

Gebaute Physik: Die Sutong-Brücke

Text/
Fotos/

PETER LEUTEN
DOKA, EMPA, MAURER & SÖHNE,
PUTZMEISTER, WIKIPEDIA

Ohne Computer und aufwändige Rechenmodelle wäre sie nicht einmal denkbar. Denn dass die Sutong-Brücke nicht im Schlamm des Jangtze versinkt, vermag der normale Menschenverstand nicht fassen. Dennoch kann das gewaltige Bauwerk sich nicht über die Grenzen physikalischer Gesetze hinwegsetzen. Im Gegenteil: Es nutzt sie auf beispiellos intelligente Weise



Die

Worte von Qu Yongguo, Chef der Kommission für außenwirtschaftliche Zusammenarbeit und kommunale Entwicklungsplanung der chinesischen Provinz Jiangsu, waren an Großspürigkeit kaum zu überbieten, als er 2002 am 23. April in der Jiangnan Times der Öffentlichkeit die Pläne für einen Brückenschlag über den Changjiang, in Europa eher bekannt als Jangtse Kiang, präsentierte:

An einem immerhin noch weit über sieben Kilometer breiten „Nadelöhr“ des ansonsten hier bereits bis zu 14 km breiten Stroms solle eine auf über 140 Pfeilern ruhende Brücke errichtet werden, die als 6-spurige Flussquerung die Städte Nantong und Suzhou (daher der Name Su-tong) verbindet. Zwar sei es, wie dort des weiteren zu lesen war, „mit den verfügbaren Technologien bislang nicht möglich gewesen, eine solche Brücke zu bauen; doch jetzt, wo es möglich geworden sei, wäre es besser, anstatt das Projekt ausländischen Firmen zu übertragen, es von Chinesen selbst errichten zu lassen.“

Starker Tobak! Und so natürlich auch nicht richtig. Doch dazu später. Richtig ist, dass hier ein weiteres überaus gigantisches Bauwerk in einem ohnehin an Superlativen nicht armen Land entstehen würde. Doch bevor man, wozu diese Stilblüte kommunistischer Rhetorik eigentlich eine treffliche Steilvorlage liefern würde, sich in das Klischee eines aus Geltungssucht zum Abnormen neigenden Staats- und Parteiapparates flüchtet, um die übertriebenen Dimensionen eines solchen Projekts zu relativieren, sei hier, bevor der eigentliche Bau ins Zentrum des Interesses rückt, zunächst einmal der Blick auf die zugrunde liegenden Notwendigkeiten des Bauwerks geworfen.



Der Strom als Grenze

Bereits zum Zeitpunkt der Ankündigung des Baus setzten, so Qu Yongguo, mittels der insgesamt vier vorhandenen Autofähren täglich über 13.000 Fahrzeuge über den Fluss; bei einer gut einstündigen Wartezeit und etwa 45 Minuten Fahrtdauer ein Unterfangen, das gut und gerne auch zwei Stunden und länger in Anspruch nehmen könne. An 10-15 Tagen im Jahr müsse der Fährverkehr wegen Nebels oder starker Winde sogar völlig eingestellt werden. Schon damals, noch in der Anfangsphase des Booms in China, prognostizierten die Behörden eine jährliche Steigerungsrate des Verkehrs von 15% und somit für das Jahr 2005 bereits weit über 40.000 Fahrzeuge, die den Strom überqueren wollten. 2025 würden es demnach bereits fast 90.000 Fahrzeugtransfers sein. Im Fährbetrieb ist dieses Volumen nicht mehr zu bewältigen.

Überdies wird die Wasserstraße an dieser Stelle täglich von rund 2500 Schiffen befahren – darunter zahllose der großen Container-Carrier. Eine entsprechend erhöhte Zahl von Fahrten der Fähren würde also die Schifffahrt auf dem Strom erheblich behindern und zudem auch ein beträchtliches Risiko darstellen. Seit 1997 seien, so die Jiangnan Times, allein 115 Schiffe gesunken und 93 Menschenleben zu beklagen. 1987 waren der bislang schlimmsten Kollision zwischen einer Fähre und einem Lastkahn 114 Menschen zum Opfer gefallen.

