



31. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

07. UND 08. JUNI 2022

© 2022 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

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Technische Universität Dresden

Institut für Massivbau

01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Drackensteiner Hang (1936) – Foto: Martin Hahn, LAD

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

ISSN 1613-1169

ISBN 978-3-86780-709-8



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

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

Tagungsband

31. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau
Freunde des Bauingenieurwesens der TU Dresden e.V.
TUDIAS GmbH

07. und 08. Juni 2022

Inhalt

Herzlich willkommen zum 31. Dresdner Brückenbausymposium 2022!	7
Grußwort des Sächsischen Staatsministers für Regionalentwicklung	11
Brücken auf geokunststoffbewehrten Widerlagern – schnell, umweltgerecht und kostengünstig	13
<i>Gero Marzahn, Jörg Kranz, Dietmar Placzek, Thomas Oehler</i>	
Brücken mit Verbunddübelleisten – Entwurf, Bemessung und Ausführungsbeispiele	27
<i>Günter Seidl, Victor Schmitt, Wojciech Lorenc</i>	
Die Filstalbrücken im Zuge der NBS Wendlingen–Ulm – Integrale Bauwerke mit besonderen statisch-konstruktiven Herausforderungen	43
<i>Anton Braun</i>	
Zugglieder aus Faserverbundwerkstoff im Brückenbau – Besonderheiten beim Einsatz von Netzwerkhängern aus Carbon	57
<i>Lorenz Haspel</i>	
Verstärken von Bestandsstrukturen mittels Verbundankerschrauben	75
<i>Jürgen Feix, Johannes Lechner</i>	
Verstärkung von Stahl- und Spannbetonbrücken mit Carbonbeton – Aktuelles aus Praxis und Forschung	89
<i>Oliver Steinbock, Thomas Bösche</i>	
Integration of FEM Analysis and Construction Geometry Management on the Example of the Thu Thiem 2 Cable Stayed Bridge	107
<i>Antti Karjalainen</i>	
Brückendenkmalpflege – Erfahrungen aus Baden-Württemberg	121
<i>Michael Hascher, Sabine Kuban</i>	
smartBRIDGE Hamburg – die Brückeninstandhaltung der Zukunft	139
<i>Marc Wenner, Steffen Marx, Markus Meyer-Westphal, Martin Herbrand, Christof Ullerich</i>	
Risikobasiertes Anlagemanagement der Brücken der SBB – Methode und erste Anwendungserfahrungen	151
<i>Dirk Proske, Herbert Friedl, Jean-Baptiste Payeur, Blaise Girardin</i>	
Die Schorgasttalbrücke – Herzstück der Ortsumgehung Untersteinach	163
<i>Bernhard Schäpertöns, Daniel Schäfer, Werner Kuhnlein, Christoph Schultheiß</i>	
Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton	175
<i>Andreas Apitz, Frank Jesse, Mike Schlaich</i>	
Fertigung und Montage der Chenab Railway Bridge in Indien – Ein Erfahrungsbericht ...	191
<i>Frank Bauchspiess</i>	
Chronik des Brückenbaus	207
<i>Zusammengestellt von Sabine Wellner</i>	

Integration of FEM Analysis and Construction Geometry Management on the Example of the Thu Thiem 2 Cable Stayed Bridge

Integration von FEM-Analyse und Baugeometriemanagement am Beispiel der Schrägseilbrücke Thu Thiem 2

Antti Karjalainen
WSP Finland

Abstract

Thu Thiem 2 Bridge is a new crossing built over the Saigon River in the center of Ho Chi Minh City in Vietnam, connecting District 1 downtown and new urban area Thu Thiem. The bridge is a new landmark for the city. The cable stayed bridge has a single unique backwards inclined curved pylon and antisymmetric spans of 200 m main span with 115 m back span (Figure 1).

This paper discusses about the design of an integration of FEM analysis and construction geometry in stage by stage cantilever construction, especially about the design of the main span steel structures.

The geometry analysis for stage by stage construction, especially when using free cantilever method, is a challenging task. In this project as

Zusammenfassung

Die Thu-Thiem-2-Brücke ist eine neue Brücke über den Fluss Saigon im Zentrum von Ho-Chi-Minh-Stadt in Vietnam, die den Bezirk 1 im Stadtzentrum mit dem neuen Stadtgebiet Thu Thiem verbindet. Die Brücke ist ein neues Wahrzeichen für die Stadt. Die Schrägseilbrücke hat einen einzigen, nach hinten geneigten, gebogenen Pylon und asymmetrische Spannweiten von 200 m Hauptspannweite und 115 m Rückspannweite (Bild 1).

In diesem Beitrag wird die Integration von FEM-Analyse und Geometrie der Brückenkonstruktion unter Beachtung des stufenweisen Freivorbau erörtert, insbesondere beim Entwurf der Stahlkonstruktion für die Hauptspannweite.

Entwurf und Berechnung der Geometrie für die schrittweise Konstruktion, insbesondere



Figure 1 Thu Thiem 2 Bridge; visualization, view from south-west

© WSP

Bild 1 Brücke Thu Thiem 2; Visualisierung, Ansicht von Südwesten

© WSP

a conclusion for integration of FEM analysis and construction geometry management it can be said that making accurate analysis model with actual geometry together with using BIM gave a huge benefits for the construction. The biggest ones were in the fabrication of steel structures, as precamber was very accurate and there were no any problems in the erection and construction. Second high benefit as well was opportunity to transfer information in electric format, both numerical and 3D geometry between design, analysis and construction. That made measurement work more easy, as well as quality control in design and construction.

1 Thu Thiem 2 Bridge

Thu Thiem 2 Bridge is a new crossing built over the Saigon River to connect the new Thu Thiem urban area to the city center of Ho Chi Minh City in Vietnam. The Bridge is located in the heart of about 10 million people metropolis called Saigon, South Vietnam's financial capital. That set requirements for a high quality, well recognizable and unique bridge. As a result of the design the Bridge is a well recognizable symbol to the whole city. Construction work of the pylon and bridge deck over the river has been finished in November 2021 and whole the bridge is planned to be finished in April 2022.

