diese Anforderungen theoretisch mit einer großen Schleppblech-



Bild 19: Innenschalung und Eckelement
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

schalung erfüllen können. Durch die erforderliche Größe wäre diese Schalung aber so schwer und sperrig geworden, dass sie in dem engen Schacht nicht hätte vernünftig bedient werden können. Gleichzeitig wäre es nur schwer möglich gewesen, die Außenschalung gegen diese Eckschalung zu verankern, womit auch diese wieder deutlich größer und schwerer geworden wäre. Aus diesem Grund wurde die Eckschalung in drei Teile geteilt, die in ihrer Kombination flexibel genug sind, um alle Anpassungen ausführen zu können und gleichzeitig auch noch zu ermöglichen, gewisse Fehler auszugleichen.

Die gesamte Schalung auf der Innenseite wird – im Gegensatz zu der auf den Außenbühnen – von einem projektspezifisch geplanten Stahlgerüst abgehängt. Das ist zwar aufwendiger zu planen, bietet aber in statischer und geometrischer Hinsicht eine Reihe von Vorteilen:

- ❑ Die Abhängung der Schalung mit Laufkatzen von einem Trägerrost ist deutlich platzsparender als die Aufstellung auf einem Abfahrwagen, denn es wird nur die Schalung selbst verfahren und nicht auch noch das Abstützdreieck.
- ❑ Das Verfahren der Schalung mit den Laufkatzen ist einfacher als auf den Abfahrdreiecken, denn auf Grund der beengten Situation ist der innere Hebelarm im Abfahrdreieck relativ klein. Dadurch werden dann die inneren Kräfte höher, womit auch die Reibung steigt, die beim Verfahren überwunden werden muss.

- ❑ Bei einer Abhängung der Schalung überschneiden sich die Abfahrträger in der Ecke nicht, womit für beide Seiten ein ausreichender Abfahrweg der Schalung gewährleistet werden kann. Das war bei diesem Projekt besonders wichtig, da der Umbau der Schalung nur von vorn erfolgen kann.

Die Einteilung und Anpassung der Bühnen an veränderte Geometrie folgte im Grunde dem Konzept der Längsseite. Es wurden vier Hauptbühnen auf den Längsseiten des Innenraums angeordnet, jeweils zwei auf jeder Seite. Die Bühnen haben eine konstante Tiefe, die durch die minimale Breite des Innenraums am Pfeilerkopf bestimmt wurde. In Zahlen ausgedrückt hieß das folgendes: der Innenraum ist an der obersten Bühnenposition (zwei Takte bzw. 9,9 m unter dem Kopf) 2,95 m breit (parallel zur Brückenachse). Zwischen den Bühnen sollte immer ein Restabstand von ca. 5 cm sein, um mögliche Ungenauigkeiten ausgleichen zu können. Daraus ergibt sich, dass jede der Bühnen nur 1,45 m tief sein durfte – bei einer Takthöhe von 5 m. Für die Bedienung der Schalung – insbesondere deren Umbau – und das Klettern der Bühnen muss der Abfahrweg der Schalung mindestens 50 cm am oberen Taktende sein. Von den verbleibenden 95 cm muss noch die Schalungstiefe (Aufbauhöhe ca. 36 cm) und auch die Rückneigung der Schalung um 6,25 cm



Bild 20: Arbeitsraum hinter der Innenschalung
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

pro Takt abgezogen werden. Die aufgehende Stahlkonstruktion durfte damit eine maximale Tiefe von 52 cm haben – Außenmaß!

Die Anpassung der Bühnen erfolgt im Wesentlichen wie auch bei den Außenbühnen auf der Längsseite über einen Teleskopbereich in der Mitte. Die Konsolen sind unter den Rahmen drehbar gelagert, um die Richtungsänderung beim Klettern nachvollziehen zu können. Der Kletterweg folgt auch hier der Außenkante der Pfeiler. Um Kollisionen mit den Verankerungen der Außenbühnen zu verhindern, sind die Konsolen nicht symmetrisch angeordnet, womit auch der Anpassungsbereich nicht zentrisch sitzt. Eine weitere Besonderheit ist, dass sich durch die Veränderung der Neigung der Schmalseiten und die unterschiedlichen Wandstärken der horizontale Abstand zwischen Stahlrahmen und der Oberkante des Betoniertaktes auf der Schmalseite stetig vergrößert (siehe dazu auch Bild 12).

