



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau [www.massivbau.tu-dresden.de](http://www.massivbau.tu-dresden.de)



# 28. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG  
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

12./13. MÄRZ 2018

© 2018 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: Plougastel Bridge, entnommen aus: Fernández Ordóñez, J. A.: Eugène Freyssinet.  
Barcelona: 2C Ediciones, 1978.

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



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

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

---

# **Tagungsband 28. Dresdner Brückenbausymposium**

Institut für Massivbau  
Freunde des Bauingenieurwesens e.V.  
TUDIAS GmbH

12. und 13. März 2018

## Inhalt

<b>Herzlich willkommen zum 28. Dresdner Brückenbausymposium</b> .....	<b>9</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen</i>	
<b>Vorwort zum 28. Dresdner Brückenbausymposium</b> .....	<b>13</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
<b>Bauwerksentwürfe nach RE-ING – Was ist neu?</b> .....	<b>17</b>
<i>TRDir Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn, TORR'in Yvonne-Christine Gunreben</i>	
<b>Development of cable-stayed bridges in China</b> <b>Entwicklung von Schrägkabelbrücken in China</b> .....	<b>25</b>
<i>Yaojun Ge, Professor and PhD</i>	
<b>Vom Rechnen und Wissen – Monitoring an den Talbrücken</b> <b>der Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle</b> .....	<b>41</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx, Dipl.-Ing. Marc Wenner, Dipl.-Ing. Max Käding, Frederik Wedel M. Sc.</i>	
<b>Nachrechnung und Ertüchtigung der Siegtalbrücke –</b> <b>größte Spannbetonbrücke der Sauerlandlinie (A45)</b> .....	<b>59</b>
<i>Dr.-Ing. Karlheinz Haveresch</i>	
<b>Der Rückbau der Lahntalbrücke Limburg (1964)</b> .....	<b>73</b>
<i>Dr.-Ing. Stefan Franz, Dipl.-Ing. Frank Ansorge</i>	
<b>Einsatz unbemannter Flugsysteme im Brückenbau</b> .....	<b>87</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto, Dipl.-Ing. Cornell Weller</i>	
<b>Eugène Freyssinet: “I was born a builder”</b> .....	<b>101</b>
<i>Dr.-Ing. David Fernández-Ordóñez</i>	
<b>Realisierung der Kienlesbergbrücke in Ulm – gestalterische</b> <b>und bauliche Herausforderungen im komplexen Baukontext</b> .....	<b>129</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Jan Akkermann, Dipl.-Ing. Bartłomiej Halaczek</i>	
<b>Die Taminabrücke in der Schweiz, der Heimat großer Brückenbauingenieure</b> .....	<b>141</b>
<i>Dipl.-Ing. Volkhard Angelmaier</i>	
<b>100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke</b> .....	<b>157</b>
<i>Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka, Prof. Dr.-Ing. Uwe Willberg, Dipl.-Ing. Georg Müller, Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen</i>	
<b>Lebenszyklus- und Qualitätsspezifikationen für Ingenieurbauwerke</b> .....	<b>169</b>
<i>Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Alfred Strauss, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Lener, Dipl.-Ing. Johannes Schmid, Ass. Prof. Jose Matos, Univ. Prof. Joan R. Casas</i>	
<b>Versagenhäufigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit von Brücken</b> .....	<b>189</b>
<i>Dr.-Ing. habil. Dirk Proske</i>	
<b>Brückenvielfalt rund um die Ostsee – Bericht zur Brückenexkursion 2017</b> .....	<b>203</b>
<i>Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Dipl.-Ing. Sebastian May</i>	
<b>Chronik des Brückenbaus</b> .....	<b>215</b>
<i>Zusammengestellt von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner</i>	
<b>Inserentenverzeichnis</b> .....	<b>231</b>

## Development of cable-stayed bridges in China

### Entwicklung von Schrägkabelbrücken in China<sup>1</sup>

**Yaojun Ge, Professor and PhD**

*Tongji University, Department of Bridge Engineering*

#### 1 Introduction

The research and development and project construction for cable-stayed bridges in China began in the late 1970s and early 1980s. After more than 10 years of technology import, research and engineering practice, in 1991, Chinese engineers independently completed a steel and concrete composite girder cable-stayed bridge with the main span of 423 m, Shanghai Nanpu Bridge (Fig. 1) [1], whose span ranked third over the world at that time. The successful self-construction of the Shanghai Nanpu Bridge greatly inspired the spirit of the Chinese bridge engineering community, and created the climax of the self-construction cable-stayed bridges.

Two years later, another composite-girder cable-stayed bridge was built, whose span created a new world record at that time. That was the 602 m spanned Shanghai Yangpu Bridge (Fig. 2) [2]. After that, in 2001 and 2005, the main span of the cable-stayed bridge was enlarged step by step to 628 m of the Second Nanjing Bridge across Yangtze River (Fig. 3) [3] and 648 m of the Third Nanjing

#### 1 Einleitung

Forschung und Entwicklung von Schrägseilbrücken in China sowie erste Bauprojekte begannen in den späten 1970er und frühen 1980er Jahren. Nach mehr als 10 Jahren Technologieimport, Forschung und Ingenieurpraxis wurde 1991 erfolgreich die Shanghai Nanpu Bridge errichtet – eine Schrägseilbrücke mit Stahl-Beton-Verbundträger und einer Hauptspannweite von 423 m (Bild 1, [1]). Zu dieser Zeit bedeutete diese Spannweite den dritten Rang weltweit. Die Verwirklichung dieser Brücke inspirierte den Geist der chinesischen Brückenbauingenieure stark und bildete einen Höhepunkt des chinesischen Schrägseilbrückenbaus.

Zwei Jahre später wurde eine weitere Schrägseilbrücke mit einem Versteifungsträger in Stahl-Beton-Verbundbauweise fertiggestellt, deren Spannweite damals einen neuen Weltrekord bedeutete.