The cable stayed bridge has a single unique backwards inclined curved pylon and antisymmetric spans of 200 m main span with 115 m back span (Figure 2). The longer span includes wide main navigation channel with 10 m vertical clearance. The main bridge joins to the approach bridge by an expansion joint at the city side and monolithically to the side spans at Thu Thiem side. Especially the backwards inclined curved pylon makes this bridge unique.

2 Structural concept

The bridge deck carries four lanes for normal vehicle traffic, two for motorbikes and narrow pedestrian lanes in both sides, having effective width of 27.3 m. Superstructure

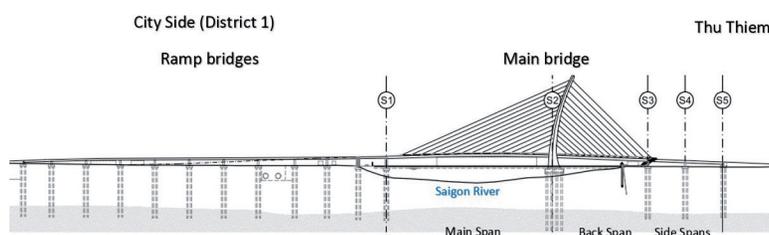


Figure 2 Side view of the Thu Thiem Bridge, main bridge spans 200 + 115 + 40 + 40 m © WSP

Bild 2 Seitenansicht der Thu-Thiem-Brücke, Hauptbrückenspannen 200 + 115 + 40 + 40 m © WSP

beim Freivorbau, ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Als Schlussfolgerung aus diesem Projekt zur Integration von FEM-Analyse und Baugetriemmanagement kann gesagt werden, dass die Erstellung eines genauen Analysemodells mit der tatsächlichen Geometrie zusammen mit der Verwendung von BIM enorme Vorteile für die Konstruktion brachte, vor allem bei der Herstellung der Stahlkonstruktionen, da die Vorverformung sehr genau war und es keine Probleme bei der Montage und Konstruktion gab. Der zweite große Vorteil war die Möglichkeit, Informationen – sowohl numerische als auch 3D-Geometrien – zwischen Entwurf, Berechnung und Konstruktion digital zu übertragen. Das erleichterte die Messarbeiten und die Qualitätskontrolle in der Planung und Konstruktion.

1 Thu-Thiem-2-Brücke

Die Thu-Thiem-2-Brücke ist eine neue Brücke über den Fluss Saigon, die das neue Stadtgebiet Thu Thiem mit dem Stadtzentrum von Ho-Chi-Minh-Stadt in Vietnam verbinden soll. Die Brücke befindet sich im Herzen der 10-Millionen-Metropole Saigon, der Finanzhauptstadt Südvietnams. Das stellte hohe Anforderungen an eine qualitativ hochwertige, einzigartige Brücke mit hohem Wiedererkennungswert. Aufgrund des Designs ist die Brücke ein einzigartiges Symbol für die ganze Stadt. Die Bauarbeiten für den Pylon und das Brückendeck über dem Fluss wurden im November 2021 abgeschlossen; die Fertigstellung der gesamten Brücke ist für April 2022 geplant.

Die Schrägseilbrücke hat einen einzelnen, nach hinten geneigten, gebogenen Pylon und antisymmetrische Spannweiten von 200 m (Hauptspannweite) und 115 m (rückwärtige Spannweite) (Bild 2). Die längere Spannweite überbückt eine breite Hauptfahrrinne mit einer lichten Höhe von 10 m. Die Hauptbrücke schließt auf der Stadtseite über eine Dehnungsfuge an die Zufahrtsbrücke und auf der Thu-Thiem-Seite monolithisch an die Seitenspannen an. Vor allem der nach hinten geneigte gebogene Pylon macht diese Brücke einzigartig.

fahrtsbrücke und auf der Thu-Thiem-Seite monolithisch an die Seitenspannen an. Vor allem der nach hinten geneigte gebogene Pylon macht diese Brücke einzigartig.

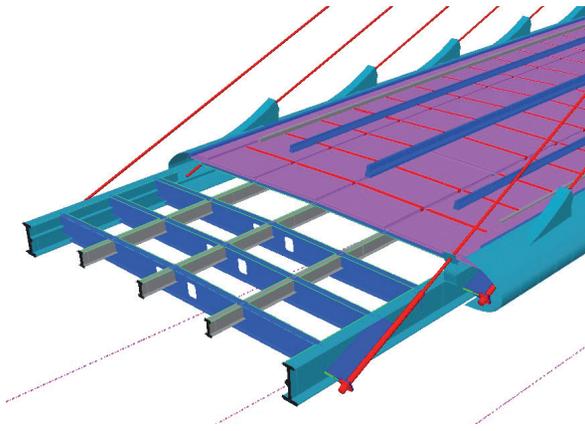


Figure 3 Structure of the main span © WSP

Bild 3 Konstruktion des Brückenträgers (Hauptspannweite) © WSP

for the main span is steel and concrete composite and the back span and side spans are made of concrete, to balance the difference in cable supported span lengths. The bridge pylon is A-shaped, backwards inclined and curved. The main span girders consist of 2 main I-girders and three secondary girders (Figure 3). Steel cross girders are located in 4.2 m distance every third of these having cable anchors at bridge edge.

2.1 Engineering design stage equilibrium

Due to the heavy vessel traffic in the Saigon River, a free cantilever method was selected for the main span construction method. In the engineering design before the contractor was selected, it was also preferred to do the cable stressing work only once to be done under the deck over the river. The back span can be planned to be built casted in situ on scaffolding.

In the design the cable forces were selected to allow bending moment for the superstructure approximately similar than continuous girder at rigid supports, as often used for composite structure [1]. Selection was favourable especially for the concrete back span to minimize the effects of creep. This selection together with cables in harp arrangement lead to quite uniformly distributed cable forces and small variation only for the stay cable units. Another target in the design was to eliminate bending moments in the pylon under the permanent loads in final stage.

