



# Wie ARUP die EFTE-Kissen vom Water Cube errechnete

Text: Tristram Carfrae

**Architektur- und Sporttouristen fotografieren jenseits der Bau- und Sicherheitszäune. Die Konstruktion von Dach und Wand des Wasserwürfels besteht aus 22.000 Trägern und 12.000 Knoten, ein äußerst diffiziles Tragsystem nach dem Prinzip des Weaire-Phelan-Schaums.**

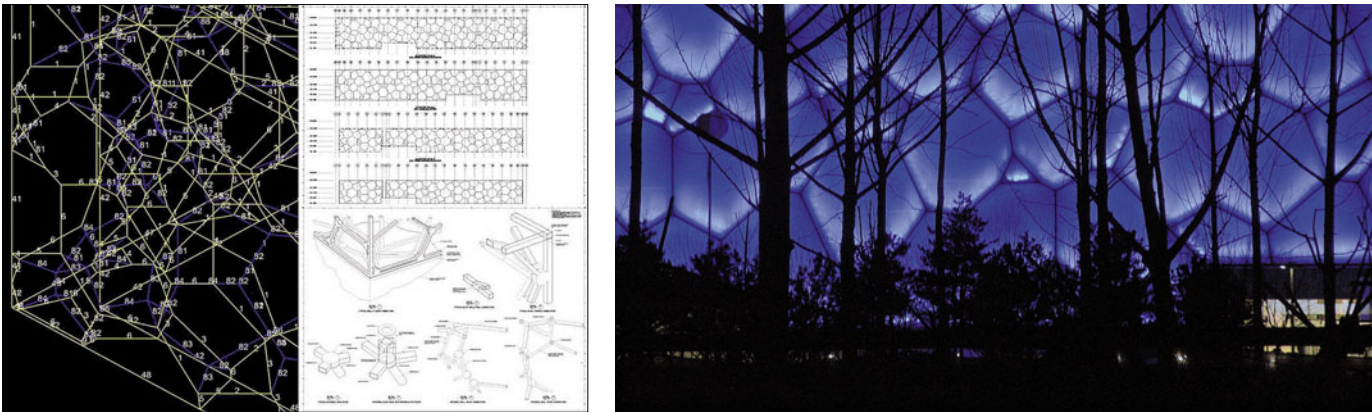
Fotos: Werner Huthmacher (oben), Arup Hong Kong

Der Water Cube ist das außergewöhnliche Ergebnis einer außergewöhnlichen Zusammenarbeit. Wir waren gleiche Partner: PTW Architects, China State Construction Design International und Arup. Von Anfang an hatten wir ein gemeinsames Ziel: Mit unserer „Box of Bubbles“ wollten wir so viel Sonnenenergie wie möglich einfangen, um damit die Schwimmbecken zu beheizen und die Innenräume zu belichten. Nur deshalb wurde für die Fassade und das Dach eine Bekleidung aus EFTE-Kissen gewählt, nicht aus modischen Gründen. EFTE-Folien haben eine Lichtdurchlässigkeit von 95 Prozent, eine hohe UV-Durchlässigkeit, sie gewährleisten eine gute Akustik und reduzieren das Gewicht (ein wichtiger Gesichtspunkt in einem Gebiet mit starken seismischen Aktivitäten). In Schwimmzentren ist es notorisch laut: Der Lärm, den schreiende Kinder und Erwachsene machen, wird von horizontalen Oberflächen zurückgeworfen und verstärkt. In einem Würfel aus Glas wäre dieses Problem extrem verschärft worden, während EFTE-Kissen Geräusche weitgehend durchlassen und so eine Akustik bieten, die einer Freiluftanlage ähnelt.