<sup>1</sup> Übersetzung: Dr.-Ing. Silke Scheerer, Institut für Massivbau, TU Dresden



Fig. 1 Shanghai Nanpu Bridge

Bild 1 Shanghai-Nanpu-Brücke

Photo: Kimon Berlin, CC BY-SA 2.0, Wikimedia.commons



Fig. 2 Shanghai Yangpu Bridge

Bild 2 Shanghai-Yangpu-Brücke

Photo: Putneymark, CC BY-SA 2.0, Wikimedia.commons



Fig. 3 Second Nanjing Bridge across Yangtze River

Bild 3 Zweite Nanjing-Brücke über den Jangtse

Photo: Glabb, CC BY-SA 3.0, Wikimedia.commons



Fig. 4 Third Nanjing Bridge across Yangtze River

Bild 4 Dritte Nanjing-Brücke über den Jangtse

Photo: J. Ye, CC BY-SA 2.0, Wikimedia.commons



Fig. 5 Sutong Bridge across Yangtze River

Bild 5 Sutong-Brücke über den Jangtse

Photo: Glabb, CC BY-SA 3.0, Wikimedia.commons



Fig. 6 Hong Kong Stonecutters Bridge

Bild 6 Stonecutters Bridge in Hongkong

Photo: Minghong, Wikimedia.commons

Bridge across Yangtze River (Fig. 4) [4]. In 2008, the 1088 m spanned Sutong Bridge across Yangtze River (Fig. 5) [5] was set up a new world record of the main span length of the cable-stayed bridge. In 2009, Hong Kong Stonecutters Bridge with the main span of 1018 m (Fig. 6) [6] was also successfully completed.

Es handelte sich um die 602 m spannende Shanghai Yangpu Bridge (Bild 2, [2]). Danach wurde in den Jahren 2001 und 2005 die Hauptspannweite von Schrägseilbrücken Schritt für Schritt zuerst auf 628 m bei der Zweiten Nanjing-Brücke bzw. auf 648 m bei der Dritten Nanjing-Brücke, beide über den Jangtsefluss, erneut erhöht (Bilder 3



Fig. 7 Jingzhou Bridge across Yangtze River

Bild 7 Jingzhou-Brücke über den Jangtse

Photo: Popolon, CC BY-SA 3.0, Wikimedia.commons



Fig. 8 Wuhan Tianxingzhou Bridge across Yangtze River, 2009 short before finished

Bild 8 Wuhan Tianxingzhou Bridge über den Jangtse, 2009 kurz vor ihrer Fertigstellung

Photo: Duve, CC BY-SA 3.0, Wikimedia.commons

## 2 Construction Achievements

China has not only created the world record for main span of cable-stayed bridges by two times, but also kept several type span records of cable-stayed bridges. For example, Jingzhou Bridge across Yangtze River (Fig. 7) [7] with the main span of 500 m built in 2002 is the longest concrete girder cable-stayed bridge in the world, Wuhan Tianxingzhou Bridge across Yangtze River (Fig. 8) [8] with the main span of 502 m built in 2008 is the longest railway cable-stayed bridge in the world, and Erqi Yangtze River Bridge in Wuhan across Yangtze River (Fig. 9) [9] with the main spans of  $2 \times 616$  m built in 2011 is the longest multi-pylon cable-stayed bridge in the world.

After the first cable-stayed bridge with a main span over 400 m, Shanghai Nanpu Bridge, was built in China in 1991, many more bridges were built, including [10]:

- ❑ 64 cable-stayed bridges with main spans longer than 400 m have been completed in China until today, accounts for 52% of the total 123 cable-stayed bridges in the world,
- ❑ 21 cable-stayed bridges with main spans over 600 m, accounts for 58% of the total 36 cable-stayed bridges in the world,
- ❑ 5 cable-stayed bridges with the main spans of over 800 m, accounts for 56% of the total 8 cable-stayed bridges in the world and
- ❑ 2 cable-stayed bridges with the main spans of over 1000 m among only 3 in the world.



Fig. 9 Erqi Yangtze River Bridge in Wuhan  
Bild 9 Erqi-Brücke in Wuhan über den Yangtze  
Photo: Glabb, CC BY-SA 3.0, Wikimedia.commons

und 4, [3], [4]). Im Jahr 2008 folgte die Sutong-Brücke, ebenfalls über den Jangtse (Bild 5, [5]), mit einer Hauptspannweite von 1088 m – einem neuen Weltrekord bei Schrägseilbrücken. 2009 wurde die Hongkong Stonecutters Bridge mit einer Hauptspannweite von 1018 m (Bild 6, [6]) sukzessive fertiggestellt.

## 2 Erfolge im Brückenbau

China hat nicht nur den Weltrekord für die Hauptspannweite von Schrägseilbrücken zweimal aufgestellt, sondern auch weitere Spannweiten-Rekorde bei Schrägseilbrücken zu verzeichnen. Zum Beispiel ist die 2002 gebaute Jingzhou-Brücke (Bild 7, [7]) mit einer Hauptspannweite von 500 m die Schrägseilbrücke mit dem längsten Beton-Fahrbahnträger der Welt. Die Wuhan-Tianxingzhou-Brücke (Bild 8, [8]), 2008 mit 502 m Hauptspannweite errichtet, ist die längste Eisenbahn-Schrägseilbrücke weltweit, und die Wuhan-Erqi-Brücke (Bild 9, [9]), gebaut 2011, ist mit Hauptspannweiten von  $2 \times 616$  m die längste Schrägseilbrücke der Welt mit mehreren Pylonen. Alle diese Brücken überspannen den Yangtze River.

Nachdem in China 1991 mit der Shanghai Nanpu Bridge die erste Schrägseilbrücke mit einer Hauptspannweite von über 400 m gebaut worden war, wurden hier viele weitere errichtet, u. a. mittlerweile [10]:

- ❑ 64 Schrägseilbrücken mit mehr als 400 m Hauptspannweite (das entspricht einem Anteil von 52 % der insgesamt 123 Schrägseilbrücken auf der Welt in dieser Größenordnung),
- ❑ 21 Schrägseilbrücken mit Hauptspannweiten über 600 m (58 % der insgesamt 36 Schrägseilbrücken weltweit),
- ❑ fünf Schrägseilbrücken mit Hauptspannweiten über 800 m (entspricht 56 % der insgesamt acht Schrägseilbrücken dieser Gruppe auf der Welt) und
- ❑ zwei Schrägseilbrücken mit Hauptspannweiten von über 1000 m, wovon es weltweit nur drei gibt.

