



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

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



29. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

11./12. MÄRZ 2019

© 2019 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: Beyer, Kurt: Südthailand. Zweibogige Betonbrücke im Bau, 1912/1913
Foto: SLUB Dresden / Deutsche Fotothek / Kurt Beyer

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

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-585-8



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

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

Tagungsband

29. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens e.V.

TUDIAS GmbH

11. und 12. März 2019

Inhalt

Herzlich willkommen zum 29. Dresdner Brückenbausymposium	9
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen, Rektor der TU Dresden</i>	
Verleihung der Wackerbarth-Medaille	13
Laudatio für Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stritzke aus Anlass der Verleihung der Wackerbarth-Medaille der Ingenieurkammer Sachsen	14
<i>Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
Christian Menn – Brückenbauer, Lehrer, Ästhet	17
<i>Dr.-Ing. Silke Scheerer, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
Aktuelles zum Regelwerk des Bundes für den Ingenieurbau	25
<i>TRDir Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn</i>	
Die Maputo-Katembe-Brücke, das neue Wahrzeichen Mosambiks – Drei Bauverfahren bei der längsten Hängebrücke Afrikas	29
<i>Dipl.-Ing. Joern Seitz, Dipl.-Ing. (FH) Martin Pohl</i>	
Monitoring und Visualisierung im Infrastrukturbau.....	47
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Dr.-Ing. David Sanio, Dr.-Ing. Steffen Schindler</i>	
Verkehrsinfrastruktur für Hamburg – Neubau der Waltershofer Brücken im Hamburger Hafen.....	59
<i>Dr.-Ing. Christoph Vater</i>	
Erfahrungsbericht aus Österreich über die Anwendung von neuen Verfahren im Brückenbau	73
<i>o.Univ.Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Benjamin Kromoser, Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Eichwalder</i>	
Stahlverbund-Großbrücken mit oberliegender Fahrbahn als Querschnitte mit Teilfertigteilen und Schrägstreben bzw. Konsolen	85
<i>Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler, Dipl.-Ing. Gregor Gebert</i>	
Kurt Beyers Beitrag zur Baustatik	101
<i>Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl-Eugen Kurrer</i>	
Nachrechnungsdefizite bei Massivbrücken – Ein Problem der Tragfähigkeit oder [doch nur] der Modellvorstellung?	129
<i>Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer; Sebastian Gehrlein, M.Sc.; Nicholas Schramm, M.Sc.; Marcel Nowak, M.Sc.</i>	
Was tun, wenn Annahmen und Realität nicht zusammenpassen?	149
<i>Dr.-Ing. Hans-Gerd Lindlar, Dr.-Ing. Stefan Franz, Dipl.-Ing. Lars Dietz, Dr.-Ing. Bastian Jung, M. Eng. Tarik Tiyma</i>	
Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken	161
<i>Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka, Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Anne Rausch, Dr.-Ing., MBA und Eng. Marc Zintel, Dipl.-Ing., MBA Luzern Christian Linden</i>	
Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken mit Halbfertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton	173
<i>Dr.-Ing. Frank Jesse, Dipl.-Ing. Andreas Apitz, Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich</i>	
Der 30-Jahre-Zyklus der Brückeneinstürze und seine Konsequenzen	185
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Proske</i>	
Chronik des Brückenbaus	197
<i>Zusammengestellt von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner</i>	
Inserentenverzeichnis	207

Die Maputo-Katembe-Brücke, das neue Wahrzeichen Mosambiks – Drei Bauverfahren bei der längsten Hängebrücke Afrikas

Dipl.-Ing. Joern Seitz, Dipl.-Ing. (FH) Martin Pohl
GAUFF GmbH & Co. Engineering KG, Nürnberg / Maputo (Mosambik)

1 Einleitung

Mosambik befindet sich im Südosten Afrikas am Indischen Ozean und gilt mit seinen Bodenschätzen, fruchtbaren Böden und einer ca. 2.800 km langen Küste als eines der Länder mit dem größten ungenutzten Entwicklungspotenzial Afrikas. Trotz der guten wirtschaftlichen Wachstumszahlen der vergangenen Jahre schreitet die wirtschaftliche Entwicklung nur stockend voran.

Eines der Probleme für die weitläufigere Entwicklung ist die unzureichende Verbindung zwischen der Hauptstadt Maputo und dem Süden des Landes. Auch eine Verbesserung der weiterführenden Handelsroute nach Südafrika ist von großem entwicklungspolitischen Interesse. Durch die Erschließung des Südens wird ein Korridor an der Ostküste Afrikas geschaffen, der nach dem nationalen Masterplan Mosambiks vor allem touristische Infrastruktur beherbergen und weitere Arbeitsplätze

und Wirtschaftswachstum generieren soll. Das Schlüsselbauwerk dieser neuen Route ist die als klassische Hängebrücke ausgeführte Maputo-Katembe Bridge, s. Bild 1. Diese überspannt die Bucht von Maputo auf einer Länge von 680 m und ist die längste Hängebrücke von Afrika [1]. Sie löst damit die 520 m lange Matadi-Brücke in der Demokratischen Republik Kongo ab, die 1983 von japanischen Ingenieuren erbaut wurde.

Die Bauarbeiten in Maputo begannen Mitte 2014 und konnten nach 48 Monaten Bauzeit erfolgreich abgeschlossen und die Brücke an den Bauherrn – die mosambikanische Regierung – übergeben werden. Diese ist durch eine für dieses Projekt und den späteren Betrieb gegründete Gesellschaft *Empresa de Desenvolvimento de Maputo Sul, E.P.* (EDMS) vertreten. Die Bauausführung erfolgt durch die Firma *China Road and Bridge Corporation* (CRBC) mit Sitz in Peking (China), die auch für das gesamte Design verantwortlich war. Die gesamte Qualitätsüber-



Bild 1 Nordzufahrt und Hauptbrücke

Foto: GAUFF Engineering

wachung sowie die Verifizierung des Designs nach dem Eurocode für den chinesischen Entwurf lagen in der vertraglichen Verantwortung von GAUFF Engineering GmbH & Co. KG, Nürnberg. Dem Vertrag liegt das FIDIC Silver Book (EPC/Turnkey Projects) [2] zugrunde.

Der Bauherr war in der Anfangsphase vertreten und unterstützt durch die internationalen Berater Bechtel aus Amerika und COWI A/S aus Dänemark, deren Aufgaben im weiteren Verlauf des Projektes intern an GAUFF Engineering übertragen wurden.

2 Projekthistorie

Der ursprüngliche Entwurf von 2008 sah eine 4,3 km lange, aufgeständerte Fertigteilbrücke vor, die als Verlängerung der städtischen Umfahrungsstraße EN 1 die Bucht von Maputo gekreuzt und somit zweigeteilt hätte. Dadurch wäre ein Teil des schiffbaren nordwestlichen Bereiches der Bucht größeren Schiffen verwehrt gewesen.

Um dieses zu umgehen, entstand 2010 ein neuer Entwurf einer Schrägseilbrücke, positioniert an der engsten Stelle der Hafeneinfahrt und mit einem im Wasser errichteten Pylon. Hier befindet sich auch der internationale Seehafen Maputos, der 10 % des Umsatzes für das Land Mosambik erwirtschaftet. Die Hafenbehörde stimmte diesem Entwurf nicht zu und forderte Pylone an den beiden Ufern. Durch die Zunahme der Spannweite von ca. 420 m auf 680 m mussten die Höhen der Pylone angepasst werden. Da sich die Brücke aber direkt in der Einflugschneise des Internationalen Flughafens von Maputo befindet, wurde auch dieser Entwurf fallengelassen. Einen Überblick über die vielfältigen Bauweisen mit ihren Vor- und Nachteilen sind bei Svensson in [3] zusammengestellt.

Trotz Mehrkosten in Höhe von etwa 10 %, vor allem bedingt durch den höheren Materialaufwand und den schlechten Baugrund, wurde dem in 2011 von CRBC vorgelegten Entwurf ei-

ner klassischen Hängebrücke zugestimmt. Die Bauarbeiten für die Maputo-Katembe-Brücke begannen nach der Vertragsunterzeichnung 2011 im August 2014 (Bild 2).

Auch die ursprüngliche Finanzierung über den portugiesischen Staat war aus Gründen der seinerzeitigen Wirtschaftskrise nicht mehr möglich und somit wurde die Brücke inklusive der 184 km Anbindungsstraßen über die EXIM Bank of China finanziert.

3 Projektübersicht

Die Maputo-Katembe-Brücke beginnt im Norden auf einem unbebauten Hang mitten in der Stadt, von wo aus sie über Brücken und Rampen an das vorhandene Straßennetz angebunden ist. Um die international geforderte Durchfahrtshöhe von 60 m über der Bucht zu erreichen, waren beidseitig umfangreiche Vorlandbrücken erforderlich, die aufgrund der örtlichen Gegebenheiten in unterschiedlichen Baumethoden errichtet werden mussten.