Im höchsten Pfeiler beträgt die Verschiebung zwischen Pfeilerfuß und -kopf fast 1 m. Um den Aufhängepunkt der Schalung soweit verschieben zu können, ohne mit dem Träger an die Bewehrung zu stoßen, musste auch an den Außenseiten ein Teleskopträger angeordnet werden. Der Teleskopträger trägt dann auch die entsprechende Arbeitsbühne, welche auch soweit teleskopierbar ist. Bild 20 zeigt den Arbeitsraum hinter der Innenschalung.

2.4 Anforderungen an den Planungsprozess

Um die beschriebenen Anpassungen und Umbauten an den Bühnen einschließlich der De- und Remontagen sicher und zeitlich gut planbar durchführen zu können, bedarf es einer detaillierten Planung jedes einzelnen Arbeitsschritts. Diese Planung umfasste nicht nur den Entwurf der eigentlichen Teile, sondern jeder einzelne Arbeitsschritt musste hinsichtlich Durchführbarkeit, Arbeitssicherheit und möglicherweise notwendiger Sicherungsmaßnahmen untersucht werden. Gleichzeitig galt es auch sicherzustellen, dass die Fehleranfälligkeit der Prozesse möglichst gering zu halten ist und dass ähnliche Prozesse auch wirklich in ähnlicher Weise durchgeführt werden, damit es dabei nicht zu Verwechslungen kommt.

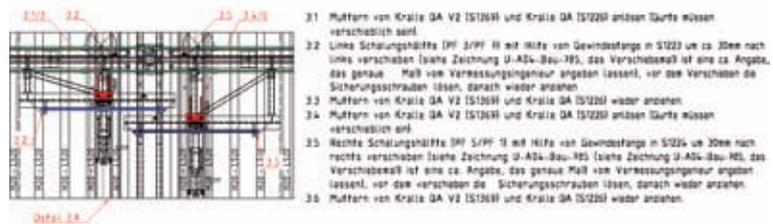
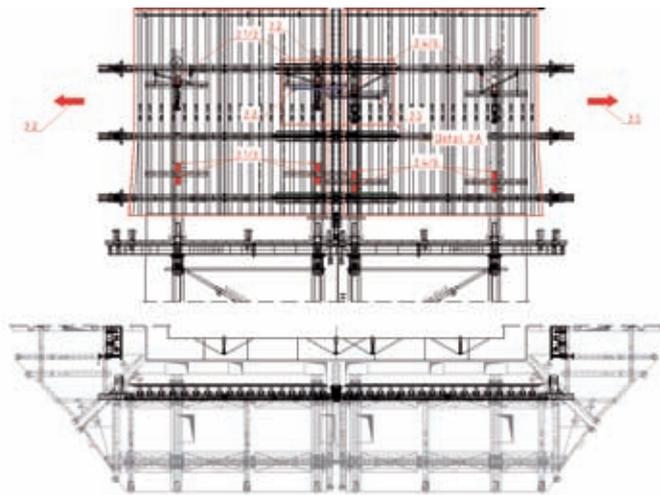


Bild 21: Auszug aus Umbauanweisung für Schalung der Längsseite
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

Natürlich beinhaltet die Planung aller Umbauarbeiten auch detaillierte Arbeitsanweisungen für alle Arbeitsschritte. Bild 21 zeigt einen Ausschnitt aus einem solchen Umbauplan.

3 Wirbelerregbarkeit der Pfeiler

Auf Grund ihrer Schlankheit sind die Pfeiler anfällig für wirbelerregte Querschwingungen. Dabei ist besonders die Erregbarkeit im Bauzustand maßgebend, das heißt bevor der Überbau der Brücke als horizontale Aussteifung dienen kann.