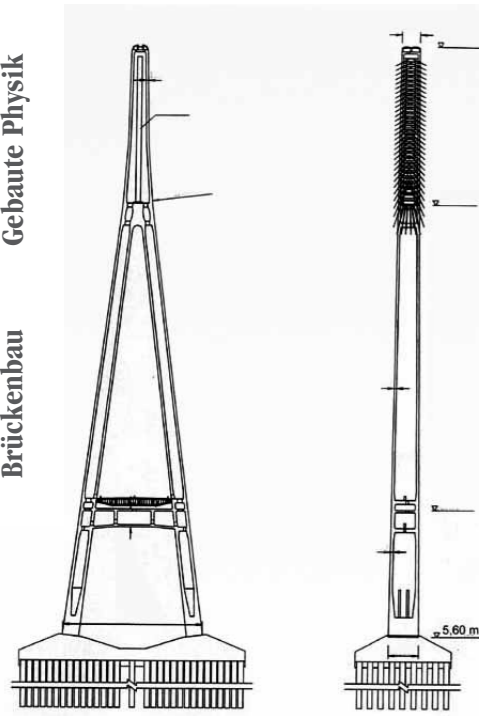
Das schier Unmögliche bewältigen

Wäre der Bau damit auch nach unseren westlichen Standards hinreichend gerechtfertigt, so fangen die Probleme bei einer ernsthaften Auseinandersetzung mit den realen Gegebenheiten vor Ort erst wirklich an: Denn um den für den enormen Warenverkehr des Wirtschaftsriesen lebenswichtigen Containerschiffen freie Durchfahrt zu gewähren, war im Bereich der Hauptfahrrinne eine Spanne von weit über 1.000 Metern zu überbrücken. Nur so ließ sich auf Höhe der Wasserlinie eine lichte Durchfahrtsbreite von rund 900 Metern gewährleisten. Wegen der außerordentlichen Höhe dieser gigantischen Schiffe der so genannten 4. und 5. Generation durfte zudem der Brückenträger an seiner tiefsten Stelle nicht unterhalb einer Sollhöhe von 62 Metern liegen. Doch damit nicht genug. Eine bereits Jahre zuvor erfolgte Durchführbarkeitsstudie für eine Überquerung der Straße von Nantong hatte zu Tage gefördert, dass man im Flussbett des mächtigen Stroms erst in sehr großen Tiefen von über 270 Metern auf festen Untergrund stoßen würde. Ein zunächst ebenfalls erwogener Tunnelbau schied also aufgrund der außerordentlichen Mächtigkeit der Schlammablagerungen von vorne herein aus.

Insofern schränkten die Bodenbeschaffenheit und die erforderliche Breite der Fahrrinne den Spielraum in Frage kommender Konstruktionen enorm ein. Hängebrücken weitaus größerer Spannweiten waren zwar längst realisiert worden, doch ihrer Konstruktion wohnt ein in der hier anzutreffenden Situation entscheidender Nachteil inne: Sie kommen nicht ohne eine massive Rückverankerung aus. Und da diese immensen Zugkräften widerstehen muss, ist sie zwingend im Untergrund zu verankern. Ist das nicht möglich, dann muss, wie zum Beispiel bei der japanischen Akashi-Kaikyo-Brücke, das Widerlager als Schwergewichtsfundament ausgeführt werden, das im genannten Fall ein geschätztes Gewicht von weit über 500.000 Tonnen erreicht. Ein solcher Koloss jedoch wäre binnen kürzester Zeit im Schlamm des Jangtse versunken. Und die Anker in Erwartung besserer Bodenverhältnisse in der Nähe der beiden Ufer zu positionieren verbot sich allein wegen der Breite des Stroms.

Einzig vom vor etwas mehr als 50 Jahren in Deutschland erfundenen Typus der Schrägseilbrücke gab es bereits Beispiele, die in die Nähe der erforderlichen Breite der Hauptfahrrinne kamen. Bei diesem Brückentyp entstehen keine Zuglasten; ihre Statik beruht in erster Linie auf einem Gleichgewicht zwischen den zu beiden Seiten eines Pylons angeordneten Bauteilen. Doch auch die bislang längste Schrägseilkonstruktion, die Tataro Ohashi Brücke in Japan, verfehlte mit immerhin 890 Metern die geforderte Spannweite noch um 200 Meter.