Das gesamte Infrastrukturprojekt der Überführung setzt sich aus drei unterschiedlichen Brückenbauwerken zusammen:

- Vorlandbrücke im Norden (Freivorbau),
- Hauptbrücke (konventionelle Hängebrücke) und
- Vorlandbrücke im Süden (Fertigteilträger).

Die Länge der drei Brücken beträgt zusammen 3.011 m und besteht aus einer vierspurigen Fahrbahn mit zwei Fahrstreifen in jeder Fahrtrichtung.

Der Baugrund besteht aus den für die Küstenregion typischen Schichten mit Auffüllungen und Schlick in den oberen Lagen, Feinsand und Tonen und darunterliegenden Tonschichten. Die hohen Bauwerkslasten erfordern durch den schlechten Baugrund in Meeresnähe um-

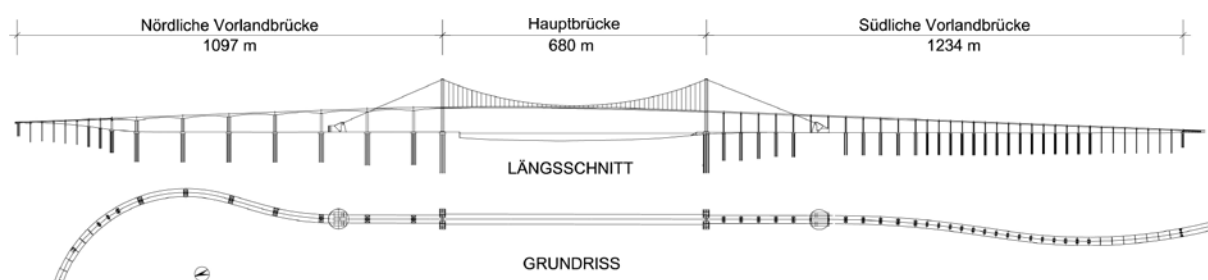


Bild 2 Projektübersicht mit den drei unterschiedlichen Brücken

Grafik: aus [4]

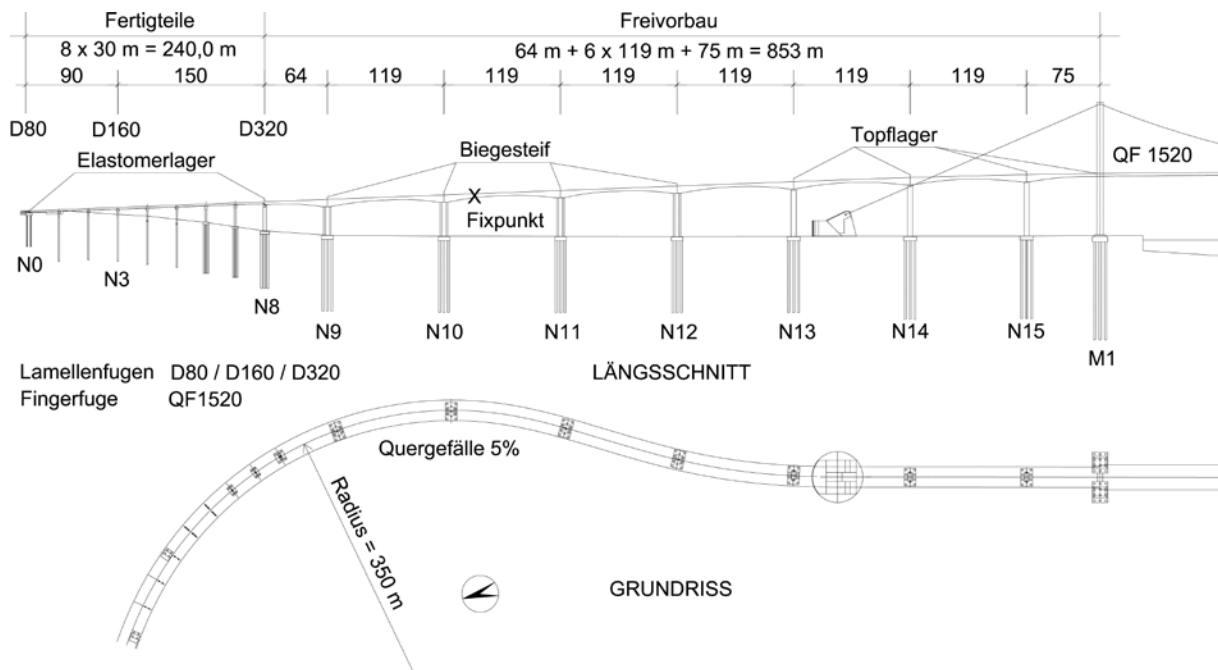


Bild 3 Nördliche Vorlandbrücke

Grafik: aus [4]

fangreiche Pfahlgründungen. Das Design unterliegt den chinesischen Vorschriften und wurde mit den Erkenntnissen der Baugrunduntersuchungen und deren systematischen Auswertungen kombiniert. Die Arbeiten für die Bodenaufschlüsse wurden ca. 2 Jahre vor den eigentlichen Bauarbeiten begonnen.

Die Gründungsarbeiten lassen sich für die 3 Brücken in 4 Abschnitte unterteilen:

- ❑ Vorlandbrücke Nord: 114 Pfähle, Durchmesser $d = 1,50$ m oder $2,00$ m, Länge $L < 60$ m,
- ❑ Nord-Pylon: 24 Pfähle, $d = 2,20$ m, $L < 97$ m,
- ❑ Süd-Pylon: 24 Pfähle, $d = 2,20$ m, $L < 110$ m,
- ❑ Vorlandbrücke Süd: 169 Pfähle, $d = 1,50$ m oder $2,00$ m, $L < 73$ m.

Insgesamt wurden 331 Pfähle abgeteuft und deren Tragfähigkeit unter Gebrauchslast reicht bis 15 MN. Die Rampen im Nordbereich für den Anschluss an die städtische Infrastruktur erforderten ebenso Pfahlgründungen in kleinerem Umfang.

3.1 Vorlandbrücke Nord (Maputo)

3.1.1 Überblick Vorlandbrücke Nord

Die Gesamtlänge der nördlichen Vorlandbrücke beträgt 1.097 m (Bild 3). Durch das freie Baufeld in den ersten 240 m konnte die Brücke

aus 8×30 m langen Spannbetonfertigteilträgern ausgeführt werden. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Infrastruktur, wie der bestehenden städtischen und industriellen Bebauung, der Eisenbahnlinie und des internationalen Seehafens, wurde für die restlichen 853 m bis zum Pylon M1 die Baumethode des Freivorbaus gewählt, um möglichst wenig Berührungspunkte zu den Ansiedlungen zu schaffen. Die erste Spannweite des $20,88$ m breiten Überbaus beträgt $64,00$ m, gefolgt von sechs Abschnitten mit $119,00$ m. Daran schließt sich das $75,00$ m lange Verbindungsstück als Anschluss an den Nordpylon bzw. als Übergang zur Hauptbrücke an. Diese Freivorbaubrücke zählt mit zu den schwierigsten Ausführungen weltweit, da die Brücke durch die vorhandene Topographie mit einem Radius von 350 m gekrümmt und dadurch auch bis zu 5% quergegeneigt hergestellt werden musste. Das Längsgefälle der Brücke beträgt konstant $3,8\%$.

Die Neigung des Hanges, der auch als Zufahrt zur Brücke dient, liegt im Bereich vom Widerlager N0 bis zur Stütze N3 quer zur Fahrtrichtung. Aus diesem Grund sind die beiden rechten Fahrspuren bereits aufgeständert, während die beiden linken noch im eingeschnittenen Hang verlaufen und erst ab dem Widerlager N3 bis hin zur Stütze N8 als Fertigteilbrücke ausgeführt wurden.

3.1.2 Fertigteilbrücke

Die ersten 5 Stützen von N1–N3 bestehen jeweils aus 2, bei N4 und N5 aus jeweils 4, runden Säulen mit einem Durchmesser von



Bild 4 Nördlicher Ankerblock, Brücke im Freivorbau und deren Stützen N13, N14 und N15

Foto: GAUFF Engineering

1,40 m. Die Stützen für N6 und N7 sind in ihrer Grundrissfläche $8,00\text{ m} \times 1,80\text{ m}$ groß und massiv ausgeführt. Die Stütze N8 hat bereits eine Länge von über $23,00\text{ m}$. Sie ist mit den Abmessungen $8,50\text{ m} \times 2,80\text{ m}$ und einer Wandstärke von $0,50\text{ m}$ hohl ausgeführt. Die seitlich bis zu $6,00\text{ m}$ auskragenden Stützenköpfe sind in Brückenquerrichtung zusätzlich vorgespannt.