2 Brückenkonzept

Das Brückendeck trägt vier Fahrspuren für den normalen Fahrzeugverkehr, zwei für Motorräder und schmale Fußgängerwege auf beiden Seiten mit einer effektiven Breite von 27,3 m. Der Überbau für die Hauptspannweite ist ein Stahl-Beton-Verbundquerschnitt, während die rückwärtige Spannweite und die seitlichen Spannweiten aus Beton gefertigt sind, um die unterschiedlichen Längen der seilgestützten Spannweiten auszugleichen. Der Brückentyp ist A-förmig, nach hinten geneigt und gekrümmt. Der Überbauträger der Hauptspannweite besteht aus zwei I-Trägern und drei Nebenträgern (Bild 3). In einem Abstand von 4,2 m sind Stahlquerträger angeordnet, von denen jeder dritte mit Kabelankern am Brückenrand versehen ist.

2.1 Grundsätzliche Konzeption

Aufgrund des starken Schiffsverkehrs auf dem Saigon wurde für die Konstruktion der Hauptspannweite die Freivorbaumethode gewählt. Bei der technischen Planung vor der Auswahl des Auftragnehmers wurde es außerdem bevorzugt, die Seilspannarbeiten nur einmal unter dem Deck über dem Fluss auszuführen. Die hintere Spannweite sollte an Ort und Stelle auf Gerüsten betoniert werden.

Bei der Bemessung wurden die Seilkräfte so gewählt, dass das Biegemoment für den Überbau in etwa dem eines Durchlaufträgers mit starken Auflagern entspricht, wie es bei Verbundkonstruktionen häufig angewendet wird [1]. Die Auswahl war vor allem für die rückwärtige Spannweite aus Beton günstig, um die Auswirkungen des Kriechens zu minimieren. Diese führte zusammen mit den Seilen in Harpanordnung zu recht gleichmäßig verteilten Seilkräften und nur bei den Schrägseileinheiten zu geringen Schwankungen. Ein weiteres Ziel des Entwurfs war es, Biegemomente im Pylon unter den ständigen Lasten in der Endphase zu eliminieren.

2.2 Design für die schrittweise Herstellung

Das Design unter Berücksichtigung des Bauablaufs war erforderlich, um die Konstruierbarkeit zu gewährleisten und die in der statischen Analyse ermittelten Lasten mit den tatsächlichen Lasten abzustimmen sowie die strukturellen Anforderungen zu erfüllen und die geplanten

2.2 The stage by stage construction design

Final erection stage design was needed to ensure the constructability and match construction loads in analysis to actual ones, as well as the compliance with the structural requirements and to reach planned final geometry for the bridge deck and pylon.

Erection concept to build the bridge easy and safe was proposed by the designer and followed by the contractor with some amendments for the construction, such construction equipments, derrick in the main span cantilever construction to be most markable issue when updating analysis, and some other minor amendments to the stay cable stressing and pylon construction in relation to the main span construction stages.

The governing Vietnamese Bridge design standard [2] set some requirements and limits for the erection design. The Standard is a copy of AASHTO 1998 LRFD Bridge design Specification [3]. Given requirements and limits cover the loads, load combinations and allowable compression and tensile stresses. As the standard in question is intended to be used mainly for standard segmental bridge design, all the requirements were not completely applicable for that long span cable stayed structure.

For the main span and pylon concrete, the design standard sets design criteria for segmentally constructed structures, which includes mainly the stress limits.

2.2.1 The final stage equilibrium

The final stage equilibrium included the weight of the non-structural components such as dead load of the asphalt layers, concrete barriers, edge beams and cladding framework and plates, and other accessories. These loads were relatively big and had to be considered to follow actual construction stages. Due to asymmetry of the main and back span, these loads created asymmetric bending to the pylon and to the superstructure. The magnitude of the bending effects of these loads were close to the effects of the live loads in governing positions. It was soon noticed that it is a challenge to make construction with only stressing the cables once when keeping stresses in allowable limits.

It was also confirmed the engineering design assumption, that the construction of the pylon requires temporary supporting during the can-

te endgültige Geometrie für das Brückendeck und den Pylon zu erreichen.

Der Konstrukteur schlug ein einfaches und sicheres Errichtungskonzept für die Brücke vor, das vom Auftragnehmer mit einigen Änderungen für die Konstruktion befolgt wurde, wie z. B. Bauausrüstungen, Derrick in der freitragenden Konstruktion der Hauptspannweite, die bei der Aktualisierung der Analyse am stärksten ins Gewicht fielen, und einige andere kleinere Änderungen an der Schrägseilspannung und der Pylonkonstruktion in Bezug auf die Bauphasen der Hauptspannweite.

Die maßgebliche vietnamesische Brückenkonstruktionsnorm [2] enthält einige Anforderungen und Grenzwerte für die Konstruktion. Die Norm ist eine Kopie der *AASHTO 1998 LRFD Bridge design Specification* [3]. Die Anforderungen und Grenzwerte beziehen sich auf die Lasten, Lastkombinationen und zulässigen Druck- und Zugspannungen. Da die betreffende Norm hauptsächlich für den Entwurf von Standard-Segmentbrücken verwendet werden soll, waren nicht alle Anforderungen vollständig auf diese weit gespannte Schrägseilkonstruktion anwendbar.

Für den Beton der Hauptspannweite und der Pylone werden in der Entwurfsnorm Entwurfskriterien für segmental gebaute Bauwerke festgelegt, die hauptsächlich die Spannungsgrenzen umfassen.

2.2.1 Gleichgewicht im Endzustand

Das Gleichgewicht im Endzustand umfasste das Gewicht der nichtstrukturellen Komponenten wie das Eigengewicht der Asphaltdecken, der Betonschutzwände, der Randbalken und der Verkleidungsrahmen und -platten sowie anderer Zubehörteile. Diese Lasten waren relativ groß und mussten jeweils für die einzelnen Bauphasen berücksichtigt werden. Aufgrund der Asymmetrie der Haupt- und rückwärtigen Spannweite führten diese Lasten zu einer asymmetrischen Biegung des Pylons und des Überbaus. Die Größenordnung der Biegeeffekte dieser Lasten lag nahe an den Auswirkungen der Verkehrslasten in den maßgebenden Positionen. Es wurde schnell festgestellt, dass es eine Herausforderung ist, eine Konstruktion zu erstellen, bei der die Kabel nur einmal angespannt werden sollen und dabei die Spannungen innerhalb der zulässigen Grenzen bleiben müssen.