Stäbchen im Tofu

Kam also einzig diese moderne Konstruktion in Betracht, die Fahrhinne des Jangtse zu überspannen, stellte dennoch vor allem die Bodenbeschaffenheit eine fast kaum zu meisternde Herausforderung dar. Wie sollte im weichen Untergrund des mächtigen Stroms eine derart gewaltige Brücke Halt finden? Die Lösung des Problems scheint dem gesunden Menschenverstand zu trotzen und sich über jedweden – auch noch so unterschiedlichen – individuellen Erfahrungsschatz hinwegzusetzen: Die Fundamente der Brücke und damit auch die gewaltigen Pylone ruhen letztlich auf einer Vielzahl bis zu 120 Meter tief in den Schlamm getriebener Betonpfähle! Diese erreichen aber keineswegs den felsigen Untergrund; sie „schwimmen“ gewissermaßen in den tieferen Schlamm- und Tonschichten der Flussbetts.

Grundlegende Gesetzmäßigkeit für eine solch wagemutige schwimmende Gründung ist zunächst eine hinlänglich bekannte Erfahrung, die beim Abschluss von Gründungsarbeiten wie etwa dem Ausziehen von Stahlspundwänden völlig normal erscheint: die Stahlprofile unterliegen auch im relativ weichen Boden einer enormen Reibung und es bedarf eines gehörigen Energieaufwands, sie aus diesem Untergrund zu befreien. Mittels modernster Computerverfahren, wie zum Beispiel der Berechnung nach dem Finite Elemente-Modell, wurde es möglich, sich dieses physikalischen Phänomen zu Nutze zu machen.

So konnte zunächst theoretisch erwiesen werden, dass ein Areal eines an sich weichen Bodens, welches von einer größeren Zahl von Pfählen durchdrungen wird, die je nach Bodenbeschaffenheit eine bestimmte Länge und einen bestimmten Durchmesser aufweisen und in einer bestimmten Dichte angeordnet sind, sich physikalisch nicht mehr als amorphe Masse sondern als Block verhält, dessen Grenze von den zu äußerst stehenden Pfählen markiert wird. So können diese Pfähle im Verbund also auch in einer

Montage des Kastenträgers im Bereich des Hauptfelds der Brücke: Die einzelnen Segmente werden von einer Hebevorrichtung auf Soll-Niveau gehoben

solchen Umgebung enorme Lasten tragen. Ungeheurer Vorteil dieses völlig neuen Ansatzes ist die enorme Gewichtsreduzierung: Man erhält ein Fundament, dessen Gewicht ausschließlich aus der eingesetzten Zahl der Betonpfähle resultiert. Die Fundamente der Sutong-Brücke basieren auf diesem völlig neuen Konzept und zählen – nachdem es erst wenige Jahre zuvor in der Praxis untermauert werden konnte – zu seinen ersten großtechnischen Anwendungen überhaupt. Doch selbst die Spezialisten auf der Baustelle scheinen ihre Mühe zu haben, diesen Effekt zu vergegenwärtigen: „Es ist“, wie der leitende Ingenieur gegenüber einer Besuchergruppe in eindringlichen Worten illustrierte: „so, als würde man Stäbchen in Tofu stecken und versuchen, diese zu fixieren.“

Diese „Stäbchen“ sind im Falle der Fundamente der riesigen Pylone der Sutong-Brücke jeweils 200 in den Boden getriebene Großbohrpfähle. Zu ihrer Herstellung wurden Stahlrohre von zweieinhalb Metern Durchmesser und 2,5 cm Wandstärke zunächst rund 120 Meter tief in das Flussbett gerammt. Anschließend erfolgte das Ausbaggern des von den unten offenen Rohren umschlossenen Erdreichs. Nach Einbringung der Stahlbewehrung konnte das innere der Rohre schließlich ausbetoniert werden. Noch während des Aushärtens wurden die Rohre wieder gezogen.

A wie Aussicht: die höchsten Pylone der Welt

Anspruchsvollste Aufgabe bei Errichtung der riesigen Brücke waren die beiden gewaltigen Pylone, die mit ihrer A-Form zugleich die auffälligsten Bestandteile ihres Oberbaus darstellen. Anspruchsvoll nicht allein wegen ihrer schieren Größe sondern vor allem auch wegen ihrer überaus dichten Stahlbewehrung und der überaus verschleißträchtigen Mischung aus hochfestem C80-Beton mit grobkörnigen Granitzuschlagsstoffen. Um einen möglichst kontinuierlichen Nachschub an Frischbeton zu





Erstmaliger Einbau adaptiver Schrägseildämpfer auf der IJssel-Brücke bei Kampen (Niederlande)

gewährleisten, wurde seitlich der Haupttürme jeweils ein mobiles Betonmischwerk auf einem Ponton festgemacht. Der Frischbeton gelangte mit leistungsstarken Pumpen zu den Doka-Kletterschalungen in die Höhe. Nach ungefähr 17 Monaten und 68 Betonierabschnitten erreichten die Pylone ihre endgültige Höhe von 306 m.