Table 1 shows the top ten longest span cable-stayed bridges completed around the world, which includes six bridges in China, and one in Russia, Japan, France, and South Korea, respectively. Therefore, China has truly become a leading country to build long-span cable-stayed bridges.

Tabelle 1 zeigt die Top Ten der Schrägseilbrücken mit den weltweit längsten Spannweiten. Sechs davon befinden sich in China, jeweils eine in Russland, Japan, Frankreich und Südkorea. Daher kann zu Recht gesagt werden, dass China zu einem führenden Land beim Bau von langen Schrägseilbrücken geworden ist.

Table 1 Top ten longest span cable-stayed bridges in the world [10]

Tabelle 1 Top Ten der Schrägseilbrücken mit den längsten Spannweiten weltweit [10]

No. Nr.	Year Baujahr	Bridge's name Brücke	Span Spannweite (m)	Girder Versteifungsträger *)	Country Land
1	2012	Russky Bridge	1104	Steel box   Stahlhohlkasten	Russia
2	2008	Sutong Bridge	1088	Steel box   Stahlhohlkasten	China
3	2009	Stonecutters Bridge	1018	Twin box   Zwillingkasten	China
4	2010	E'dong Bridge	926	Isolated box **)	China
5	1999	Tatara Bridge	890	Steel box   Stahlhohlkasten	Japan
6	1995	Normandy Bridge	856	Steel box   Stahlhohlkasten	France
7	2013	Jiujiang Bridge	818	Steel box   Stahlhohlkasten	China
8	2010	Jingyue Bridge	816	Steel box   Stahlhohlkasten	China
9	2009	Incheon Bridge	800	Steel box   Stahlhohlkasten	Korea
10	2013	Xiazhang Bridge	780	Steel box   Stahlhohlkasten	China

\*) valid for all these bridges: spatial cables and problem of rain-wind induced vibration of stay cables; links to further information about construction can be found at [10]

\*\*)two parallel steel hollow boxes, on the top: orthotropic deck plate; the lower slab was omitted [11]

\*) gültig für alle diese Brücken: räumliche Kabelanordnung, Hauptherausforderung sind die Schwingungen der Schrägseile, induziert durch Regen und Wind; Links zu weiteren Informationen hinsichtlich der Baukonstruktionen sind in [10] zu finden.

\*\*)zwei parallel liegende Stahlhohlkästen, oben: Abschluss mit orthotroper Fahrbahnplatte; die untere Bodenplatte wurde weggelassen [11]

### 3 Wind resistance

With the rapid increase of the span length, cable-stayed bridges are becoming longer, lighter and more flexible, which results not only in static and dynamic problems, but also aerodynamic issues related to flutter instability, vortex induced vibration, cable vibration and so on. In order to clarify the wind-resistance problem of completed long-span cable-stayed bridges, Table 1 gives ten longest span cable-stayed bridges around the world. Without exception, all of them adopt the flat steel box girders, which have a good aerodynamic performance, and spatial cables. As a result, no aerodynamic instability problem was found, but the rain-wind induced vibration of stay

### 3 Windwiderstand

Mit der rasanten Zunahme der Spannweiten wurden Schrägseilbrücken länger, leichter und flexibler, was nicht nur zu statischen und dynamischen Problemen führt, sondern auch zu aerodynamischen, wie z. B. hinsichtlich dynamischer Instabilität (Flattern), durch Verwirbelungen und Wirbelablösung induzierte Schwingungen, Kabelschwingungen etc. Um das Problem des Windwiderstands von fertiggestellten Schrägkabelbrücken großer Spannweite zu verdeutlichen, sind in Tabelle 1 die zehn Schrägseilbrücken mit den längsten Spannweiten auf der ganzen Welt zusammengestellt. Sie alle besitzen ausnahmslos aerodynamisch vorteilhafte flache Kastenträger

cables has always been a crucial problem, especially for long cables. Aerodynamic countermeasures, such as spiral wires and dimples, and mechanical dampers are commonly-used to control the level of vibration.

Although above-mentioned long-span cable-stayed bridges only suffer the problem of rain-wind induced vibration of stay cables and have no aerodynamic instability problem, several underlying flutter problems were found in some cable-stayed bridges with relatively smaller span which have adopted the bluff body section girder. And some aerodynamic countermeasures were taken before these bridges were completely designed and constructed. Table 2 presents six completed cable-stayed bridges with relatively smaller span in china, but all of them had flutter problems at preliminary design stage. The spans of these six bridges range from 332 m to 688 m. Apart from the Xiangshan Port Bridge with a steel box girder and the Main Navigation Channel Bridge of Donghai Bridge with steel-concrete composite box girder, other four bridges all employ I-shaped steel girder with concrete deck slab which have bluff aerodynamic configurations. And the spatial effects of stay cables are insufficient except Xiangshan Port Bridge and Wuhan Erqi Yangtze River Bridge. Consequently, flutter instability problem is decisive for these bridges. By conducting wind tunnel tests, a series of flutter control countermeasures, such as lowering the rail base, the central stabilizer, the apron board at two sides, the wind fairing and changing the position of maintenance rail, were adopted to meet the demand of flutter checking wind speed as stated in the Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges [12].

#### 4 Exploration of super-long span

According to the recent research achievements on ultimate span of cable-stayed bridge, it was found that the axial compressive force of the girder is the dominant static factor to restrict the growth of span for cable-stayed bridges. A formula for calculating the ultimate span of cable-stayed bridge was derived by introducing the axial compressive force of the girder as a key parameter. Based on the assumption that the ratio of the span to tower height is equal to 5, the ultimate spans of cable-stayed bridges with different materials of the girder are obtained by the presented formula, namely, 1857 m for Q345qD steel, 2228 m for Q420qD steel and 2414 m for Q460qD, respectively. Consequently, 2500 m can be regarded as the ultimate span of the cable-stayed bridges [13], [14].

als Versteifungsträger und eine räumliche Kabelanordnung, die gegenüber der Anordnung von Kabeln in einer einzigen mittigen Ebene oder in zwei parallelen Ebenen eine deutlich höhere aerodynamische Stabilität erzeugt. Als Folge dessen spielten aerodynamische Instabilitäten eine untergeordnete Rolle, aber die Regen-Wind-induzierten Schwingungen der Schrägseile waren immer das Schlüsselproblem, insbesondere bei langen Kabeln. Aerodynamische Gegenmaßnahmen, wie Störseile oder mechanische Schwingungsdämpfer werden üblicherweise verwendet, um die Schwingungen zu kontrollieren.