Das Design bestätigte sich auch die Annahme der Ingenieure, dass die Konstruktion des Pylons eine vorübergehende Abstützung wäh-

tilever construction before pylon top finished. The stay cable pipe installation both in the deck and pylon and orientation were noticed to be challenging too due to the continuously changing pylon inclination and deck elevation.

2.2.2 The stage by stage construction design

The targeted final stage equilibrium was defined in the beginning of the construction. It included the definition of the main span and back span weight, the required stay cable forces to carry that weight and definition of the balanced stay cable forces for back span cables to minimize pylon bending. Construction stage design by the contractor was finalized, as well as design for construction and lifting machines to set actual construction loads to the structural analysis.

After defining the target, the staged construction analysis with forward calculation method was carried on. The analysis included the construction stages with segment installation, concreting and precast deck element installation by stages, prestressing of tendons and stay cables and stressbars in the pylon, weight of construction equipment, precamber for the deck and pylon and the effects of creep and shrinkage.

While varying the construction stage order, such stay cable stressing and concrete deck installation, it was realized that by balancing the weight of the main span structural components with back span stay cable forces, it is possible to stress the main span cables almost to the final length and minimize the bending in the pylon during the construction.

It was also noticed that required precamber for the main span steel girders and pylon were more complicated. It was found out too that the stay cables shall be stressed in several stages to keep tensile stresses in the pylon concrete manageable.

2.2.3 Actual construction method

The construction of the main bridge started with the foundation works for all the supports, including the back span and side span temporary scaffoldings (Figure 4). Side spans were built next continued with the back span reinforcement and concreting works. The Pylon construction was started parallel with back span construction so that the superstructure and the pylon cross beam were concreted to a monolithic structure. After concreting and prestressing the back span superstructure

rend der Auskragung vor der Fertigstellung der Pylonspitze erfordert. Die Verlegung der Schrägseilrohre sowohl im Deck als auch im Mast und deren Ausrichtung erwiesen sich aufgrund der sich ständig ändernden Neigung des Mastes und der Deckhöhe ebenfalls als Herausforderung.

2.2.2 Strukturentwurf für die schrittweise Herstellung

Das angestrebte Gleichgewicht im Endzustand wurde gleich zu Beginn des strukturellen Entwurfs festgelegt. Dazu gehörte die Festlegung des Eigengewichts der Haupt- und Rückspanweite, der erforderlichen Schrägseilkräfte, um dieses Gewicht zu tragen, und die Festlegung der ausbalancierten Schrägseilkräfte für die Rückspanseile, um die Durchbiegung des Pylons zu minimieren. Die Planung der Bauphase durch den Auftragnehmer wurde abgeschlossen, ebenso wie die Planung der Zug- und Hebemaschinen, um die tatsächlichen Lasten in der Strukturanalyse berücksichtigen zu können.

Nach der Festlegung der Endgrößen wurde die Bauabschnittsanalyse mit der Vorwärtsberechnungsmethode durchgeführt. Die Analyse umfasste alle Bauabschnitte, also den Einbau der Segmente, das Betonieren, den schrittweisen Einbau der vorgefertigten Deckelemente, das Vorspannen der Spannglieder, der Schrägseile sowie der Spannstäbe im Pylon; zudem das Gewicht der Baugeräte sowie Einflüsse infolge der Verformung von Deck und Pylon und die Auswirkungen von Kriechen und Schwinden.

Bei der Variation der Reihenfolge der Bauabschnitte, wie z. B. der Vorspannung der Schrägseile und des Einbaus der Betonfahrbahnplatte, wurde festgestellt, dass es möglich ist, das Gewicht der Tragwerkskomponenten des Hauptfeldes mit den Kräften der Schrägseile des rückwärtigen Feldes auszugleichen, so dass die Schrägseile des Hauptfeldes fast bis zur endgültigen Länge vorgespannt werden können und die Durchbiegung des Pylons während der Bauarbeiten minimiert wird.

Es wurde auch festgestellt, dass die erforderlichen Vorwölbungen für die Stahlträger des Hauptfeldes und den Pylon komplizierter waren. Es wurde zudem festgestellt, dass die Schrägseile in mehreren Stufen belastet werden müssen, um die Zugspannungen im Beton des Pylons in Grenzen zu halten.

2.2.3 Umgesetztes Bauverfahren

Der Bau der Hauptbrücke begann mit den

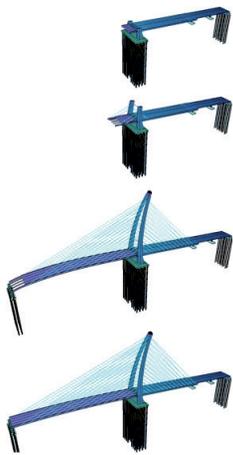


Figure 4
Main construction stages;
from top to bottom: sub-
structures and back span;
pylon and main span erection,
and closing the main span

© WSP

Bild 4
Hauptbauphasen; von oben
nach unten: Unterkonstruktionen
und rückwärtige Spannweite,
Errichtung des Pylons und des
Hauptfeldes, Schließen des Hauptfeldes

© WSP

the parallel pylon and superstructure erection were able to start.

Pylon and main span erection had a construction cycles including the pylon steel core installation, reinforcement and concreting pylon and main span segments, steel segment installation at main span (Figure 5) together with moving derrick prior lifting and welding. During the cantilever stage, the back span was laying on temporary scaffolding. Before the last steel segment lifted from the barge and welded to the last cable connected steel segment, the derrick was removed.

Finalizing the bridge included applying the asphalt layers and steel railing, second stressing

Gründungsarbeiten für alle Stützen, einschließlich der Behelfsgerüste für das rückwärtige Feld und die Seitenfelder (Bild 4). Anschließend wurden die Seitenfelder gebaut und mit den Bewehrungs- und Betonierarbeiten für das rückwärtige Feld fortgesetzt. Mit dem Bau des Pylons wurde parallel zur Rückspannung begonnen, so dass der Überbau und der Pylonquerträger zu einer monolithischen Struktur betoniert wurden. Nach dem Betonieren und Vorspannen des rückwärtigen Überbaus konnte mit der parallelen Errichtung von Pylon und Überbau begonnen werden.