Bei dem Problem wirbelerregter Querschwingungen bei stabförmigen Bauteilen handelt es sich im Grunde darum, dass sich an einem umströmten Objekt auf der strömungsabgewandten Seite wechselseitig und periodisch Wirbel ablösen (Kármánsche Wirbelstraße). Durch die Ablösung kommt es zu Druckunterschieden, die als periodisch auftretende Kräfte auf das Objekt wirken. Die Ablösefrequenz und damit die Frequenz der Lastwechsel hängen von der Form des umströmten Objekts und der Strömungsgeschwindigkeit ab. Bei stabförmigen Bauteilen findet dabei eine Synchronisation der Wirbelablösung über die gesamte Bauhöhe statt. Trifft die Ablösefrequenz dabei eine Eigenfrequenz des Bauteils, kommt es zu starken Schwingungen, für die die gesamte Konstruktion ausgelegt werden muss. Diese Schwingungen wirken dann natürlich auch auf



Bild 22: Pfeilermodell im Windkanal

(© Ingenieurgesellschaft Niemann und Partner GbR, Bochum)

alle Anbauten an dem Bauteil – also auch auf die temporären wie Kletterschalungen. Auf Grund der relativ hohen Schlankheit der Brückenpfeiler an der Hochmoselbrücke waren die Pfeiler im Bauzustand bereits bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten entsprechend erregbar.

Bei den Pfeilern gibt es noch die Besonderheit, dass sich durch die Taillierung der umströmte Querschnitt über die Höhe permanent verändert. Das bedeutet, dass sich die theoretische Ablösefrequenz über die Höhe ebenfalls permanent ändert, womit es – theoretisch – mangels einer einheitlichen Frequenz kein Aufschwingen der Pfeiler geben dürfte. In der Praxis findet aber dennoch eine Synchronisation der Wirbelablösung über die Höhe der Pfeiler statt. Bei rechteckigen Querschnitten kommt noch hinzu, dass die Ablösefrequenzen in den beiden Hauptrichtungen auf Grund der verschiedenen Abmessungen bzw. Seitenverhältnisse unterschiedlich sind. Bei den Pfeilern der Hochmoselbrücke ist dabei besonders die Anströmung quer zur Brückenachse kritisch, da die Pfeiler in dieser Richtung deutlich schlanker sind als parallel zur Achse. Die Eigenfrequenz der Pfeiler wird zudem auch noch durch zum Teil relativ weiche Gründungen herabgesetzt. Bei dem Pfeiler Achse 3 (direkt am linken Moselufer) ist

die Gründungssituation derart kritisch, dass es Probleme beim Nachweis der Gründung gegen wirbelerregte Querschwingungen des Pfeilers im Bauzustand gab.

Die DIN EN 1991-1-4 [2] gibt für rechteckige Bauteile mit konstantem Querschnitt Formeln für die Ermittlung der Ablösefrequenzen und die auftretenden Kräfte vor. Weiterhin ist bekannt, dass es bei veränderlichen Querschnitten Effekte gibt, die die Wirbelerregbarkeit des Bauteils behindern bzw. die auftretenden Kräfte reduzieren. Für solche Bauteile lassen sich die Frequenzen und auftretenden Kräfte jedoch nur experimentell ermitteln.

Aus diesem Grund wurde die Wirbelerregbarkeit der Pfeiler in der ersten Untersuchung an Hand eines konstanten Ersatzquerschnitts ermittelt. Aus diesen Berechnungen ergaben sich für die Pfeilerköpfe zum Teil erhebliche dynamische Belastungen von bis zu knapp 4 m/s^2 . Außerdem war die Wirbelerregbarkeit zum Teil bereits bei Windgeschwindigkeiten von 13 m/s gegeben – das heißt es konnte mehr oder weniger zu jeder Zeit zum Aufschwingen des Pfeilers kommen. Bei folgenden Untersuchungen im Windkanal (Bild 22) zeigte sich, dass die realen Beschleunigungen am Pfeilerkopf nur bei maximal 2 m/s lagen, was aber

trotzdem noch erhebliche Belastungen sind. Die grundsätzliche Erregbarkeit der Pfeiler auch bei geringen Windgeschwindigkeiten wurde durch die Untersuchungen bestätigt.

Eine ‚normale‘ und unveränderliche Stahlkonstruktion lässt sich sicher durch eingehende Untersuchungen und eventuelle zusätzliche Versteifungselemente auf diese Belastungen auslegen. Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, sind die eingesetzten Kletterbühnen aber keine ‚normalen‘ Stahlkonstruktionen. Die Vielzahl der notwendigen Funktionalitäten und Umbaumöglichkeiten erfordern eine hohe Zahl an offenen Profilen, gesteckten Verbindungen und beweglichen Lagern, deren Lagerungsbedingungen sich nur sehr schwer definieren lassen. Erschwerend kommt noch hinzu, dass die Belastungen nicht nur in der Haupttragrichtung der Konsolen auftreten sondern auch quer dazu.