Obwohl die oben erwähnten Schrägseilbrücken mit großer Spannweite nur das Problem der Regen-Wind-induzierten Vibration der Schrägseile haben und kein aerodynamisches Instabilitätsproblem, wurden bei einigen Schrägseilbrücken mit relativ kleiner Spannweite einige grundlegende Probleme hinsichtlich Flatterns gefunden, welche mit der aerodynamisch ungünstigen Gestaltung des Fahrbahnträgers zusammenhängen. Hier wurden einige Gegenmaßnahmen ergriffen, bevor diese Brücken endgültig entworfen und gebaut wurden. Tabelle 2 zeigt sechs fertiggestellte Schrägseilbrücken mit relativ kleiner Spannweite in China, die alle im Vorentwurf Probleme mit Flattern aufgewiesen hatten. Die Spannweiten dieser sechs Brücken reichen von 332 m bis 688 m. Abgesehen von der Xiangshan Port Bridge (Stahlkastenträger) und der Main Navigation Channel Bridge der Donghai-Brücke (Stahl-Beton-Verbundkastenträger) waren die Hauptträger der Brücken in Form von I-förmigen Stahlträgern mit Betondeckplatte geplant worden und wiesen somit ein aerodynamisch ungünstiges Profil auf. Bis auf die Xiangshan Port Bridge und die Wuhan Erqi Yangtze River Bridge war die Anordnung der Schrägkabel unzureichend. Folglich ist das Flattern der Kabel für diese Brücken entscheidend. In Windkanalversuchen wurden verschiedene Maßnahmen gegen das Flattern überprüft, z. B. das Absenken des Schienenunterbaus, ein zentraler Stabilisator, Ablenkplatten bzw. Windabweiser oder -verkleidungen und das Verändern der Position der Wartungsschiene. Mit Hilfe derartiger Maßnahmen können die Anforderungen aus den Entwurfsvorschriften für Autobahnbrücken [12] erfüllt werden.

#### 4 Untersuchung von extra großen Spannweiten

Jüngste Untersuchungen zur Grenzspannweite von Schrägseilbrücken haben ergeben, dass die Drucknormalkraft im Versteifungsträger der dominierende statische Faktor zur Begrenzung des

Table 2 Flutter problem and countermeasures for cable-stayed bridges in China

Tabelle 2 Schrägkabelbrücken in China mit aerodynamischen Problemen durch Flattern und Gegenmaßnahmen

No. Nr.	Built Baujahr	Bridge name Brücke	Span Spannweite (m)	Girder Hauptträger	Cables Kabel	Countermeasure against flutter Maßnahmen gegen Flattern
1	2012	Xiangshan Bridge	688	Box Kastenträger	Spatial räumlich	Lowering rail base Absenken Schienenunterbau
2	2011	Wuhan Erqi Bridge	616	Composite Verbundquerschnitt	Spatial räumlich	Central stabilizer zentraler Stabilisator
3	2001	Qingzhou Bridge	605	Composite Verbundquerschnitt	Spatial räumlich	Apron board Windabweiser/Ablenkplatten
4	1991	Nanpu Bridge	423	Composite Verbundquerschnitt	Spatial räumlich	Apron board Windabweiser/Ablenkplatten
5	2005	Main Navigation Channel Bridge of Donghai Bridge	420	Composite Verbundquerschnitt	Single eine Kabелеbene	Maintenance rail gantry Position der Wartungsschiene
6	2005	Kezhushan Bridge of Donghai Bridge	332	Composite Verbundquerschnitt	Parallel 2 parallele Ebenen	Wind fairing Windverkleidung

With the reference to the statistical results of the design parameters of the component type and the general layout of the current completed cable-stayed bridges, four cable-stayed bridges with different main spans  $L$ , namely,  $L = 1000$  m,  $1500$  m,  $2000$  m, and  $2500$  m, were modelled by treating the axial compressive stress of the girder as the dominant parameter (Fig. 10). By taking the cross section of Sutong Bridge as the model prototype, the static performances of these four proposals were compared with the completed Sutong Bridge. It was found that the strength and stiffness of the structures can meet the requirements. However, the girder depth for the bridge with the main span of  $2000$  m has to be increased before its static stability can be guaranteed. And for the bridge with the main span of  $2500$  m, the static stability standard still cannot be satisfied if its girder depth is increased.

The dynamic properties of these four design proposals were analysed by finite element method. As shown in Table 3, first two lateral bending, vertical bending and torsional frequencies are listed and compared with Sutong Bridge. The ratios of first order longitudinal floating frequency, lateral bending frequency, vertical bending frequency, and torsional frequency of these four proposals are  $1:0.76:0.59:0.49$  |  $1:0.47:0.29:0.18$  |  $1:0.71:0.59:0.46$  and  $1:0.77:0.67:0.58$ , respec-

Spannweitenwachstums für Schrägseilbrücken ist. Es wurde eine Formel zur Berechnung dieser endgültigen Spannweite von Schrägseilbrücken abgeleitet, in welcher die Drucknormalkraft im Längsträger als Schlüsselparameter eingeführt wurde. Ausgehend von der Annahme, dass das Verhältnis von Spannweite zu Pylonhöhe gleich  $5$  ist, konnten die Grenzspannweiten von Schrägseilbrücken mit unterschiedlichen Werkstoffen für den Hauptträger bestimmt werden. Bei Verwendung von verschiedenen Stahlsorten ergeben sich bspw. folgende Werte: maximal  $1857$  m für Q345qD-Stahl,  $2228$  m für Q420qD-Stahl und  $2414$  m für Q460qD. Folglich können  $2500$  m als maximale Grenzspannweite für Schrägseilbrücken angesehen werden [13], [14].