Die Montage des Pylons und der Hauptspannweite umfasste die Montage des Stahlkerns des Pylons, die Bewehrung und Betonierung der Pylon- und Hauptspannweitensegmente, die Montage der Stahlsegmente der Hauptspannweite (Bild 5) sowie das Bewegen des Derricks vor dem Heben und Schweißen. Während der Freivorbauphase lag die hintere Spannweite auf einem provisorischen Gerüst. Bevor das letzte Stahlsegment vom Lastkahn gehoben und mit dem letzten kabelverbundenen Stahlsegment verschweißt wurde, wurde der Derrick entfernt.

Die Fertigstellung der Brücke umfasste das Aufbringen der Asphaltschichten und des Stahlgeländers, das zweite Spannen der Schrägseile, den Einbau des Zubehörs und der Betonleitelemente, das Entfernen der Pylonabstützungen und das Betonieren der Pylonspitze.

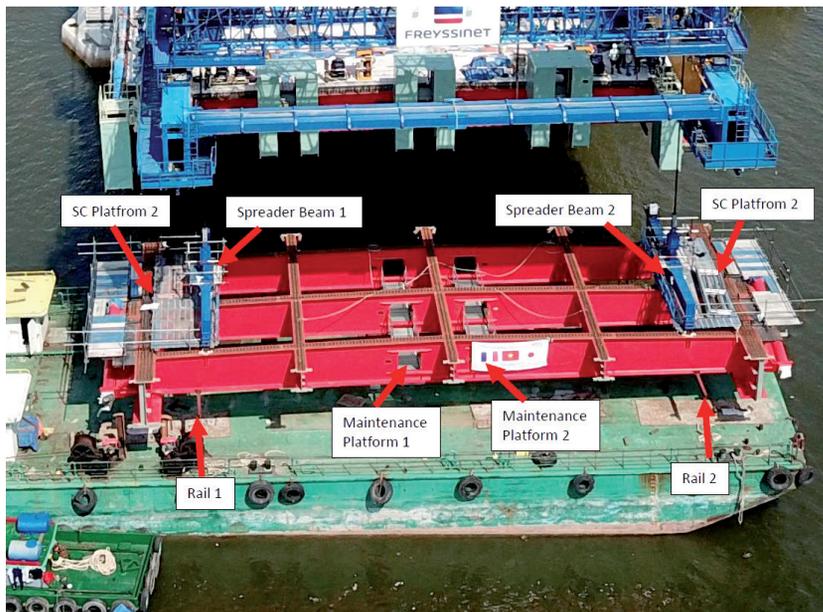


Figure 5 Main span steel segment on ferry and derrick system © WSP

Bild 5 Stahlsegment der Hauptspannweite auf der Fähre und Derricksystem © WSP

Durch die geplante Bauweise war es möglich, die Arbeiten für die Hauptspannweite und den Pylon effektiv und parallel auszuführen. Die Methode ermöglichte es auch, die Schrägseilkräfte für die hintere Spannweite während der Bauarbeiten und bei der Endvorspannung anzupassen.

Einige Herausforderungen aufgrund des unsymmetrischen strukturellen Konzepts mit Empfindlichkeit gegenüber hohen Zugspannungen im Pylon wurden festgestellt, zusätzlich zu den Schwankungen des tatsächlichen Struktureigen Gewichts und dem hohen Gewicht des Derricks. Dies

of the stay cables, installation of the accessories and concrete barriers, removal the pylon struts and concreting the pylon tip.

By the planned construction method it was able to the work for the main span and the pylon effectively for parallel erection. Also the method made it possible to adjust stay cable forces for back span between during the construction and for final stressing.

Some challenges due to unbalanced structural concept with sensibility to high tensile stresses in the pylon were noticed, in addition with variation of the actual structure weight, and heavy derrick weight. These made update needed for geometry analysis and for amending some stay cable stressing stages.

3 Construction geometry management

In the bridge structural design for both engineering design stage and shop drawings, full 3D model of the main bridge was done, the model including all concrete and steel structures with actual dimensions, as well as all re-bars, tendons and stressbars in concrete. The model was done with same principles than presented in the *„Siltojen tietomalliohje“* [4] which is BIM guidelines for bridge design in Finland by Vaylavorasto. Whole the model was done to follow actual coordinate system and for the concrete structures in planned final geometry. For steel structures, the model in engineering design was in final geometry and for shop drawings with planned precamber inside segments. That way all coordinates for the structures were able to be checked from the BIM model.

What makes this project special is that FEM analysis model was made to same coordinate system than model for drawings, FEA having all same segment joints for steel girders, actual size for steel girders and actual location for stay cable anchor pipes (Figures 6 and 7).

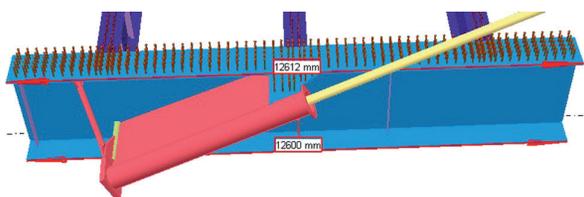


Figure 6 Main span BIM model with girders and cable pipes © WSP

Bild 6 BIM-Modell der Hauptspannweite mit Trägern und Kabelrohren © WSP

machte eine stetige Aktualisierung der Geometrieanalyse und eine Änderung einiger Spannweiten für die Schrägseile erforderlich.