Der Aufwand für die Nachweise für diese dynamischen Lasten wäre also extrem gewesen und der Ausgang der Nachweise sowie die Anzahl der Revisionen der gesamten Konstruktion nicht absehbar. Aus diesem Grund schieden auch verschiedene zwischenzeitlich diskutierte Maßnahmen zur Schwingungsdämpfung aus, da auch bei reduzierten Einwirkungen alle Nachweise geführt werden müssten.

Der einzige realistische Lösungsansatz bestand darin, die Synchronisation der Wirbelablösung über die Höhe der Pfeiler komplett zu verhindern. Das Phänomen der wirbelerregten Querschwingungen ist besonders bei zylindrischen Bauteilen wie zum Beispiel hohen Schornsteinen weit verbreitet. Hier sind jedoch Gegenmaßnahmen bekannt. Die sogenannte Scruton-Wendel verhindert die Synchronisation der Wirbelablösung und damit ein Aufschwingen der gesamten Konstruktion.

Bei rechteckigen Querschnitten – noch dazu mit unterschiedlicher Seitenlänge – war es zu Beginn der Planungen nicht bekannt, ob sich die Synchronisation durch ähnlich einfache Mittel verhindern ließe. Grundsätzlich gab es zu diesem Zeitpunkt die folgenden beiden Ansätze, die aber beide auf Grund des zu erheblichen Aufwands verworfen wurden:

- ❑ Der umströmte Querschnitt hätte durch temporäre Anbauten (z. B. durch mit Planen bespannte Gerüste) so verändert werden können, dass die kritischen

Windgeschwindigkeiten über die tatsächlich zu erwartenden maximalen Windgeschwindigkeiten angehoben worden wären. Neben erheblichen Mengen an Gerüstmaterial und zusätzlichen Fundamenten hätte dieser Ansatz auch zur Folge gehabt, dass die Windlasten auf die Pfeiler deutlich gestiegen wären.

- ❑ Die Pfeiler hätten mit durchlässigen Gerüsten eingerüstet werden können, die eine laminare Umströmung der Pfeiler durch Verwirbelung der Luft im Nahbereich unterbunden hätten. Auch mit diesem Ansatz hätte man aber die Windlast auf den Pfeiler erhöht.

In intensiver Diskussion mit dem zuständigen Windgutachter (Büro Niemann und Partner, Bochum) wurde eine Reihe von möglichen anderen Konstruktionen zur Unterdrückung der Synchronisation entwickelt. Diese Konstruktionen wurden anschließend im Windkanal der Universität Bochum auf ihre Wirksamkeit hin untersucht.

Als wirksamste Konstruktion wurden L-förmige Anbauten ermittelt (Bild 23), die wechselseitig auf der Schmalseite der Pfeiler montiert wurden. Durch diese Konstruktionen konnte die Synchronisation der Wirbelablösung in beiden Anströmrichtungen vollständig unterbunden werden. Ein willkommener Nebeneffekt dieser Anbauten war, dass der c_p -Wert des gesamten Pfeilers so weit gesenkt werden konnte, dass sich die Gesamtlast aus Wind auf die Pfeiler deutlich verringert hat.

Nachdem die grundsätzliche Wirksamkeit der Anbauten nachgewiesen und die Abmessungen entsprechend optimiert waren, musste noch eine Reihe praktischer Probleme gelöst werden, denn die Windabweiser mussten in teilweise großer Höhe



Bild 23: Pfeilermodell mit Anbauten im Windkanal
© Ingenieurgesellschaft Niemann und Partner GbR, Bochum)



Bild 24: Montage der Windabweiser am Boden
(© Hünnebeck Deutschland GmbH, Ratingen)

sowie unterhalb der vorhandenen Kletterbühnen montiert werden. Ebenfalls waren die Konstruktionen auf Grund ihrer Größe und der Verkleidung sehr anfällig gegen Wind bei der Montage.