Die für die nördliche Vorlandbrücke erforderlichen 60 Stück vorgespannten T-förmigen Fertigteile aus Spannbeton mit einer Länge von je $30,00\text{ m}$ wurden auf einer eigens dafür errichteten Fertigungsstätte auf der Baustelle produziert. Der Überbau, der in den ersten 3 Feldern aus jeweils 5 parallel liegenden Trägern besteht, wurde auch im Bereich der beiden Stützen N1 und N2 in Längsrichtung monolithisch verbunden und als Durchlaufträger bemessen – ebenso die Auflager zwischen N3 bis zur Stütze N8, die aus jeweils 9 einzelnen Spannbetonfertigteilträgern bestehen.

Als Auflager an den Stützen wurden Elastomerlager verwendet. Bei den inneren Auflagern der Durchlaufträger können die auftretenden Kräfte durch Eigenverformung der Lager sowie durch Biegung der Stützen aufgenommen werden. Die Endauflager hingegen

wurden gleitend ausgebildet. Die Fahrbahnübergänge sind Lamellenfugen mit einem Bewegungsspielraum von 80 mm , 160 mm und 320 mm bei der Stütze N8, als Übergang zur Freivorbaubrücke.

3.1.3 Freivorbaubrücke

Der gevoutete und aus 2 Kammern bestehende Hohlkastenquerschnitt der 853 m langen Freivorbaubrücke über den Stützen N08 bis N15 weist eine Höhe von $8,00\text{ m}$ auf und verjüngt sich zur Feldmitte hin auf $3,40\text{ m}$. Das erste Segment 0 hat eine Länge von $12,00\text{ m}$, gefolgt von 7 Segmenten mit $3,50\text{ m}$ und weiteren 7 Segmenten mit $4,00\text{ m}$ bis hin zum Schlussegment mit $2,00\text{ m}$ Länge.

Die Verbindung zwischen dem Unter- und dem Überbau wurde im Bereich von N9 bis N12 biegesteif ausgeführt und als Rahmen bemessen. Die Stützen bestehen aus zwei schlanken, hintereinander angeordneten, $9,00\text{ m} \times 1,80\text{ m}$ messenden Scheiben mit einem lichten Abstand von $4,80\text{ m}$. Diese Konstruktion kann die auftretenden Längs- wie auch die durch die Krümmung entstehenden Querkräfte aufnehmen. Um die erforderliche Verankerung des Überbaus für die einzelnen Bauzustände zu gewährleisten, wurde das Segment 0 zusätzlich zur schlaffen Bewehrung mit vorgespannt-

ten und bis zu 20,0 m langen Gewindestäben in den Stützen verankert.

Bei den Stützen N13–N15 bis zum Pylon M1 (Bild 4) hingegen ist der Überbau auf Topflagern gelagert, die in Richtung des theoretischen Fixpunktes nahe der Stütze N10 ausgerichtet sind (Bild 3). Die Abmessungen der bis zu 54,14 m hohen Stützen betragen 9,6 m × 5,0 m, die Wandstärke weist 70 cm bzw. 100 cm auf.

Um auch hier die für die Bauzustände erforderliche Einspannung zu erhalten, wurden als Verbindung jeweils vier massive, schlaff bewehrte Sockel aus Beton ausgebildet, welche nach dem Lückenschluss wieder entfernt werden konnten. Die Last wurde dann von den bereits eingebauten Topflagern übernommen.

Nachdem der Beton 85 % der jeweils geforderten Endfestigkeit erreicht hatte, konnte mit den Vorspannarbeiten begonnen werden. Dabei wurde sowohl auf das Einhalten der Vorspannkraft geachtet wie auch die Längung der Spannglieder sichergestellt, die sich laut der Chinesischen Norm *Specification of Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts* im Bereich von $\pm 6\%$ bewegen muss [5].

Als vertikale Vorspannung in den drei Wänden des Hohlkastens wurden im Abstand von 50 cm

jeweils zwei Gewindestangen mit einem Durchmesser von 32 mm, einer Streckgrenze von 785 MPa und einem E-Modul von $2,0 \cdot 10^5$ MPa verwendet. Der Ausnutzungsgrad durfte 90 % nicht überschreiten. Für die Längs- und Quervorspannung des Hohlkastens wurde Spannstahl mit einem Durchmesser von 15,2 mm, einer Streckgrenze von 1.860 MPa und einem E-Modul von $195 \cdot 10^5$ MPa verwendet, welcher auf 75 % vorgespannt wurde.

Um der zunehmenden Durchbiegung und Auskragung des Überbaues entgegenzuwirken, wurde die Schalung des Freivorbauwagens überhöht. Nach jedem fertiggestellten Element wurde die gesamte Brücke neu vermessen und mit den theoretisch errechneten Ergebnissen verglichen. Neben der Länge der Auskragung, dem jeweiligen E-Modul des Betons der fertigen Segmente, den Gewichten der Schalung (1.100 kN) und des Frischbetons sowie den Ergebnissen aus der Vermessung wurde die erforderliche Schalungsüberhöhung des nachfolgenden Segmentes ermittelt.

3.2 Hängebrücke

3.2.1 Pylone

Die Überführung über die 680 m breite Hafeneinfahrt wurde mit einer klassischen Hängebrücke aus Stahlsegmenten realisiert (Bilder 7



Bild 5 Pylon mit ca. 137 m Höhe mit dem unteren und oberen Querriegel im Bauzustand

Foto: GAUFF Engineering



Bild 6 Verankerungsblock Süd mit ca. 27 m Höhe über Gelände

Foto: GAUFF Engineering

und 8). Die Zugkräfte der Hauptkabel werden auf beiden Seiten der Bucht jeweils über einen massiven Schwergewichtsankerblock abgetragen.

Über Gelände sind die beiden Pylone 137,10 m (Nord) und 138,10 m (Süd) hoch, A-förmig ausgebildet und in ihren Außenabmessungen 7,00 m lang und 5,00 m breit. Sie weisen eine Wandstärke von 80 cm bis zu 120 cm auf. Von dem höchsten Bemessungswasserstand aus beträgt die Pylonhöhe auf beiden Seiten 141 m. Die Querneigung der Pylone ist nach innen gerichtet und liegt bei 3,7 %. Für die erforderliche Stabilität sorgen die beiden 6 m hohen, in Querrichtung vorgespannten Riegel. Der untere dient in einer Höhe von 56,90 m bzw. 47,10 m ebenso als Auflager für die Fahrbahn (Bild 5). In den innen hohl ausgebildeten Pylonstielen wurden auf einer Seite durchgängig eine Treppe und auf der anderen ein Aufzug zu Wartungszwecken eingebaut.

3.2.2 Schwergewichtsankerblock

Die beiden Ankerblöcke sind, abgesehen von den unterschiedlichen Gründungstiefen, baugleich und weisen jeweils einen äußeren Durchmesser von 50,00 m auf (Bild 6). Im Norden war eine Aushubtiefe von 17,50 m und im Süden, bedingt durch die wesentlich schlechtere Baugrundbeschaffenheit, eine Tiefe von

37,50 m erforderlich. Die Wanddicke der Primär- und Sekundärlamellen beträgt 1,20 m, die Elementlänge bis zu 8,14 m, und diese wurden 56,00 m tief in den Tonstein abgeteuft. Zusätzlich wurden parallel zum Aushub sechs jeweils 3,00 m hohe und von 1,50 m bis 2,50 m breite Aussteifungsringe betoniert.

Nach Fertigstellung der 6,00 m starken Fundamentplatte wurde der Verankerungsschacht mit 2,00 m dicken Wänden in Quer- und Längsrichtung ausgesteift. Zwölf der dadurch entstandenen 24 Waben sind mit Beton bzw. Sand verfüllt, wobei die verbleibenden zwölf mit Decken aus Stahlbetonfertigteilen in Form von Elementdecken verschlossen wurden. Diese dienten dann ebenso als Schalung für die abschließende bis zu 8,00 m starke Kopfplatte des Ankerblockes.

Der oberirdische Teil des Ankerblockes besteht auf der der Hängebrücke abgewandten Seite aus einem massiven Block aus Beton, in welchen die bis zu 151 MN Zugkraft des Hauptkabels über Stahlträger verankert sind, sowie zwei Pfeilern, welche als Auflager für die beiden Aufspleißsättel dienen. Im Anschluss wurden diese beiden Bauteile jeweils mit zwei längs verlaufenden Wänden sowie einer Decke ausgesteift und miteinander verbunden.