3 Geometriemanagement

Bei der Planung der Brückenkonstruktion wurde sowohl für die Entwurfsphase als auch für die Werkstattzeichnungen ein vollständiges 3D-Modell der Hauptbrücke erstellt, das alle Beton- und Stahlkonstruktionen mit den tatsächlichen Abmessungen sowie alle Bewehrungsstäbe, Spannglieder und Spannstäbe im Beton enthält. Das Modell wurde nach denselben Grundsätzen erstellt, wie sie in den *„Siltojen tietomalliohje“* [4], den BIM-Richtlinien für den Brückenbau in Finnland von Vaylavorasto, beschrieben sind. Das gesamte Modell wurde nach dem aktuellen Koordinatensystem und für die Betonkonstruktionen in der geplanten endgültigen Geometrie erstellt. Für Stahlkonstruktionen wurde das Modell in der Konstruktionsplanung in der endgültigen Geometrie und für die Werkstattzeichnungen mit der geplanten Vorwölbung innerhalb der Segmente erstellt. Auf diese Weise konnten alle Koordinaten für die Strukturen anhand des BIM-Modells überprüft werden.

Das Besondere an diesem Projekt ist, dass das FEM-Analysemodell in demselben Koordinatensystem erstellt wurde wie das Modell für die Zeichnungen, und dass alle Segmentverbindungen für die Stahlträger, die tatsächliche Größe der Stahlträger und die tatsächliche Position der Schrägseilankerrohre in der FEM-Analyse enthalten waren (Bilder 6 und 7).

3.1 Integration von FEM-Analyse und Stahlbau

Als Ergebnis der FEM-Analyse wurde die Form des Stahlsegments unter Berücksichtigung der Vorwölbung in die Werkstattzeichnungen übernommen, einschließlich der Informationen über

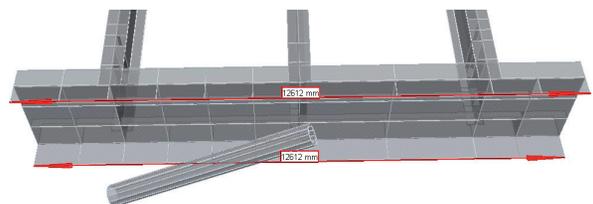


Figure 7 Main span FEA model with girders and cable pipes © WSP

Bild 7 FEA-Modell des Hauptfeldes mit Trägern und Kabelrohren © WSP

3.1 Integration of FEM analysis and steel structure fabrication

As a result of FEM analysis, steel segment fabrication shape considering precamber was given to the shop drawings design, information including displacements in x, y, and z direction [mm] and rotation around x, y, and z axes [mrad]. Fabrication geometry information was also provided in IFC format and imported to the BIM based design as a reference for modelling. Each 12.6 m long steel segment including cable anchors had precamber shape with variation at both ends, as segment was lifted by derrick and welded to previous segment. After that installation of concrete deck made deformation, smaller in fixed and and bigger at free end making it necessary to have transversal precamber to new segment shape to match previous one. By that design method rotation of stay cable pipes were able to manage accurately too. In addition of transversal precamber, the longitudinal compacting due to normal force and needed shape in segment joints were considered too, to ensure correct total width of the girders and suitable welding in segment joints. For the pylon vertical compacting, average 6 mm per segments, were considered too in the welding of the steel core segments.

3.2 Integration of FEM analysis and stage by stage construction geometry

For the measurement work on site and for geometry control for stay cable stressing, the following information were provided from the FEM analysis for all construction stages:

- ❑ Back span and side span geometry and precamber, and nodal displacements (all x, y and z) for cable anchor pipes,
- ❑ Pylon geometry and precamber, and nodal displacements (all x, y and z) for all segment joints,
- ❑ Main span geometry and precamber, and nodal displacements (all x, y and z) for all segment joints and cable anchor pipes including rotation,
- ❑ Stay cable stressing forces, and actual forces for every single construction stages,
- ❑ In addition of analysis output figures for displacement and cable forces, total about

Verschiebungen in x-, y- und z-Richtung [mm] und Verdrehungen um die x-, y- und z-Achsen [mrad]. Die Informationen zur Fertigungsgeometrie wurden auch im IFC-Format bereitgestellt und in die BIM-basierte Konstruktion als Referenz für die Modellierung importiert. Jedes 12,6 m lange Stahlsegment, einschließlich der Kabelverankerungen, hatte eine Vorwölbungsform mit Abweichungen an beiden Enden, da das Segment mit einem Derrick angehoben und mit dem vorherigen Segment verschweißt wurde. Nach dem Einbau des Betondecks kam es zu einer Verformung, die am festen kleiner und am freien Ende größer war, so dass eine transversale Vorwölbung des neuen Segments erforderlich war, um die Form des vorherigen Segments auszugleichen. Durch diese Konstruktionsmethode konnte auch die Rotation der Schrägseilrohre genau gesteuert werden. Zusätzlich zur transversalen Vorwölbung wurden auch die Längsstauchung aufgrund der Normalkraft und die erforderliche Form in den Segmentverbindungen berücksichtigt, um die korrekte Gesamtbreite der Träger und eine geeignete Schweißung in den Segmentverbindungen sicherzustellen. Für die vertikale Stauchung des Pylons wurden beim Schweißen der Stahlkernsegmente ebenfalls durchschnittlich 6 mm pro Segment berücksichtigt.

3.2 Integration von FEM-Analyse und Geometrie im Zuge der schrittweisen Herstellung

Für die Vermessungsarbeiten auf der Baustelle und die Geometriekontrolle für die Schrägseilbeanspruchung wurden aus der FEM-Analyse für alle Bauabschnitte folgende Angaben gemacht:

- ❑ Geometrie und Verwölbung im rückwärtigen Feld und in den Seitenspannweiten sowie Knotenverschiebungen (alle x, y und z) für Kabelverankerungsrohre,
- ❑ Pylongeometrie und Verformung sowie Knotenverschiebungen (alle x, y und z) für alle Segmentverbindungen,
- ❑ Geometrie und Verwölbung der Hauptspannweite und Knotenverschiebungen (alle x, y und z) für alle Segmentverbindungen und Kabelverankerungsrohre, einschließlich Rotation,
- ❑ Schrägseilspannkraft und Ist-Kräfte für die einzelnen Bauzustände,

1,600 pages, all values were exported in numeric electric format; including cable end coordinates, cable forces and deformations, pylon coordinates and displacements and main soan steel segment coordinates and displacements. This information was imported to the measurement plan by the contractor.