Zusätzlich kam noch ein erhebliches geometrisches Problem hinzu: bei einer L-förmigen Struktur liegt der Schwerpunkt immer zwischen den beiden Schenkeln. Beim Einbau der Konstruktion in die vorbereiteten Halteschuhe muss diese senkrecht am Kran hängen. Diese lässt sich nur erreichen, wenn die Konstruktion im Schwerpunkt angehängt ist. Der ‚normale‘ Schwerpunkt der Konstruktionen aber liegt in diesem Fall innerhalb des Pfeilers und war damit für den Kran nicht zugänglich. Aus diesem Grund musste eine Verlagerung des Schwerpunktes zu den Krananschlagpunkten mit Hilfe von genau zu berechnenden temporären Kontergewichten erfolgen (s. a. Bild 25).

Die Lage dieser Krananschlagpunkte ist durch die Kletterbühnen darüber festgelegt, da der Einbau der höherliegenden Segmente nur durch den



Bild 25: Einheben eines Windabweisers mit Kontergewicht

(Foto: Sebastian Riegel)

vorhandenen Turmdrehkran erfolgen kann. Hierbei liegt das Kranseil im Bereich der Eckübergänge der Bühnen. Zum Durchlass des Seiles werden die Teleskopbühnen der Bühnen auf Schmalseiten soweit zurückgezogen, dass das Kranseil passieren kann. Anschließend werden diese Öffnungen wieder mit Überwurfbühnen verschlossen

Diese Windabweiserkonstruktionen wurden zum Teil aus mietfähigem Gerüstmaterial erstellt, am Boden vormontiert (Bild 24) und dann mit dem Kran in die entsprechende Position gehoben. Die Endmontage der Anbauten wurde durch Industriekletterer durchgeführt. Für die Verkleidung der Windabweiser wurden speziell konfektionierte LKW-Planen verwendet, die mit UV-beständigen Kabelbindern an der Gerüstkonstruktion befestigt sind.

Die Bilder 25 und 26 zeigen die Montage der Anbauten, wobei Bild 25 den Anbau des ersten Körpers zeigt und Bild 26 die Montage eines späteren Anbaukörpers. Dabei zeigte sich beim Einbau der ersten Windabweiserkonstruktionen, dass diese deutlich einfacher zu montieren sind, wenn die Gerüstplanen erst nach dem Einhängen am Pfeiler montiert werden. Um gleichzeitig zu verhindern, dass die Industriekletterer in großer Höhe mit diesen schweren Planen hantieren müssen, werden diese aufgerollt am obersten Stab der Windabweiser montiert und erst nach Einhängen und Verankern am Pfeiler entrollt, gespannt und befestigt. Die Bilder 27 und 28 zeigen Windabweiserkonstruktionen in Achse 6.

4 Zusammenfassung

Auf Deutschlands zurzeit größter Brückenbaustelle müssen zehn Brückenpfeiler mit bis zu 154 m Höhe hergestellt werden. Durch die Taillierung der Pfeiler und die wechselnden Wandstärken ist der



Bild 26: Endmontage der Gerüstkuben durch Industriekletterer (Gerüstplanen für Einbau noch aufgerollt)

(Foto: Sebastian Riegel)



Bild 27: Windabweiser am Pfeiler Achse 6
(©LBM: Landesbetrieb Mobilität Trier,
Rheinland-Pfalz)



Bild 28: Schmalseite eines Pfeilers mit Wind-
abweisern (© Hünnebeck Deutschland
GmbH, Ratingen)

Querschnitt der Pfeiler hoch variabel und dementsprechend aufwendig herzustellen.

In enger Abstimmung mit der Baustelle wurde durch Hünnebeck Deutschland ein Konzept für eine modular aufgebaute Kletterschalung entwickelt, mit welcher alle notwendigen Anpassungen schnell, sicher und gut planbar durchgeführt werden konnten. Durch den modularen Aufbau konnten alle Anpassungen ohne einen einzigen Sägeschnitt durchgeführt werden und alle Teile der Schalung an den darauf folgenden Pfeilern wieder verwendet werden.

Zusätzlich konnte durch Entwicklung und Einsatz innovativer Windabweiser das Entstehen wirbelerregter Querschwingungen komplett unterbunden werden, womit auch der Nachweis des Fundaments vom Pfeiler Achse 3 im Bauzustand möglich wurde.

Literatur

- [1] Landesbetrieb Mobilität Trier / www.hochmoseluebergang.rlp.de (geprüft am 23.11.2015)
- [2] DIN EN 1991-1-4: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010. 12/2010

Im gedruckten Tagungsband stand hier eine Anzeige. Sie wurde für die Online-Fassung entfernt.