Noch während sich diese nunmehr höchsten jemals gebauten Brückentürme im Dreitages-Takt um jeweils viereinhalb Meter über die Wasserfläche erhoben, wurden die beiden seitlichen, weit in den Strom gebauten Rampen, die nach dem Prinzip der Balkenbrücke entstanden, montiert. Die einzelnen vorgespannten Stahlbeton-Fertigteile des Trägers ließ man in einer Feldfabrik nahe der Baustelle fertigen und mit Lastkähnen zur Baustelle fahren. Dort wurden sie auf die bereits fertiggestellten Teile der Rampen gehoben und von dort mittels einer Vorschubeinrichtung bis zum jeweils nächsten freien Feld vorgefahren und anschließend auf die Pfeiler abgesetzt.

Die stählernen seitlichen Nebenseilkonstruktion entstanden zunächst auf provisorischen Hilfsstützen, die nach Fertigstellung des Baus wieder abgebaut werden mussten. Denn dieser Bereich ist als Durchfahrt für die zahlreichen Lastkähne auf dem Jangtse vorgesehen. Für den Zeitraum der Bauarbeiten jedoch war dieser seitlich der Hauptfahrrinne verbaute Bereich des Stroms entbehrlich und so konnte hier der im Bereich der Hauptbrücke aus Stahl erstellte Brückenträger schon eingebaut werden, noch bevor der eigentliche Lückenschluss einsetzte.

Riskantes Unterfangen

Dieses im freien Vorbau erstellte Hauptfeld der Brücke markiert den spektakulärsten und mit Abstand riskantesten Teil der gesamten Bauarbeiten. Denn um so weiter die beiden unverbundenen Enden des Trägers, einzig von den Schrägseilen gehalten, aufeinander zu und damit über den Abgrund hinaus wachsen, um so anfälliger sind sie gegen äußere Einflüsse. Bis zu 540 Meter betrug die Auskragung, bevor der Konstruktion mit dem Einsetzen des letzten Teils ihre stetig zunehmende Labilität genommen wurde. Hatte die Sutong-Brücke mit Fertigstellung des Brückenträgers auch einen statisch stabilen Zustand erreicht, stellt ein Teil ihrer Konstruktion doch dauerhaft eine Achillesverse dar: Denn die bis zu 541 Meter langen schräg verspannten Tragkabel der Brücke unterliegen bei Seitenwind einer physikalisch bedingten und damit unvermeidbaren Schwingungs-Neigung.

Wie eine Harfe im Wind

Die Schwingungs-Neigung der Seile rührt zunächst aus dem Umstand, dass die Seile der Brücke wie die Seiten eines Musikinstruments einer enormen Zugbelastung unterliegen und damit „gespannt“ sind. Die eigentliche Schwingung setzt jedoch nur dann ein, wenn Wind aufkommt: Luft, die einen zylindrischen Körper, etwa eine dicke Stahltrasse, umströmt, bildet, nachdem sie den Körper passiert hat, hinter ihm einen Wirbel. Ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit bauen sich diese Wirbel abwechselnd mal an der linken Flanke des Körpers, mal an seiner rechten Flanke auf. Der Wechsel dieser gegensinnig drehenden Wirbel führt nun zu einem geringfügigen Druckunterschied, der das Kabel minimal auf die eine oder andere Seite zieht. Da die Abfolge dieser Wechsel mit der jeweils aktuellen Windgeschwindigkeit variiert, liegt die Schwingung oft genau im Resonanzbereich des Kabels; dann schaukelt sich Bewegung zu immer größeren Amplituden auf.