For example, the following changes in the geometry were noticed to be considered in the construction:

- Back span longitudinal compacting: max 56 mm due to normal force, creep and shrinkage,
- Back span precamber: max -80 mm (need negative precamber),
- Variable pylon longitudinal displacement: -200 to +100 mm,
- Pylon leg transversal displament: max 142 mm precamber outwards,
- Main span steel girder compacting: about 6 mm per segment,
- Main span cantilever tip displacement: max +424 mm, min -555 mm.

The following stages for the steel segment in the middle of the main span describe construction stages and displacement variation in the segment tip (Figure 8):

- Concreting pylon: +307 mm,
- Install cladding: +303 mm,
- Creep and shrinkage: +304 mm,
- Move derrick: +209 mm,
- Lift next segment : +58 mm,
- Fix segment: +91 mm,
- Add temporary structures: +92 mm,
- Release segment: +68 mm,
- Concreting next segment in the pylon: +75 mm, ...

The values above were from latest construction stage analysis, and were updated when the plan for final geometry adjustment was done.

Zusätzlich zu den Berechnungsergebnissen für die Verschiebungen und Seilkräfte, insgesamt etwa 1.600 Seiten, wurden alle Werte im numerischen (digitalen) Format exportiert; einschließlich der Koordinaten der Seilenden, der Seilkräfte und -verformungen, der Koordinaten und Verschiebungen des Pylons und der Koordinaten und Verschiebungen der Stahlsegmente der Hauptträger. Diese Informationen wurden vom Auftragnehmer in den Messplan importiert.

So wurden z. B. folgende Änderungen der Geometrie festgestellt, die zu berücksichtigen waren:

- Rückspanweite, Längsstauchung: max. 56 mm infolge Normalkraft, Kriechen und Schwinden,
- Rückspanweite, Verwölbung: max -80 mm (negative Vorwölbung erforderlich),
- Variable Pylonlängsverschiebung: -200 bis +100 mm,
- Querverschiebung der Pylonbeine: max 142 mm Verwölbung nach außen,
- Stahlträger des Hauptfeldes: gestaucht um 6 mm pro Segment,
- Auskragung der Hauptspanweite: max +424 mm, min -555 mm.

Die folgenden Zustände für das Stahlsegment in der Mitte der Hauptspanweite beschreiben die Bauphasen und die Veränderung der Verschiebung in der Segmentspitze (Bild 8):

- Betonieren des Pylons: +307 mm,
- Einbau der Verkleidung: +303 mm,
- Kriechen und Schwinden: +304 mm,
- Derrick versetzen: +209 mm,
- Nächstes Segment anheben: +58 mm,
- Segment befestigen: +91 mm,
- Temporäre Unterstützungen hinzufügen: +92 mm,
- Segment freigeben: +68 mm,
- Nächstes Segment im Pylon betonieren: +75 mm, ...

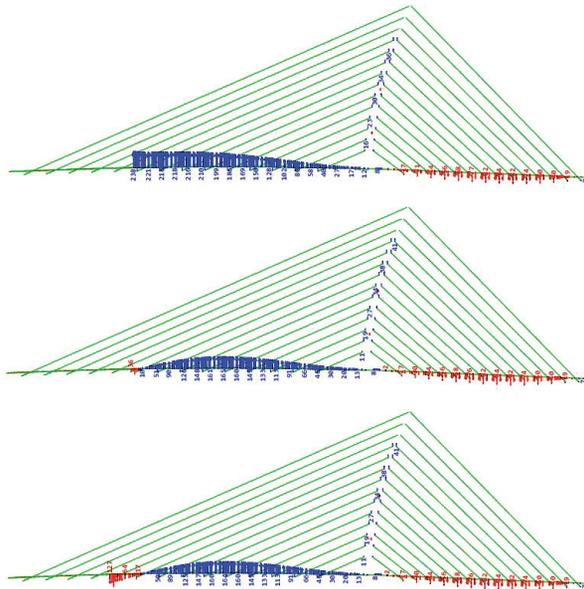


Figure 8 Cantilever tip displacement; from top to bottom: move derrick, lift segment and fix segment © WSP

Bild 8 Verschiebungen der auskragenden Spitze; von oben nach unten: Derrick bewegen, Segment anheben und Segment fixieren © WSP

3.3 Construction geometry adjustment

During the cantilever construction, although all the main construction stages did follow the same stages than in analysis, it was recognized that the main span geometry construction stage analysis did not describe the structure's behaviour absolutely accurate. It was found out that the deadload of the structure is slightly higher, as there were ~4...5% more force in the stays. That was found reason to the built geometry as the cantilever tip was surveyed roughly 200 mm lower than the CSA calculated values.

Therefore the comprehensive study was performed including geometry surveys, weight calculations and cable lift off tests. Also, the reinforcement ratio of the concrete was checked and nominal weight of the concrete was updated, instead of typical value 25 kN/m³ corrected value for precast elements 25,5 kN/m³ was used. All these values were updated to analysis to make a plan for final geometry adjustment.

4 Conclusions

The geometry analysis for stage by stage construction, especially when using free cantilever

Die oben genannten Werte stammen aus der letzten Analyse der Bauphase und wurden aktualisiert, als der Plan für die endgültige Geometrieanpassung erstellt wurde.

3.3 Anpassung der Konstruktionsgeometrie

Während des Freivorbau wurde festgestellt, dass durch die Vorabanalyse das Strukturverhalten der Hauptspanweite nicht absolut genau beschrieben wird, obwohl alle Hauptbauphasen berücksichtigt wurden. Es wurde festgestellt, dass die Konstruktionseigenlast etwas höher ist, da ~4...5 % mehr Kraft in den Abstützungen vorhanden war. Dies wurde auf die gebaute Geometrie zurückgeführt, da die Auslegerspitze etwa 200 mm niedriger lag als die von CSA berechneten.

Daher wurde eine gründliche Studie durchgeführt, die die Vermessung der Geometrie, Gewichtsberechnungen und Abhebetests für die Kabel umfasste. Außerdem wurde der Bewehrungsgrad des Betons überprüft und das Nenngewicht des Betons aktualisiert, wobei anstelle des typischen Werts von 25 kN/m³ der korrigierte Wert für Fertigteilelemente von 25,5 kN/m³ verwendet wurde. Alle diese Werte wurden in der Berechnung aktualisiert, um einen Plan für die endgültige Geometrieanpassung zu erstellen.