In Anlehnung an verschiedene variierende Entwurfparameter, den Bautyp und die allgemeine Gestaltung derzeit fertiggestellter Schrägseilbrücken wurden vier Schrägseilbrücken mit unterschiedlichen Hauptspannweiten  $L = 1000$  |  $1500$  |  $2000$  |  $2500$  m modelliert, wobei die Drucknormalkraft des Hauptträgers als dominanter Parameter behandelt wurde (Bild 10). Der Querschnitt der Sutong-Brücke diente als Referenz. Durch einen Vergleich mit der fertiggestellten Sutong-Brücke wurde die statische Leistungsfähigkeit der vier Vorschläge bewertet. Es wurde festgestellt, dass Tragfähigkeit und Steifigkeit der virtuellen

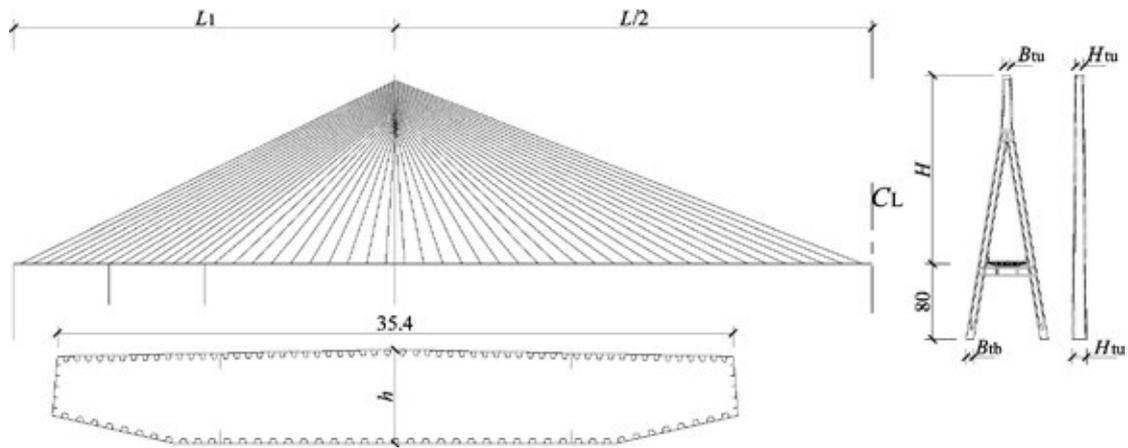


Fig. 10 Layout of the cable-stayed bridges with main spans from 1000 m to 2500 m

Bild 10 Gestaltung der Schrägkabelbrücken mit Spannweiten zwischen 1000 und 2500 m

Drawing: by the author

tively. It means that with the increase of the main span, the lateral bending frequency suffers the fastest decrease followed by vertical bending and floating frequencies and torsional frequency reduces the slowest. Besides, the effects of bridge girder, tower and stay cables on the dynamic properties of bridges were also studied. It was shown that the increase of the girder depth contributes to the raise of structural basic frequencies, but the increase of girder width would reduce the basic torsional frequency. The height and stiffness of the bridge tower have little influence on the structural basic frequencies. The use of carbon-fibre reinforced polymer (CFRP) for stay cables will remarkably increases the structural basic frequencies with the increase of the main span of the bridges [14].

Strukturen die Anforderungen erfüllen können. Allerdings musste die Trägerhöhe für die Brücke mit der Hauptspannweite von 2000 m erhöht werden, um die statische Stabilität gewährleisten zu können. Bei der Brücke mit 2500 m Hauptspannweite wäre allerdings eine solche Modifikation der Trägergeometrie noch immer nicht ausreichend, um dies zu garantieren.

The wind-resistance design for these four bridges includes the static wind-induced response, aerostatic stability and flutter stability. Under the design static wind load, the stress of the bridge girder will exceed the design requirement for the

Die dynamischen Eigenschaften dieser vier Designvorschläge wurden mit der Finite-Elemente-Methode analysiert. In Tabelle 3 sind verschiedene Frequenzen aufgelistet und mit den zugehörigen Werten der Sutong-Brücke verglichen. Die Verhältnisse zwischen der Frequenz erster Ordnung in Brückenlängsrichtung, der Quer- und vertikalen Biegefrequenzen und der Torsionsfrequenz der vier Entwürfe lauten 1:0,76:0,59:0,49 | 1:0,47:0,29:0,18 | 1:0,71:0,59:0,46 und 1:0,77:0,67:0,58. Dies bedeutet, dass mit der Zunahme der Hauptspannweite die Querbiegefrequenz am schnellsten abnimmt, die Torsionsfrequenz hingegen verringert sich am langsamsten.

Table 3 Dynamic properties of cable-stayed bridges with main spans from 1000 m to 2500 m [14]

Tabelle 3 Dynamische Eigenschaften von Schrägseilbrücken mit Hauptspannweiten von 1000 bis 2500 m [14]

Mode Schwingungs- mode*)	Sutong Bridge		1000 m		1500 m		2000 m		2500 m	
	Order Ordnung	Frequency Frequenz (Hz)								
F-1	1	0.064	1	0.075	1	0.057	2	0.044	2	0.037
LB-1	2	0.103	2	0.126	2	0.059	1	0.037	1	0.023
LB-2	5	0.287	5	0.342	4	0.153	3	0.088	3	0.055
VB-1	3	0.184	3	0.208	3	0.148	4	0.122	4	0.095
VB-2	4	0.225	4	0.261	5	0.174	5	0.141	6	0.112
T-1	13	0.511	21	0.557	16	0.431	21	0.373	24	0.324

\*) F: floating | Längsschwingung, LB: lateral bending | Querbiegung, VB: vertical bending | vertikale Biegung, T: torsional | Torsion

Table 4 Critical flutter speed of cable-stayed bridges with main spans from 1000 m to 2500 m [14]  
 Tabelle 4 Kritische Geschwindigkeiten – Flattern – von Schrägseilbrücken mit Hauptspanweiten von 1000 m bis 2500 m [14]