3.2.3 Hauptbrücke aus Stahl (Hängebrücke)

Die Herstellung aller Stahlbauteile begann im Frühjahr 2016 in China. In den Werken wurden diese Arbeiten durch die firmeneigenen Qualitätsabteilungen der Hersteller, beauftragte Drittfirmen und auch von GAUFF Engineering ständig überwacht. Die Stahlbauteile waren für die unterschiedlichsten Gewerke anzufertigen, wobei die Fabrikationsanlagen bis zu 3.000 km entfernt voneinander lagen. Bei der Produktion handelte es sich hauptsächlich um Seile, Kabel, Umlenk- und Aufspleißsättel, Hänger und die eigentlichen 57 Stahlsegmente für die Hängebrücke. Diese waren 25,60 m breit und 12,00 m lang bei einer Höhe von 3,00 m und wurden vor dem Schifftransport nach Maputo im Herstellerwerk probeweise in ganzer Länge zusammengebaut, um die Maßgenauigkeit auf der Baustelle mit den schwierigen Arbeiten über der Bucht zu gewährleisten.

Auf der Seite von Maputo bzw. Katembe liegen die verbundenen Stahlsegmente der Brücke auf dem unteren Querriegel der Pylone auf. Die vertikalen und horizontalen Lasten werden von je zwei Topflägern getragen. Diese haben eine Tragfähigkeit von 2,50 MN (vertikal) bzw. 4,50 MN (horizontal). Beide Lagertypen sind auf eine horizontale Bewegungsmöglichkeit von ± 760 mm und für eine Querbewegung von bis zu ± 50 mm ausgelegt (Bild 7).

Die auftretenden dynamischen Beanspruchungen in horizontaler Richtung aus Wind und Erdbeben werden über zwei Dämpfer je Seite mit einer aufnehmbaren Kraft von 700 kN auf einer Länge von ± 550 mm gedämpft. Die verbleibende horizontale Bewegung wurde als horizontale Kraft in der Bemessung der Pylone angesetzt.

Als Fahrbahnübergang zur nördlichen sowie auch südlichen Vorlandbrücke wurden Finger-

fugen mit einem Bewegungsspielraum von bis zu 1.520 mm eingesetzt.

Die orthotrope Fahrbahnplatte der Hängebrücke ist in $2 \times 16,00$ m und $54 \times 12,00$ m lange Einbauabschnitte unterteilt. Die Verbindungsstöße der innenliegenden, längsverlaufenden Aussteifungen wurden im Deckenbereich mit vorgespannten Schraubverbindungen ausgeführt und im seitlichen und unteren Bereich verschweißt – wie auch die umlaufenden Verbindungen zwischen den $56 + 2$ Stahlsegmenten, s. Bild 10 in Abschnitt 3.2.7. Als Stahlgüte für die Brückenkonstruktion wurde Q345C (GB) nach chinesischer Bezeichnung gewählt. Dieser Stahl stellt ein Äquivalent zu S355JR gemäß der europäischen Klassifizierung dar. Jedes Hohlkastenelement weist im Deckenbereich eine Blechstärke von 14 mm, an den Wind-Fairings 8 mm und im Bodenbereich von 10 mm auf.

3.2.4 Umlenk- und Aufspleißsättel

Vor dem Beginn des Einbaues der Tragkabel mussten die Umlenkpunkte mit den Hauptsätteln auf der Pylonspitze sowie in den Aufspleißsätteln in den Ankerblöcken eingerichtet werden. Um den Biegespannungen entgegenzuwirken, die durch das zunehmende Gewicht beim Einbau der Stahlsegmente in den beiden Pylonen entstanden, wurden die beiden Hauptsättel auf der Pylonspitze gleitend ausgebildet. Sie konnten bis zu 1,60 m horizontal verschoben werden und somit die Verformungen ausgleichen. Die Aufspleißsättel der Ankerblöcke – auf der zugewandten Seite zur Hängebrücke – hingegen sind gelenkig gelagert und konnten die Winkeländerungen der Kabel ausgleichen.

3.2.5 Kabel

Die Tragkabel in einer eingebauten und endgültigen Länge von 1.317,3 m wurden in China produziert und auf großen Transporttrommeln

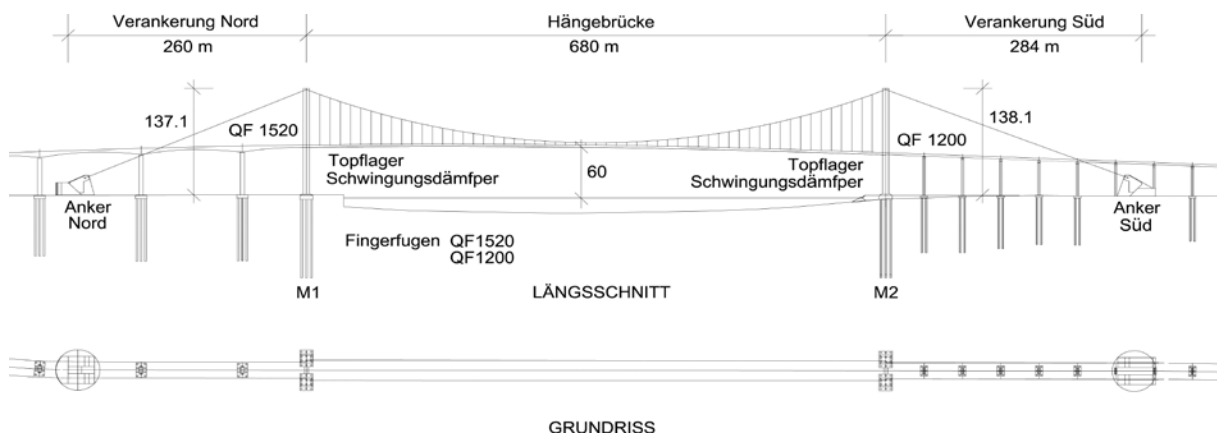


Bild 7 Hauptbrücke als konventionelle Hängebrücke mit 680 m lichter Weite

Grafik: Martin Pohl



Bild 8 Stahlbrücke von Nord nach Süd über der Kaianlage des internationalen Hafens

Foto: GAUFF Engineering

nach Maputo verschifft. Die Kabel bestehen aus 91 vorgefertigten Litzenbündeln, die wiederum aus 91 einzelnen, parallel liegenden Stahldrähten mit jeweils 5 mm Durchmesser bestehen, s. Bild 9. Sie sind aus hochfesten,

galvanisierten Drähten mit einer Zugfestigkeit von 1.680 MPa gefertigt.

Nachdem ein erstes Seil als Pilotseil aus Nylon per Boot über die Bucht gezogen wurde, konn-



Bild 9 Montagearbeiten der Hauptkabel vom Catwalk aus

Foto: GAUFF Engineering

ten die im Durchmesser stetig zunehmenden Stahlseile eingezogen werden. Nach dem Bau eines „Catwalk“ sowie eines großen Schleppliftes wurden die einzelnen Kabelbündel installiert und deren Litzen wiesen nicht nur einen hexagonalen Querschnitt auf, sondern wurden auch als solcher angeordnet und über 27 Einzelträger aus Stahl sowie 32 Doppelträger in den Ankerblöcken rückverankert. In weiterer Folge wurden die einzelnen Litzen des Tragkabels mit Hilfe eines Verdichtungsgerätes in eine runde Form gerüttelt und bis zum Einbau der Klemmen temporär mit Stahlbändern fixiert.

3.2.6 Klemmen und Hänger

Der Außendurchmesser der Hauptkabel beträgt 509 mm. Sie werden mit je 103 Kabelklemmen über der Bucht in Form gehalten, von diesen dienen 57 dabei der Aufhängung der Stahlsegmente. Die Halbschalen sind vertikal über bis zu 16 Stahlbolzen M36 je Klemme verbunden und wurden mit 450 kN nach einer genau festgelegten Reihenfolge vorgespannt. Die Längen der Hänger variieren zwischen 2,70 m in der Brückenmitte und bis zu 73,25 m in unmittelbarer Nähe der Pylone. Sie bestehen aus 63 bzw. auch 71 einzelnen Litzen und sind, abgesehen von der zweischaligen 8 mm dicken Kunststoffummantelung, von Material und Bauart identisch mit den Tragkabeln. Der

Anschluss an die Hänger sowie an die Stahlsegmente erfolgt über eine Bolzenverbindung und wurde je nach Länge des Hängers nur einachsrig oder auch zweiachsrig beweglich ausgeführt.

3.2.7 Stahlsegmente der Brücke

Die einzelnen bis zu 150 t schweren Stahlsegmente wurden mit dem Schiff von Shanghai in den Hafen von Maputo direkt unter der zu errichtenden Brücke angelandet und vom Schiffsdeck innerhalb von vier Wochen im Oktober 2017 nach oben aufgehängt (Bild 10), wo dann nach weiteren Vorbereitungen die umfangreichen mehrmonatigen Schweißarbeiten beginnen konnten.