4 Fazit

Die geometrische Berechnung für die etappenweise Herstellung, insbesondere bei Anwendung der Freivorbbaumethode, ist eine anspruchsvolle Aufgabe, da es bei der Realisierung immer Unsicherheiten gibt. Bei diesem Projekt wurde während des Baus festgestellt, dass die Geometrie der Hauptspanweite zu einer etwas geringeren Höhe der Kragarmspitze führte, obwohl alle realisierten Hauptbauphasen denen der Berechnung folgten.

Da die Hauptspanweite 200 m und die längste Auskragung 193 m betrug, ist ein Unterschied von 200 mm nicht sehr groß, da es noch einige Unwägbarkeiten bei der Baulast gab, wie z. B. die Aufbewahrung zusätzlicher Baugeräte und die Lagerung von Baumaterial auf dem Brückendeck.

Als Schlussfolgerung für die Integration von FEM-Analyse und Baugeometriemanagement kann festgestellt werden, dass die Erstellung

method, is a challenging task, as there are always uncertainties in the construction. In this project it was noticed during construction that even all the main construction stages did follow same stages than in analysis, the main span geometry started to lead a bit lower elevation for tip of cantilever.

As the main span is 200 m and longest cantilever was about 193 m, it can be noticed that 200 mm difference is not high, as there were still some uncertainties in the construction load, such keep some additional construction equipment and store some construction material on the deck.

As a conclusion for integration of FEM analysis and construction geometry management it can be stated that making accurate analysis model with actual geometry together with using BIM gave a huge benefits for the construction. The biggest benefits were in the fabrication of steel structures, as precamber shape was very accurate and there were no any problems in the erection and construction in the matter of fit segments and all structures to each others. The second high benefit as well was opportunity to transfer information in electric format, both numerical and 3D geometry between design, analysis and construction. That made measurement work more easy, as well as quality control in design and construction.

For author of this article, as a project manager for Thu Thiem 2 bridge design, this project was first cable stayed bridge project where full integration of BIM was done from engineering design to construction, including FEM analysis. It could be said that this project is presenting outstanding sample for digitalization in bridge design development.

References

- [1] Svensson, H.: Cable stayed Bridges. 40 Years of Experience Worldwide. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2012
- [2] Vietnamese National Standard 22-TCN-272-05: Specification for Bridge Design. 2005
- [3] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 2nd Edition, 1998, SI units. American Association of State Highway and Transportation Officials; 1998
- [4] Siltojen tietomalliohje. 6-2014. Liikenneviraston ohjeita. (in English: BIM guidelines for bridge design, 6-2014, Finnist Transport Agency)

eines genauen Berechnungsmodells mit der tatsächlichen Geometrie zusammen mit der Verwendung von BIM enorme Vorteile für die Bauausführung mit sich brachte. Die größten Vorteile ergaben sich bei der Herstellung der Stahlkonstruktionen, da die Vorverformung sehr genau war und es bei der Errichtung und Konstruktion keine Probleme bei der Anpassung der Segmente und aller Strukturelemente aneinander gab. Der zweite große Vorteil war die Möglichkeit, Informationen – sowohl numerische als auch 3D-Geometrien – digital zwischen Entwurf, Berechnung und Konstruktion zu übertragen. Dies erleichterte die Vermessungsarbeiten sowie die Qualitätskontrolle in Design und Konstruktion.

Für den Autor dieses Artikels als Projektleiter der Thu-Thiem-2-Brücke war dieses Projekt das erste Schrägseilbrückenprojekt, bei dem die vollständige Integration von BIM von der technischen Planung bis zur Konstruktion, einschließlich FEM-Analyse, durchgeführt wurde. Man kann sagen, dass dieses Projekt ein hervorragendes Beispiel für die Digitalisierung des Brückenentwurfs darstellt.

Literatur

- [1] Svensson, H.: Cable stayed Bridges. 40 Years of Experience Worldwide. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2012
- [2] Vietnamese National Standard 22-TCN-272-05: Specification for Bridge Design. 2005
- [3] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 2nd Edition, 1998, SI units. American Association of State Highway and Transportation Officials; 1998
- [4] Siltojen tietomalliohje. 6-2014. Liikenneviraston ohjeita. (in English: BIM guidelines for bridge design, 6-2014, Finnist Transport Agency)

Übersetzung: Silke Scheerer

- 7 Herzlich willkommen zum 31. Dresdner Brückenbausymposium 2022
- 11 Grußwort des Sächsischen Staatsministers für Regionalentwicklung
- 13 Brücken auf geokunststoffbewehrten Widerlagern – schnell, umweltgerecht und kostengünstig
- 27 Brücken mit Verbunddübelleisten – Entwurf, Bemessung und Ausführungsbeispiele
- 43 Die Filstalbrücken im Zuge der NBS Wendlingen–Ulm – Integrale Bauwerke mit besonderen statisch-konstruktiven Herausforderungen
- 57 Zugglieder aus Faserverbundwerkstoff im Brückenbau – Besonderheiten beim Einsatz von Netzhängern aus Carbon
- 75 Verstärken von Bestandsstrukturen mittels Verbundankerschrauben
- 89 Verstärkung von Stahl- und Spannbetonbrücken mit Carbonbeton – Aktuelles aus Praxis und Forschung
- 107 Integration of FEM Analysis and Construction Geometry Management on the Example of the Thu Thiem 2 Cable Stayed Bridge
- 121 Brückendenkmalpflege – Erfahrungen aus Baden-Württemberg
- 139 smartBRIDGE Hamburg – die Brückeninstandhaltung der Zukunft
- 151 Risikobasiertes Anlagemanagement der Brücken der SBB – Methode und erste Anwendungserfahrungen
- 163 Die Schorgasttalbrücke – Herzstück der Ortsumgehung Untersteinach
- 175 Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton
- 191 Fertigung und Montage der Chenab Railway Bridge in Indien – Ein Erfahrungsbericht
- 207 Chronik des Brückenbaus