Proposal   Objekt	Sutong Bridge		1000 m		1500 m		2000 m		2500 m	
Attack angle   Angriffswinkel	0°	+3°	0°	+3°	0°	+3°	0°	+3°	0°	+3°
Reduced wind speed Verminderte Windgeschwindigkeit $V^*$	7.65	4.75	7.38	4.67	7.71	4.68	> 8.0	4.76	6.77	4.18
Width   Breite B (m)	41.0	41.0	41.0	41.0	41.0	41.0	41.0	41.0	68.1	68.1
Flutter frequency   Flatterfrequenz $f_i$ (Hz)	0.444	0.480	0.477	0.518	0.361	0.399	-	0.349	0.228	0.252
Critical speed Kritische Geschwindigkeit $V_{cr}$ (m/s)	139.1	93.4	144.3	99.3	114.3	76.7	> 103.8	68.1	104.8	71.6

bridge with the main span of 2500 m and 41 m girder width, and the lateral deformation is too large. Instead, the girder width is increased to 68.1 m. By means of 2-D linear and 3-D nonlinear analysis, it was shown in Table 4 that the aerostatic stabilities of these four bridges have adequate safety reserve. By carrying out the 2-D flutter coupling analysis with the flutter derivatives of Sutong Bridge, the flutter critical wind speeds of these four bridges are 99.3 m/s, 76.7 m/s, 68.1 m/s, and 71.6 m/s, respectively, which can meet the wind-resistance design demands in most regions [14].

The double 1500 m spans cable-stayed bridge has been proposed for the main navigational channel of Qiongzhou Strait Bridge, which connects Zhanjiang City, Guangdong Province in the mainland of China, and Haikou City, Hainan Province in the largest island of China, called Hainan Island. The span arrangement is designed as 244 + 408 + 1500 + 1500 + 408 + 244 m, and the twin box deck is adopted with the total width of 60.5 m including a 14 m central slot, shown in Fig. 11 and Fig. 12 [15].

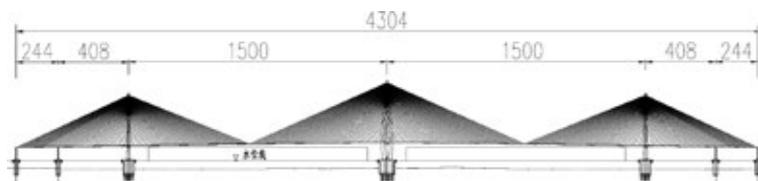


Fig. 11 Span arrangement of Qiongzhou Strait Cable-Stayed Bridge  
 Bild 11 Spannweiten der Qiongzhou-Strait-Schrägseilbrücke

Drawing: [16]

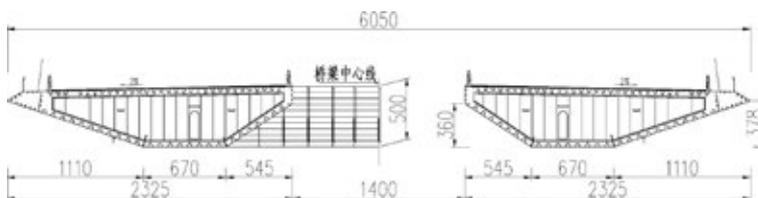


Fig. 12 Girder cross section of Qiongzhou Strait Cable-Stayed Bridge  
 Bild 12 Hauptträgerquerschnitt der Qiongzhou-Strait-Schrägseilbrücke

Drawing: [16]

Außerdem wurden die Auswirkungen der Brückenlängsträger, von Türmen bzw. Pylonen und der Schrägseile auf die dynamischen Eigenschaften der Brücken untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Vergrößerung der Trägerhöhe zur Erhöhung der strukturellen Grundfrequenzen beiträgt. Eine Zunahme der Trägerbreite würde die Torsionsgrundfrequenz reduzieren. Die Höhe und Steifigkeit von Brückentürmen oder Pylonen haben hingegen wenig Einfluss auf die Grundfrequenzen. Die Verwendung von carbonfaserverstärkten Polymeren (CFRP) für die Schrägseile würde mit zunehmender Hauptspanweite die strukturellen Grundfrequenzen der Brücken beträchtlich erhöhen [14].

Hinsichtlich des Windwiderstands wurden beim Design dieser vier Brücken die Tragwerksantwort auf statisch wirkende Windlasten, die aerostatische Stabilität und die Stabilität gegenüber Flattern betrachtet. Bei der Bemessung für die statische Windlast würde die Beanspruchung im Brückenträger die zulässigen Werte für die Brücke mit 2500 m Spannweite und 41 m Trägerbreite überschreiten.

Zudem wäre die Querverformung zu groß. Deshalb wurde die Trägerbreite auf 68,1 m erhöht. Mittels linearer 2-D- und nichtlinearer 3-D-Analyse konnte gezeigt werden, dass die aerostatischen Stabilitäten jeder der vier Brücken eine ausreichende Sicherheitsreserve aufweisen (s. Tabelle 4). Führt man die 2-D-Analyse für den kritischen Zustand "Flattern" mit von der Sutong-Brücke abgeleiteten Werten durch, erhält man für die vier fiktiven Brücken bei einem Angriffswinkel von 3° kritische Windgeschwindigkeiten zwischen 99,3 m/s (Spannweite 1000 m) und 68,1 m/s (2000 m Spannweite), womit die Anforderungen an den Windwiderstand in den meisten Regionen erfüllt werden können [14].



Fig. 13 Sectional model test in a wind channel  
Bild 13 Test an einem Modell eines Brückendeckauschnittes im Windkanal

Photo: by the author



Fig. 14 Full aero-elastic model test in the wind channel  
Bild 14 Die komplette Brücke im Modell im Windkanaltest

Photo: by the author

Before performing the sectional model test and full aero-elastic bridge model test, the fundamental natural frequencies of the lateral bending, the vertical bending and the torsional vibration of bridge deck obtained via a FEM modal analysis are 0.0810 Hz, 0.1235 Hz, and 0.3524 Hz, respectively, for the completion bridge state. The corresponding modal equivalent masses and mass moment of the bridge deck are 39,020 kg/m, 54,370 kg/m, and 15,699,500 kgm<sup>2</sup>/m, respectively [15].