Das Heben und Positionieren der Einzelsegmente erfolgte mit einem Kabelkran, der nicht nur horizontal und vertikal bewegt werden konnte, sondern auch Drehungen der einzelnen Segmente von 360° ermöglichte. Die Stahlsegmente wurden von der Mitte aus symmetrisch installiert. Da sich mit zunehmendem Baufortschritt das Gewicht der Brücke, die Form der Tragkabel und somit auch der Winkel der einzelnen Segmente untereinander veränderten, wurden diese temporär im Deckenbereich gelenkig miteinander verbunden. Nachdem alle Segmente installiert waren, konnte mit den Schweißarbeiten an den

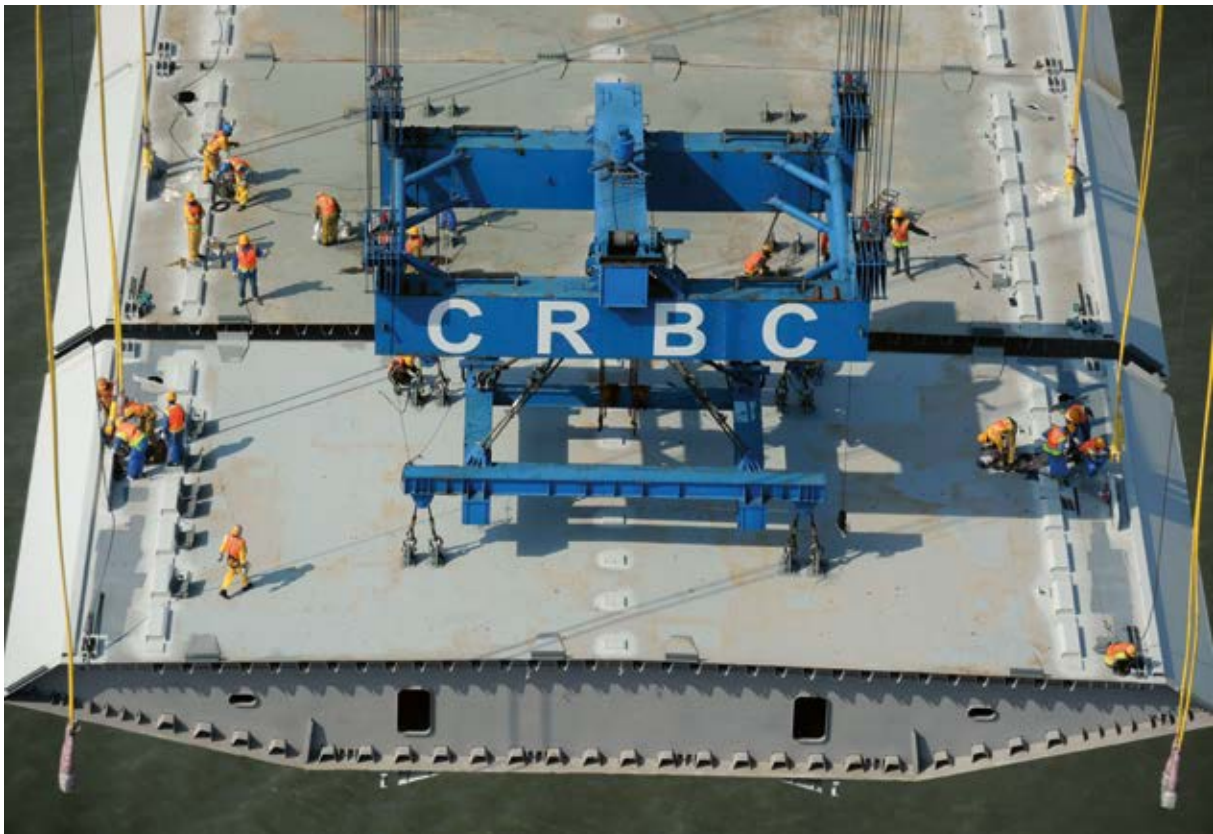


Bild 10 Einbau eines angehobenen Stahlsegmentes an das bestehende Brückenteil

Foto: GAUFF Engineering

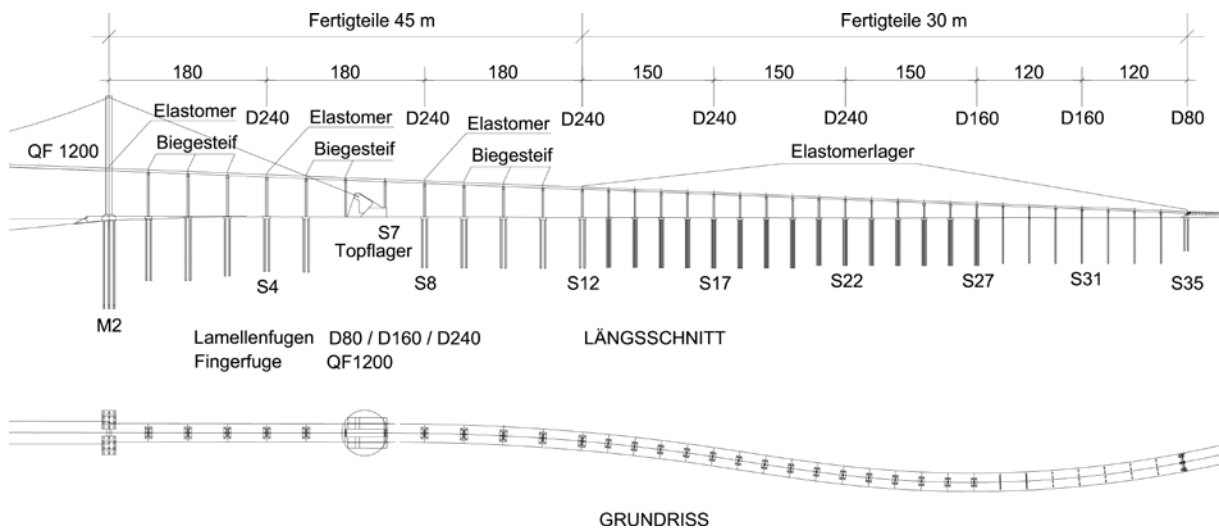


Bild 11 Südliche Vorlandbrücke mit eine Länge von 1.234 m

Grafik: Martin Pohl



Bild 12 Südliche Vorlandbrücke – System mit Fertigteilträger
Foto: GAUFF Engineering

57 Segmenten begonnen werden, wobei sich die chinesischen Normen bezüglich der Schweißarbeiten, der zerstörungsfreien Prüfungen wie auch bei dem Regelwerk für die mehrfachen Beschichtungen an den europäischen Vorschriften orientieren.

3.3 Vorlandbrücke Süd (Katembe)

3.3.1 Überblick Vorlandbrücke Süd

Aufgrund der spärlich besiedelten Südseite in Katembe im Bereich der Brücke konnten die Stützenabstände auf 30 m und auf 45 m bemessen werden, die eine kostengünstige und einfache Ausführung aus vorgespannten Fertigteilträgern ermöglichte (Bild 11). Um durch das gleichmäßige Längsgefälle von 4 % und die gewählten Spannweiten die erforderliche Höhe zur Überfahrt zu erreichen, waren 34 Stützen sowie ein Widerlager erforderlich.

Die Stützen S1 bis S5 mit einer Länge bis 50 m haben Außenabmessungen von 9,00 m × 2,80 m, sind innen hohl (Wandstärke 50 cm) und haben in halber Höhe eine Queraussteifung. Die Stützen S6 bis S12 sind baugleich, aber in ihren Abmessungen auf 2,50 m Breite reduziert. Die Stützen S13

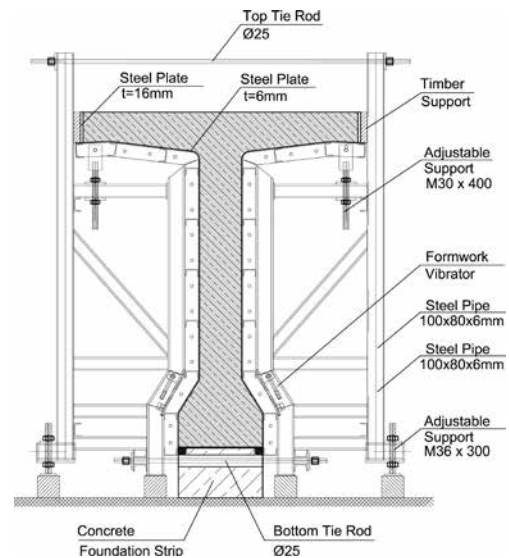


Bild 13 Fertigteilträger L = 30 m für die Vorlandbrücke Süd; Schalung (links) und Querschnitt (rechts)

Foto: GAUFF Engineering; Grafik: Martin Pohl

bis S27 hingegen sind rechteckige, massiv ausgebildete Betonstützen mit Abmessungen von 8,00 m × 1,80 m, gefolgt von den sieben verbleibenden Stützen S28 bis S34, die ebenfalls massiv mit jeweils vier runden Säulen mit einem Durchmesser von 1,40 m gebaut wurden.