Dies kann für eine Brücke irgendwann zum Problem werden. So hatten etwa orkanartige Winterstürme zwischen 2005 und 2006 die bis zu 220 Meter langen Seile der "Franjo Tuđman Brücke" im kroatischen Dubrovnik zu derart heftigen Schwingungen angeregt, dass Schäden an der Seilmantelung und an einzelnen Litzen der Seile entstanden. Erschwerend kam in diesem Fall noch hinzu, dass der an den Seilen haftende Schnee ihnen ein Tropfenprofil verlieh und sich damit auch noch Auf- und Abtriebskräfte überlagerten. Schwingungsamplituden von rund zwei Metern waren die Folge.

Um dem entgegen zu wirken sorgt bei der Sutong-Brücke eine spezielle Kabelbeschichtung mit einer unregelmäßigen Oberfläche für einen jeweils minimal versetzten

Winkel der Wirbel, damit sich die so entstehenden Teil-schwingungen bis zu einem gewissen Grade gegenseitig auslö-schen und sich aufgrund versetzter Schwingungsebenen nicht so leicht zu einer einheitlichen Schwingung addieren. Die Profilierung wurde von der Tongji-Universität in Shanghai entwickelt und im dortigen Windkanal getestet.

Stillgelegt: Brücken ohne Schwung

Doch die Sutong-Brücke ist nahe der Chinesischen Küste regelmäßig pazifischen Wirbelstürmen ausgesetzt, die in Europa bislang unbekannte Windgeschwindigkeiten von bis zu 250 Kilometer in der Stunde erreichen können und befindet sich zudem in einer exponierten Lage inmitten einer mindestens sieben Kilometer breiten Wasserfläche. Die bis zu 541 Meter langen Schrägseile der Brücke bedürfen daher weiterer Maßnahmen zur Schwingungsunterdrückung. Diese Aufgabe übernehmen so genannte magnetorheologische Fluid-dämpfer, die in einer Kooperation zwischen dem Münchener High-Tech-Unternehmen Maurer und Söhne und der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt Empa entwickelt wurden. Sie bestehen wie die Stoßdämpfer eines Autos aus einem Zylinder, der mit einem Spezialöl gefüllt ist. Zudem enthält das Öl hier aber noch einen bestimmten Anteil magnetisierbarer Teilchen. Außen umschließt diesen Zylinder eine elektrische Wicklung mittels der im Zylinder ein Magnetfeld erzeugt werden kann. Je nach Stromstärke bilden die magnetisierbaren Teilchen in unterschiedlichem Maße Ketten, die dazu führen, dass das Öl verklumpt. Das Öl wird zäher und hemmt zusehends die Kolbenbewegung im Dämpfer, der folglich der aufgezwungenen Bewegung mehr Widerstand entgegengesetzt. Dieser Vorgang wird nun computergesteuert nach einem eigens erarbeiteten Regelalgorithmus der aktuellen Situation angepasst.

Schweizer Präzision

Bei der Sutong-Brücke wurden die jeweils sechs längsten der insgesamt 272 Schrägseile mit diesen Feedback-geregelten, magnetorheologischen Fluid-dämpfern (MR-Dämpfern) ausgestattet; weitere 152 konventionelle Dämpfer mit fester Dämpfungswirkung sollen die Schwingungen der Kabel mittlerer Länge im Zaume halten. Vor dem Einbau mussten sich die Dämpfer auf dem Testgelände des chinesischen Seilherstellers "Fasten" einer ausgeklügelten Versuchsreihe stellen. In einem rund 250 Meter langen und einen Meter tiefen Beton-graben wurde ein 228 Meter langes Brückenseil gespannt. Die MR-Dämpfer konnten bei allen Variationen des Versuchsaufbaus einen sehr hohen Wirkungsgrad erzielen. Die künstlich erzeugten Schwingungen wurden mindestens um den Faktor 10 gedämpft. Sollte das Computersystem abstürzen oder gar der Strom ausfallen, stellen sie die MR-Dämpfer auf einen mittleren Dämpfungswert ein, so-dass auch in diesem Fall die Stabilität des Bauwerks nicht gefährdet ist.

Die Gewährleistung größtmöglicher Sicherheit hatten die Verantwortlichen auch im Sinn, als sie vor der Freigabe der Brücke einen Belastungstest anordneten; Am 15. Januar 2008 ließen sie auf die Mitte des Hauptfelds der Brücke 65 voll beladene Lastkraftwagen abstellen. Dabei verformte sich der Hohlkastenträger mit der Fahrbahn um 22 Zenti-meter; 3 Zentimeter weniger als nach der statischen Berechnung vorausgesagt. ■