The sectional model wind tunnel test with the scale ratio of 1:80 was first conducted to study the wind-resistance performance of the cable-stayed bridge (Fig. 13). The tests were performed in the laminar flow at three different attack angles, namely, +3°, 0°, and -3°. The minimum flutter critical wind speed among three attack angles

Eine Schrägseilbrücke mit Spannweiten von 2 × 1500 m wurde für die Hauptdurchfahröffnungen der Qiongzhou Strait Bridge vorgeschlagen, die die Stadt Zhanjiang in der Provinz Guangdong auf dem chinesischen Festland mit der Stadt Haikou in der Provinz Hainan auf der gleichnamigen, größten Insel Chinas verbindet. Der Entwurf sah Spannweiten von 244 + 408 + 1500 + 1500 + 408 + 244 m vor (Bild 11). Der Brücke wird eine Gesamtbreite von 60,5 m haben, die beiden Hohlkästen sind jeweils rund 23 m breit (Bild 12, [15]).

In der Entwurfsphase waren Windkanalversuche an einem Modell eines Abschnitts des Brückendecks und an einem vollständigen aeroelastischen Brückenmodell vorgesehen. Zuvor waren für das Brückendeck im Endzustand die Eigenfrequenzen für Quer- und vertikale Biegung als auch für Torsionsschwingung mit Hilfe der FEM-Modalanalyse mit 0,0810 Hz, 0,1235 Hz und 0,3524 Hz bestimmt worden. Die zugehörigen äquivalenten modalen Massen bzw. das Massenträgheitsmoment des Brückendecks betragen 39.020 kg/m, 54.370 kg/m bzw. 15.699,5 tm<sup>2</sup>/m [15].

Zuerst wurde die Versuchsreihe an dem Modell des Brückenabschnitts im Maßstab 1:80 durchgeführt, um den Windwiderstand der Schrägseilbrücke zu untersuchen (Bild 13). Die Tests wurden in einer laminaren Strömung mit drei verschiedenen Angriffswinkeln – +3°, 0° und -3° – durchgeführt. Die minimale kritische Windgeschwindigkeit beträgt 118 m/s für das Szenario Flattern, was höher ist als die Entwurfs-Windgeschwindigkeit, die in [12] mit 93 m/s angegeben ist. Anschließend wurde ein vollständiger aeroelastischer Modellversuch im Maßstab 1:320 durchgeführt (Bild 14). Auch hier wurden drei Angriffswinkel bei laminarer Strömung getestet. Die jeweiligen Mittelwerte und quadratischen Mittel (QMW) der Torsionsantwort im Mittelfeld sind in Bild 15 zusammengestellt. Es konnte festgestellt werden, dass die aerostatische Torsionsdivergenz vor dem Flattern auftritt.

Table 5 Critical wind speeds for 2 × 1500 m cable-stayed bridge

Tabelle 5 Kritische Windgeschwindigkeiten für eine Schrägseilbrücke mit 2 × 1500 m Spannweite

Attack angle Angriffswinkel	Aerodynamic flutter instability Aerodynamische Instabilität – Flattern		Aerostatic torsional divergence Aerostatische Torsionsdivergenz	
	Critical speed Kritische Geschwindigkeit (m/s)	Checking speed Überprüfte Geschwindigkeit (Entwurf) (m/s)	Critical speed Kritische Geschwindigkeit (m/s)	Checking speed Überprüfte Geschwindigkeit (Entwurf) (m/s)
+3°	> 202	93	109	91
0°	> 210		116	
-3°	> 118		> 109	

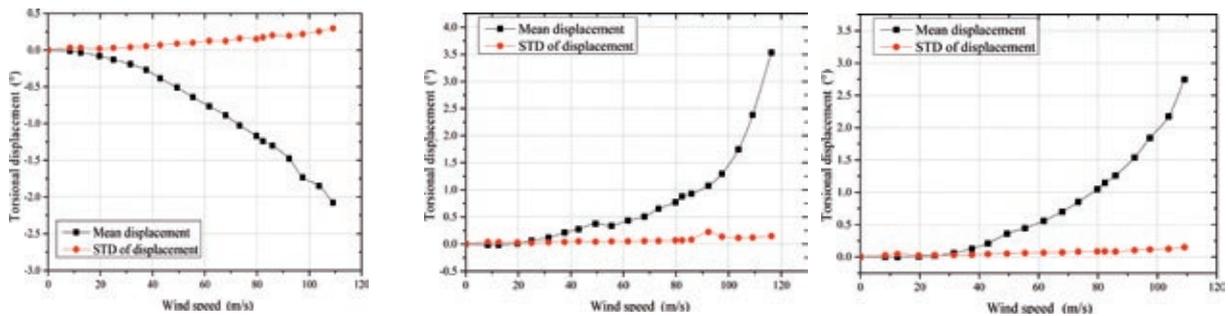


Fig. 15 Torsional response in the midspan for the  $2 \times 1500$  m cable-stayed bridge; from left to right:  $+3^\circ$ ,  $0^\circ$ , and  $-3^\circ$

Bild 15 Torsionsreaktion im Mittelfeld für eine Schrägseilbrücke mit Hauptspannweiten von  $2 \times 1500$  m; von links nach rechts:  $+3^\circ$ ,  $0^\circ$  und  $-3^\circ$

Diagrams: [16]

is 118 m/s according to the sectional model test which is higher than the design wind speed given by Wind-resistant Design Specification for Bridges [12], 93 m/s. Then, a full aero-elastic model test with the scale ratio of 1:320 was conducted (Fig. 14). Similarly, three attack angles were tested in laminar flow and the corresponding mean and root mean square (RMS) values of the torsional response in the midspan were collected as shown in Fig. 15. It can be found that the divergence phenomenon only occurs in the mean response at three attack angles which means the aerostatic torsional divergence happens before the flutter instability. Table 5 gives the critical wind speed of aerodynamic flutter instability, aerostatic torsional divergence and design checking wind speed. It shows that both the flutter and aerostatic stabilities can meet the wind-resistance requirements [15].