Um die erforderliche Auflagerbreite des 20,88 m breiten Überbaus zu erreichen, sind die Stützen mit einem Stützenkopf versehen (Bild 12), der auch – wie bei der nördlichen Vorlandbrücke – in Querrichtung vorgespannt werden musste.

3.3.2 Überbau und statisches System

Die südliche Vorlandbrücke wurde im Bereich der 45,00 m langen vorgespannten Stahlbetonfertigteilträger in insgesamt 3 Abschnitte zu je 4 × 45,00 m = 180,00 m als Portalrahmen unterteilt, wobei die Verbindungen zwischen den Stützen und den Fertigteilträgern monolithisch hergestellt wurden. Bei den Stützen S4, S8 und S12 jedoch sind die Träger auf Elastomerlager aufgesetzt und die Fahrbahn mit Dehnfugen ausgerüstet. Eine Besonderheit stellt die Stütze S7 dar, da diese nicht nur auf dem südlichen Ankerblock positioniert ist, sondern dadurch auch in ihrer Länge um 10,0 m kürzer ist als die benachbarten Stützen. Aus diesem Grund ist der Überbau auf Topflagern gelagert, um die horizontalen Bewegungen aufnehmen zu können.

Der Überbau mit den 30,00 m langen Spannweiten wurde in drei Abschnitte zu je 5 × 30,00 m = 150,00 m sowie in zwei Abschnitte mit 4 × 30,00 m = 120,00 m unterteilt und ebenfalls als Durchlaufträger bemessen. Für die Auflager der vorgespannten Stahlbetonträ-

ger wurden an jedem Stützenkopf Elastomerlager verbaut. Diese mussten, wie bei der nördlichen Vorlandbrücke beschrieben, bei den Endauflagern gleitend ausgebildet werden. Die Fahrbahnübergänge der südlichen Vorlandbrücke wurden ebenfalls mit Lamellenfugen ausgebildet, die je nach Überbaulänge bis zu 240 mm Bewegung zulassen.

3.3.3 Vorgespannte Fertigteilträger

Der Überbau besteht aus jeweils neun nebeneinander liegenden vorgespannten Fertigteilträgern. Für die ersten zwölf Felder waren insgesamt 108 Stück der 45 m langen Träger erforderlich, gefolgt von 23 Feldern mit 207 Trägern mit 30 m Länge. Letztere weisen eine Höhe von 2,00 m mit einer Breite von 1,60 m auf, wobei die 45 m langen T-Träger mit einer Höhe von 2,70 m bemessen wurden, s. Bild 13. Zusätzlich sind, um die auftretenden Torsionskräfte aufnehmen zu können, quer zur Fahrtrichtung jeweils fünf bzw. sieben Querwände vorgesehen.

4 Besonderheiten

4.1 Beton

Im Süden von Afrika findet im 2-Jahresrhythmus der FULTON Award statt – ein internationaler Wettbewerb, bei dem außergewöhnliche Bauwerke und Neuentwicklungen in der Bauindustrie – vor allem beim Beton – eingereicht, beurteilt und ausgezeichnet werden. Im Jahr 2017 hatte die Baustelle für den eigens entwickelten Beton mit einer äußerst hohen Beständigkeit bzw. Dauerhaftigkeit den Technologiepreis gewonnen und wird auch bei dem

Wettbewerb in 2019 mit dem Gesamtbauwerk in der Kategorie von Bauwerken über 100 Mio. Rand (< 6,6 Mio. €) teilnehmen.

Das Bauwerk hat eine vertragliche Lebensdauer von 100 Jahren zu erfüllen und aus diesem Grund wurde dem Beton von Anfang an höchste Beachtung geschenkt. Zur Sicherstellung der Qualität des auf der Baustelle hergestellten Betons wurden Betonwürfel nach 3, 7, 28, 90 und nach 365 Tagen abgedrückt, um u. a. die Betondruckfestigkeit in der zeitlichen Entwicklung zu überprüfen [6], [7].

Durch Zugabe von Betonverflüssiger ergaben die Setzversuche Werte um 20 cm, sodass der Beton ohne Schwierigkeiten bis ca. 140 m hoch auf die Spitze des Pylons gepumpt werden konnte, was für südafrikanische Verhältnisse einen Rekord darstellte.

Als weitere Besonderheit der entwickelten Betonrezepturen ist der bis zu 40 % hohe Anteil an Flugasche zu nennen. Der Vorteil daraus, besonders für den Frischbeton, liegt in der Verbesserung der Verarbeitbarkeit, in dem Rückgang des Wasserbedarfs und einer geringfügigen Verzögerung der Abbindezeit. Für den erhärteten Beton liegen die Hauptvorteile in einer massiven Verringerung der CO₂-Emissionen um ca. 35 %, einer besseren Festigkeitsentwicklung und in einer Reduzierung der Produktionskosten um ca. 10 %. Weitere Vorteile sind die Verbesserungen der Beständigkeit gegenüber Chloridangriffen und Sulfat, eine Verfeinerung der Porenstruktur, die Reduzierung der Durchlässigkeit und die Verzögerung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Ein zusätzlicher Nutzen bei der Zugabe von Flugasche ist die Verringerung der bei der exothermen Reaktion entstehenden Wärme um 20 %, was bei Massenbeton von großer Bedeutung ist. Um das Risiko von durch thermische Spannungen entstehenden Rissen zu verringern, wurden ergänzend auch Kühlrohre im Beton bei entsprechend großen Betonmengen eingebaut, was besonders während der heißen Jahreszeit zwingend erforderlich war.

Umfangreiche Kernbohrungen im Beton erfolgten im Juli 2018 an

Bauwerksteilen des gesamten Infrastrukturprojektes, die seit dem Beginn in 2014 bis zur Fertigstellung in 2018 erstellt wurden, um die Dauerbeständigkeit nachträglich in Laboruntersuchungen zu bestätigen. Auf dem Gebiet der Untersuchungen und Nachweise und auch bei den Richtlinien für diese Verfahren, z. B. *Durability Index Testing nach SANS 3001-C03* [8], hat Südafrika weltweite Anerkennung erlangt – besonders die Universität in Cape Town, mit der die Baustelle zusammengearbeitet hat. Beispielhaft sind in Tabelle 1 Untersuchungsergebnisse von Laborversuchen von bis zu 3 ½ Jahre altem Beton wiedergegeben, aus denen die überragende Beständigkeit des Betons ersichtlich ist [9].

Das Gesamtvolumen des eingebauten Betons beträgt mehr als 340.000 m³. Insgesamt wurden zur Qualitätskontrolle 51.600 (!) 15er Betonwürfel hergestellt und in den zertifizierten zwei Baustellenlaboren abgedrückt. Mit nur 15 Würfeln, die die erforderliche Druckfestigkeit nicht erreichten, ist die Betonqualität für die Lebensdauer des Bauwerks bestens gewährleistet.

Tabelle 1 Laborergebnisse von Kernbohrungen nach SATCC „Durability“ [8]

KATEMBE DURABILITY INDEX TESTING SANS 3001-C03							
ELEMENT	OPI MEAN	Oxygen Permeability Index				COV %	S.D
		1	2	3	4		
Anchor Block	10,46	10,31	10,34	10,49	10,69	1,66	0,17
Pylon Tie Beam	11,27	11,11	11,46	9,23**	11,24	1,57	0,18
28 Day Cube	10,97	11,04	10,89	10,91	11,03	0,72	0,08
S16 Pile Cap	10,89	10,94	10,81	10,82	10,99	0,82	0,09
** Outlier result. Specimen result rejection due to oxygen leakage							
ELEMENT	Sorptivity Mean	Sorptivity				COV %	S.D
		1	2	3	4		
Anchor Block	4,24	6,01	2,99	4,19	3,78	30,15	1,28
Pylon Tie Beam	5,01	6,25	5,7	3,71	4,38	23,34	1,17
28 Day Cube	4,02	4,29	3,83	4,24	3,72	7,14	0,29
S16 Pile Cap	4,65	4,72	4,91	4,55	4,42	4,57	0,21
ELEMENT	CC Mean	Chloride Conductivity				COV %	S.D
		1	2	3	4		
Anchor Block	0,40	0,33	0,44	0,44	0,37	13,79	0,05
Pylon Tie Beam	0,23	0,2	0,22	0,25	0,26	11,84	0,03
28 Day Cube	0,92	0,81	1,02	0,88	0,98	10,34	0,10
S16 Pile Cap	0,70	0,53	0,83	0,54	0,88	26,75	0,19
Suggested ranges for durability classification using index values Research monograph no.2 MG Alexander, JR Mackechnie, Y Ballim							
Durability Class	OPI (Log scale)	Sorptivity (mm/v h)		Conductivity (mS/cm)			
Excellent	>10,0	<6		<0,75			
Good	9,5 - 10,0	6 - 10		0,75 - 1,5			
Poor	9,0 - 9,5	10 - 15		1,5 - 2,5			
Very Poor	<9,0	>15		>2,5			
SANRAL Durability Specifications Extracts from Table 6000/1 Concrete Durability Specification Targets							
Durability Class	OPI (Log scale)	Sorptivity (mm/v h)		Conductivity (mS/cm) 50mm			
Carbination induced Corrosion	> 9,6 min 9,2	<10,0 max 10,0					
Chloride induced Corrosion				<1,10			

4.2 Belastungsversuche von zwei unterschiedlichen Brücken

4.2.1 Grundlagen

Sowohl für die klassische Hängebrücke, wie auch für die nördliche Vorlandbrücke waren Belastungsversuche erforderlich. Das dreidimensionale linear-elastische FE-Modell der beiden Brücken, auf dem das ursprüngliche Design beruht, wurde im Laufe der Bauausführung kontinuierlich den tatsächlichen Gegebenheiten angepasst. Neben Änderungen in der Ausführung wurden vor allem die theoretisch angenommenen Materialkennwerte des Modells mit tatsächlichen Untersuchungsergebnissen, z. B. von dem Beton für die Vorlandbrücke ersetzt, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten. Durch die Belastungsversuche sollte dann bestätigt werden, dass das tatsächliche Verhalten der Brückenkonstruktion dem des Berechnungsmodells entspricht.

Vor den Versuchen erfolgte eine Null-Messung der beiden Brücken. Auf diese wurden dann die Verformungen aus den unterschiedlichen Versuchsreihen bezogen und abgeleitet. Um die Zug- und Druckspannungen in der Konstruktion selbst messen zu können, wurden sowohl bei der Hängebrücke als auch an den Freivorbaubrücken mehrere hundert Dehnmessstreifen installiert, um über die durch zusätzlich aufgebrachte Last verursachten Spannungsveränderungen auf den Bauteiloberflächen Rückschlüsse auf die maximalen Feld- wie auch Stützmomente zu erhalten.

Parallel dazu wurden beide Brücken und besonders bei der Hängebrücke sämtliche Bauteile – wie die Stahlsegmente und vor allem Schweißverbindungen, Lager, Tragkabel, Umlenk- und Aufspleißsättel –, Asphaltoberflächen sowie Betonoberflächen visuell inspiziert. Dieses wurde zwischen den statischen und dynamischen Versuchen sowie am Ende der Versuchsreihe wiederholt, um Einflüsse aus der Belastung auf die Tragkonstruktion zeitnah feststellen zu können. Die Versuche an der Hängebrücke erfolgten nachts, die an der Freivorbaubrücke tagsüber.

Entsprechend den chinesischen Spezifikationen JTG/T J21-01 2015 *Load Test Methods for Highway Bridge* [5] wurden im Berechnungsmodell die ungünstigsten Lastfallkombinationen aus einer Gleichlast von 10,5 kN/m sowie einer Einzellast von 360 kN ermittelt. In Abhängigkeit von der jeweiligen Spannweite und der Anzahl der Fahrstreifen konnten diese Lasten über Kombinationsbeiwerte abgemindert

werden. Die so berechneten Maximalwerte der Einflusslinie werden als *Design Load Effect* bezeichnet.

In weiterer Folge wurden diese definierten Lasten durch gezieltes Positionieren von 3-achsigen Lkw mit je 25 t Gesamtgewicht im Modell ersetzt, um möglichst wirklichkeitsgetreue Testbedingungen auch praktisch nachbilden zu können. Die daraus ermittelten Einflüsse auf die Brückenkonstruktion werden als *Test Load Effect* bezeichnet.

Laut der chinesischen Norm [5] wird der *Design Load Effect* zum *Test Load Effect* ins Verhältnis gesetzt und muss dabei einen Wert von 0,85–1,05 erreichen. Dieser Wert wird als Belastungseffizienz bezeichnet.

Die Be- wie auch die Entlastung der Brücke im Rahmen der Versuche wurde in jeweils drei Schritten durchgeführt: Messung ohne Belastung (Nullmessung), dann mit 1/3 der Last, 2/3 der Last, der Gesamtlast (3/3) und danach wieder in dem unbelasteten Zustand. Bei einer Abweichung von >5 % der tatsächlichen zu den theoretisch berechneten Messergebnissen mussten die Belastungsproben bis zur Klärung der Abweichung eingestellt werden.

4.2.2 Hängebrücke

Trotz der tagsüber recht kühlen Winterperiode in Maputo können sich die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht stark voneinander unterscheiden und besonders bei Stahlbauteilen signifikante Unterschiede in den Messungen verursachen. Daher wurden die Belastungsversuche für die Hängebrücke ausschließlich während der Nachtstunden durchgeführt, s. Bild 14. Damit war ein maximaler Unterschied von 4 °C während der jeweiligen Belastungssituationen sichergestellt.

Aufgrund der geografischen Lage der Brücke am Indischen Ozean sowie der Höhe des Überbaus in 60,00 m sah man sich täglich heftigen Windbewegungen gegenüber, weshalb eine maximale Windgeschwindigkeit von max. 10 m/s während der Messungen für die Versuche zugelassen war. Die Temperatur sowie die Windgeschwindigkeiten wurden in 20-Minuten-Intervallen gemessen bzw. protokolliert, um bei Überschreitungen der Messtoleranzen unvorhergesehene Einflüsse auch noch im Nachgang ableiten und beurteilen zu können.

Bei der Hängebrücke wurden elf Belastungssimulationen mit bis zu 56 3-achsigen Lkw mit einem Gesamtgewicht von jeweils 25 t durch-



Bild 14 Belastungsversuch der Hauptbrücke mit 56 Lkw zu jeweils 25 t in der Nacht

Foto: GAUFF Engineering

geführt. Diese wurden in vier unterschiedlichen Fahrbahnbereichen bei $L/2$, 5 $L/8$, 3 $L/4$ und 7 $L/8$ – mit L = Spannweite der Hauptbrücke – angeordnet. Aufgrund der nahezu symmetrischen Bauweise der Brücke waren die unterschiedlichen Belastungen nur auf einer Seite in Längsrichtung erforderlich (südlicher Teil).

Es ergaben sich elastische Durchbiegungen der Fahrbahn bis zu 1,15 m (!) sowie eine Verformung der Pylone zur Brückenmitte um 10,85 cm.

4.2.3 Freivorbaubrücke

Die Belastungsversuche der Freivorbaubrücke erfolgten jeweils in den beiden Bereichen N8–N9 und N15–Pylon M1 sowie in drei Hauptfeldern (N9–N10, N12–N13 und N14–N15). Sie konnten ohne negative Beeinflussung durch z. B. Temperaturunterschiede, Sonneneinstrahlung etc. tagsüber mit dem zuvor beschriebenen Ablauf durchgeführt werden. Die Verformungen der Brücke wurden an 28 verschiedenen Längspositionen jeweils auf der Asphaltoberfläche an den äußeren Fahrbahnrändern gemessen. Die elastischen Verformungen betragen bis zu 12,5 mm.

Der Abschlussbericht liegt aus Zeitgründen noch nicht vor und da an zwei weiteren Brü-

cken (stark gekrümmte Rampe im Norden und Fertigteilbrücke Süd mit den 45 m langen Trägern) aufgrund von deren ungewöhnlichen Abmessungen dynamische Versuche nach dem Verfahren BRIMOS [10] vorgesehen sind, wird über die Ergebnisse der drei Versuche an anderer Stelle gesondert berichtet werden.

4.3 Entfeuchtungsanlage

Für die Lebensdauer einer Hängebrücke sind die Tragkabel und somit deren Korrosionsschutz von ausschlaggebender Bedeutung [11]. Vor allem begünstigt durch das vorherrschende maritime Klima und bedingt durch die Lage an der Küste und der daraus resultierenden relativen Luftfeuchtigkeit von i. M. ca. 76 % in den Monaten Oktober bis April hat man sich bei der Maputo-Katembe-Brücke für eine permanent arbeitende Entfeuchtungsanlage entschieden. Weltweit sind derzeit nur 27 Brücken mit einer vergleichbaren Anlage in Betrieb.