## 5 Conclusions

Although the development of cable-stayed bridges in China has only about 40 years history, China has truly become a leading country that had built more than half long-span cable-stayed bridges in the world, including several world record span bridges. The engineering practice of the latest record-breaking cable-stayed bridges, including Sutong Bridge, Stonecutters Bridge, and Edong Bridge, unveils the facts that traditional long-span cable-stayed bridges with spatial cable plane and steel box girder have high enough critical flutter speed and the main aerodynamic concern is rain-wind induced vibration of long stay cables. The traditional cable-stayed bridges may come to their span length limitation of 1500 m due to wind resistance, and both aerodynamic flutter instability and aerostatic torsional divergence must be carefully considered in the future design.

In Tabelle 5 sind die wichtigsten Kennwerte zusammengestellt. Es wird zeigt, dass sowohl hinsichtlich des Flatterns als auch hinsichtlich der Torsionsschwingungen die Anforderungen an die Windwiderstandsfähigkeit erfüllt werden [15].

## 5 Schlussfolgerungen

Obwohl die Geschichte der Entwicklung von Schrägkabelbrücken in China erst vor etwa 40 Jahren begann, ist China darin zu einem führenden Land geworden, welches mehr als die Hälfte der am weitesten gespannten Schrägseilbrücken in der Welt gebaut hat, darunter mehrere Weltrekordbrücken. Die Ingenieurpraxis hat im Zusammenhang mit den neuesten rekordbrechenden Schrägseilbrücken, darunter die Sutong Bridge, die Stonecutters Bridge und die Edong Bridge, gezeigt, dass traditionelle, langgestreckte Schrägseilbrücken mit räumlicher Kabelanordnung und Stahlkastenträgern eine ausreichend hohe kritische Flattergeschwindigkeit haben und das maßgebende aerodynamische Problem die Regen-Wind-induzierten Schwingungen der langen Kabel sind. Aufgrund des Windwiderstands wird sich bei traditionellen Schrägkabelbrücken eine Spannweitenbegrenzung bei 1500 m einstellen. Bei zukünftigen Konstruktionen müssen sowohl die aerodynamische Instabilität (Flattern) als auch die aerostatische Torsionsdivergenz sorgfältig berücksichtigt werden.

## References | Literatur

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Nanpu\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Nanpu_Bridge).
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Yangpu\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Yangpu_Bridge).
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Second\\_Nanjing\\_Yangtze\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Second_Nanjing_Yangtze_Bridge).
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Third\\_Nanjing\\_Yangtze\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Third_Nanjing_Yangtze_Bridge).
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Sutong\\_Yangtze\\_River\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Sutong_Yangtze_River_Bridge).
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Stonecutters\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Stonecutters_Bridge).
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Jingzhou\\_Yangtze\\_River\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Jingzhou_Yangtze_River_Bridge).
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tianxingzhou\\_Yangtze\\_River\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Tianxingzhou_Yangtze_River_Bridge).
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Erqi\\_Yangtze\\_River\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Erqi_Yangtze_River_Bridge).
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_longest\\_cable-stayed\\_bridge\\_spans](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_longest_cable-stayed_bridge_spans).
- [11] <https://de.wikipedia.org/wiki/Edong-Brücke>.
- [12] Ministry of Communication (Ed.): Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges. China, 2004 (in Chinese).
- [13] Cao, J. X.; Ge, Y. J.; Yang, Y. X.: Structural static performance of cable-stayed bridges with super long spans. In: Meng, H.; Yuan, Y. (Eds.): Proceedings of International Conference on Computational Structural Engineering, 22.–24.7.2009 in Shanghai (China), 2009, pp. 461–468.
- [14] Jinxin, C.: Ultimate span of cable-stayed bridge and theoretical analysis for its wind-resistance performance. Master's thesis, Tongji University, 2009.
- [15] Zhiyong, Z.; Ge, Y. J.; Hu, X. H.; Song, J. Z.: Wind tunnel tests for 2×1500m three-tower cable-stayed bridge. Scientific research report sponsored by Ministry of Transport, Research on wind-wave flow coupling effects on extra-large bridges, 2015.
- [16] Ge, Y. J.: Aerodynamic challenge and limitation in long-span cable-supported bridges. In: Proc. of ACEM16, 28.8.-1.9.2016 in Jeju Island (South Korea), 28 pages – online: [http://www.i-asem.org/publication\\_conf/acem16/0.Keynote/M1C.k0101F.pdf](http://www.i-asem.org/publication_conf/acem16/0.Keynote/M1C.k0101F.pdf).

Note: All internet sources were checked on 28.11.2017.

Hinweis: Alle Internetquellen wurden am 28.11.2017 überprüft.

## Das flüssige Futterblech!

Zeit- und kostenoptimierter Spaltausgleich zwischen druckbelasteten Metallelementen im Stahl- und Brückenbau

- 100% form- und kraftschlüssig
- Keine mechanische Bearbeitung notwendig
- Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
- Korrosionsbeständig
- Vielseitig einsetzbar
- Extrem druckfest
- Seewasserfest



**DIAMANT**  
The Metalplastic Company

Tel.: 02166-98 36 0  
info@diamant-polymer.de  
www.diamant-polymer.de

# MM1018

## SPALTAUSGLEICH



---

9	Herzlich willkommen zum 28. Dresdner Brückenbausymposium
13	Vorwort zum 28. Dresdner Brückenbausymposium
17	Bauwerksentwürfe nach RE-ING – Was ist neu?
25	Development of cable-stayed bridges in China
41	Vom Rechnen und Wissen – Monitoring an den Talbrücken der Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle
59	Nachrechnung und Ertüchtigung der Siegtalbrücke – größte Spannbetonbrücke der Sauerlandlinie (A45)
73	Der Rückbau der Lahntalbrücke Limburg (1964)
87	Einsatz unbemannter Flugsysteme im Brückenbau
101	Eugène Freyssinet: “I was born a builder”
129	Realisierung der Kienlesbergbrücke in Ulm – gestalterische und bauliche Herausforderungen im komplexen Baukontext
141	Die Taminabrücke in der Schweiz, der Heimat großer Brückenbauingenieure
157	100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke
169	Lebenszyklus- und Qualitätsspezifikationen für Ingenieurbauwerke
189	Versagenshäufigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit von Brücken
203	Brückenvielfalt rund um die Ostsee – Bericht zur Brückenexkursion 2017
215	Chronik des Brückenbaus
231	Inserentenverzeichnis