Um jeglicher Korrosion in den Kabeln entgegenzuwirken, reduziert das Entfeuchtungssystem die relative Luftfeuchtigkeit auf bis zu 40 %, denn damit wird der Korrosionsprozess nahezu verhindert. Nach dem Abwägen von Vor- und Nachteilen hat sich der Bauherr aus

Gründen der Langlebigkeit, des niedrigen Wartungsaufwandes sowie des geringeren Stromverbrauches für das *Start-Stop*-System und gegen das *Non-Stop*-System entschieden. Beim Erreichen einer relativen Luftfeuchtigkeit von $\geq 50\%$ an den Messstellen läuft das *Start-Stop*-System automatisch an und schaltet sich bei 40% relativer Luftfeuchtigkeit wieder ab.

Die gesamte Entfeuchtungsanlage der Brücke besteht aus vier einzelnen in sich geschlossenen Systemen, die die Ankerkammern, Sattelräume, Hohlkästen aus Stahl sowie die Tragkabel bilden. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um Luftentfeuchter, Gebläse, Steuerschrank sowie Sensoren.

Die Funktion der Entfeuchtungsanlage für das Hauptkabel basiert auf einem einfachen Prinzip: trockene Luft wird über besondere Ventilklemmen in das Kabel eingeblasen. Diese Luft durchströmt das luftdicht verpackte Kabel, nimmt Feuchtigkeit auf und wird dann wieder nach außen abgeführt. In den Ankerkammern Sattelräumen und Stahlhohlkästen der Brücke hingegen zirkuliert die Luft in den jeweilig hermetisch abgeriegelten Räumen und die Feuchtigkeit wird über Luftentfeuchter nach außen abtransportiert. Der Probelauf zum Nachweis der Wirksamkeit und der Reduzierung der Feuchtigkeit im System nimmt ca. sechs Monate mit umfangreichen Messungen an ausgewählten Stellen in Anspruch, bevor der Bauherr dieses System verantwortlich übernimmt.

Zur Überwachung der gesamten Anlage sind zahlreiche Messsensoren eingebaut, die Daten über die Luftfeuchte, Temperatur und den Luftdruck in Echtzeit liefern. Diese werden in einem Kontrollraum gesammelt, wiedergegeben, aufgezeichnet und anschließend beurteilt. Im Falle einer Störung meldet das System einen Alarm und automatische Sicherheitsprogramme werden in Betrieb gesetzt.

5 Zusammenfassung

Die Maputo-Katembe Bridge ist nicht nur ein außergewöhnliches Bauwerk in Afrika, das eine Verbindung zwischen Mosambik und Südafrika schafft, sondern es gehört insgesamt zu den bedeutenden Infrastrukturbaumaßnahmen der vergangenen Jahrzehnte in Afrika. Ermöglicht wird sie durch die Finanzierung der EXIM Bank of China. Das Gesamtvorhaben inkl. von ca. 184 km Anschlussstraßen in Richtung Süden kostet ca. 780 Mio. USD (Stand 2018), eine Investition, die sich langfris-

tig positiv auf die lokale Wirtschaft in Mosambik auswirken wird.

Der Erfolg in diesem Vorhaben ruht unter anderem auf zwei Säulen: europäische Genauigkeit gepaart mit chinesischer und afrikanischer Gelassenheit; ein goldener Mittelweg für eine große Brücke!

Auch wenn es sich bei den Beschreibungen und Erläuterungen um für europäische Verhältnisse zum Teil selbstverständliche Themen handelt, zeigt der Beitrag, dass sich chinesische Baufirmen im internationalen Geschäft qualitätsmäßig weiterentwickeln und in absehbarer Zeit beständig an technischer Kompetenz gewinnen werden. Hierbei wachsen in Asien starke Wettbewerbsfirmen für die etablierten europäischen Baukonzerne heran, die auch von der großen Bereitschaft chinesischer Banken profitieren, Infrastrukturprojekte im Ausland zu finanzieren. Um sich weiterhin stetig zu verbessern, ist kontinuierliches Lernen von und mit Anderen im Team angesagt. Ein Beleg dafür ist die erfolgreiche Kooperation bei diesem Projekt in Mosambik zwischen einem international tätigen Consultant – wie im vorliegenden Fall von GAUFF Engineering – mit einem der größten chinesischen Bauunternehmen CRBC.

Literatur

- [1] Tavares Bollow, S.; Streit, B.; Seitz, J.: Großbrückenbau am Beispiel von Afrikas größter Hängebrücke in Maputo / Mosambik. In: Fischer, O.; Förderverein Massivbau der TU München e.V. (Hrsg.): Tagungsband zum Münchener Massivbau Seminar 2015, München: Technische Universität München, 2015, S. 97-110
- [2] International Federation for Consulting Engineers (FIDIC, Hrsg.): Conditions of Contracts for EPC/Turnkey Projects (Silver Book). 1. Aufl., Genf, 1999
- [3] Svensson, H.: Schrägkabelbrücken: 40 Jahre Erfahrung weltweit. Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, 2011
- [4] Seitz, J.; Pohl, M.; Maeiro, J.: Afrikas größte Hängebrücke in Mosambik – Technische Besonderheiten. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), best. 201800078 (zur Veröffentlichung angenommen)
- [5] Technical Specifications for Construction of Highway Bridges and Culverts, JTJ 041-2000, Professional Standard of the Peoples Republic of China. Beijing (Republic of China), 2000

- [6] Swanepoel, D.; Seitz, J.; Bai, P.: Use of fly ash for Africa's largest suspension bridge in Mozambique. In: Beushausen, H. (Hrsg.): Performance-based approaches for concrete structures – Proc. of fib Symp. 2016, 21.–23.11.2016 in Kapstadt (Südafrika), 2016, Paper 148, 10 S.
- [7] Swanepoel, D.; Seitz, J.; Pengyu, B.: Concrete of highest quality for Africa's largest suspension bridge; durability and workability. Cement 69 (2017) 3 (special issue), S. 8-13
- [8] Straßen- und Transportbehörde Südafrika (CSIR, Hrsg.): SATCC, Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts. Ausgabe 09/1998, Reprint 2001
- [9] Swanepoel, D.; Seitz, J.: Stringent material control of concrete material for Africa's longest suspension bridge. Beitrag zur Veröffentlichung angenommen für: Proc. of 2nd RILEM Spring Convention and International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019), 18.–22.3.2019 in Rovinj (Kroatien)
- [10] Wenzel, H.; Pichler, D.: Ambient Vibration Monitoring. Chichester: John Wiley & Sons, 2005, hier v. a.: Kap. 4.3.1, S. 89 ff.
- [11] Alampalli, S.; Moreau, W. J. (Hrsg.): Inspection, Evaluation and Maintenance of Suspension Bridges. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016

ADVANCE BRIDGE

Effiziente und leicht zu bedienende
Komplettlösung zur Planung und
Berechnung von Fuß- und Radweg-,
Straßen- und Eisenbahnbrücken

- Überbauberechnung
- Gründungen
- Rahmenbauwerke
- Vorspannung
- Stahlverbund
- Fertigteil
- Eisenbahnbrücken
- Erdbeben
- Nachrechnung
- Militär- und Sonderlasten
- Lehrgerüst

GRAITEC

GRAITEC Innovation GmbH
Tel. +49 (0)511 / 4 10 27-0
info.germany@graitec.com
www.graitec.de



-
- 9 Herzlich willkommen zum 29. Dresdner Brückenbausymposium
 - 13 Verleihung der Wackerbarth-Medaille
 - 14 Laudatio für Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stritzke aus Anlass
der Verleihung der Wackerbarth-Medaille der Ingenieurkammer Sachsen
 - 17 Christian Menn – Brückenbauer, Lehrer, Ästhet
 - 25 Aktuelles zum Regelwerk des Bundes für den Ingenieurbau
 - 29 Die Maputo-Katembe-Brücke, das neue Wahrzeichen Mosambiks –
Drei Bauverfahren bei der längsten Hängebrücke Afrikas
 - 47 Monitoring und Visualisierung im Infrastrukturbau
 - 59 Verkehrsinfrastruktur für Hamburg –
Neubau der Waltershofer Brücken im Hamburger Hafen
 - 73 Erfahrungsbericht aus Österreich über die Anwendung
von neuen Verfahren im Brückenbau
 - 85 Stahlverbund-Großbrücken mit oberliegender Fahrbahn
als Querschnitte mit Teilfertigteilen und Schrägstreben bzw. Konsolen
 - 101 Kurt Beyers Beitrag zur Baustatik
 - 129 Nachrechnungsdefizite bei Massivbrücken –
Ein Problem der Tragfähigkeit oder [doch nur] der Modellvorstellung?
 - 149 Was tun, wenn Annahmen und Wirklichkeit nicht übereinstimmen?
 - 161 Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile
von Brücken- und Tunnelbauwerken
 - 173 Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken
mit Halffertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton
 - 185 Der 30-Jahre-Zyklus der Brückeneinstürze und seine Konsequenzen
 - 197 Chronik des Brückenbaus
 - 209 Inserentenverzeichnis