Der Water Cube, die „blaue Schachtel“ mit quadratischem Grundriss, ist so gesehen eine kongeniale Ergänzung zu den







**Gesamtplanung**  
CCDI China Construction  
Design International, Beijing  
PTW Architects, Sydney  
ARUP, Sydney und Beijing

**Projektteam CCDI**  
Zhao Xiaojun, Wang Min,  
Shang Hong

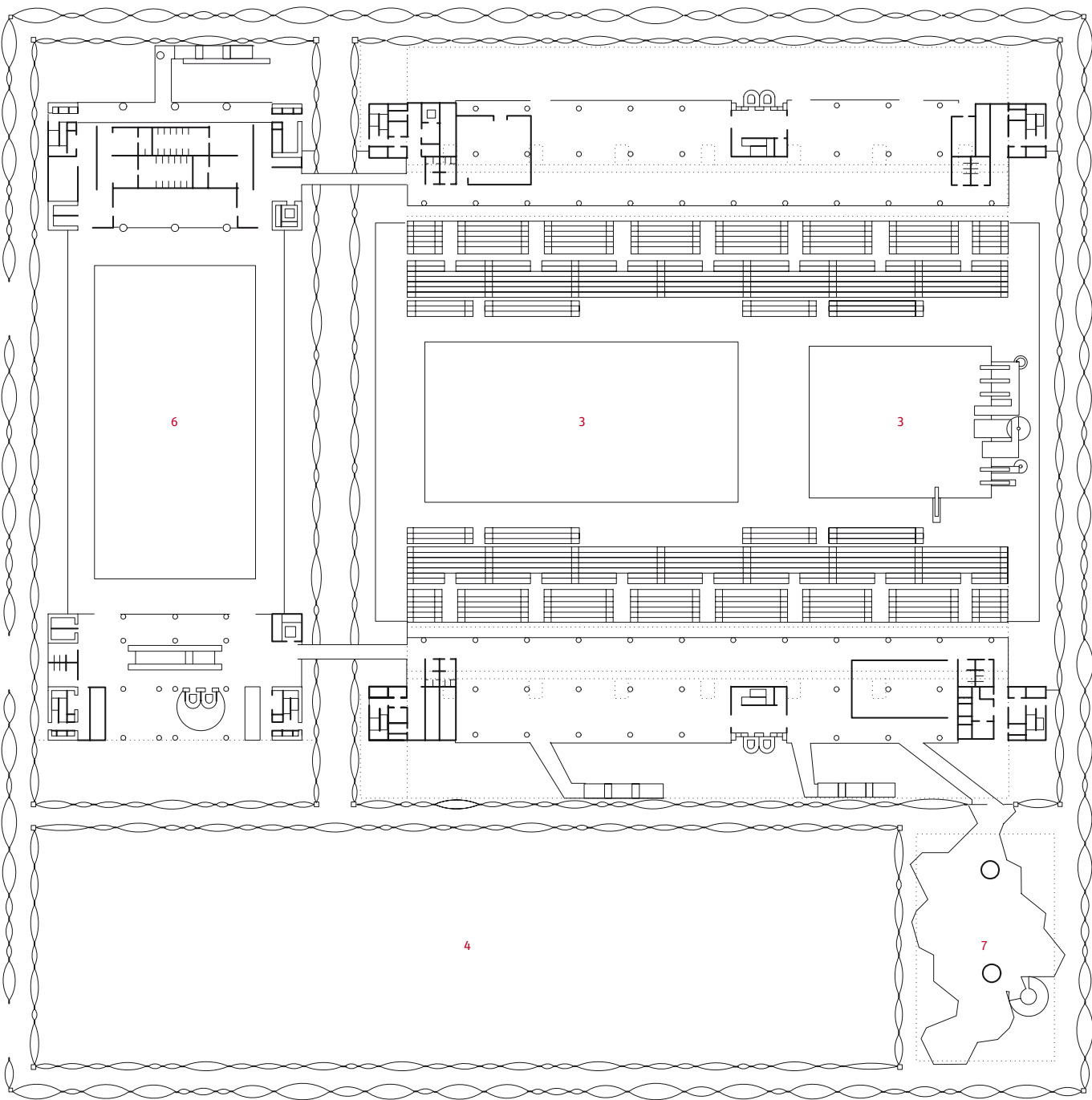
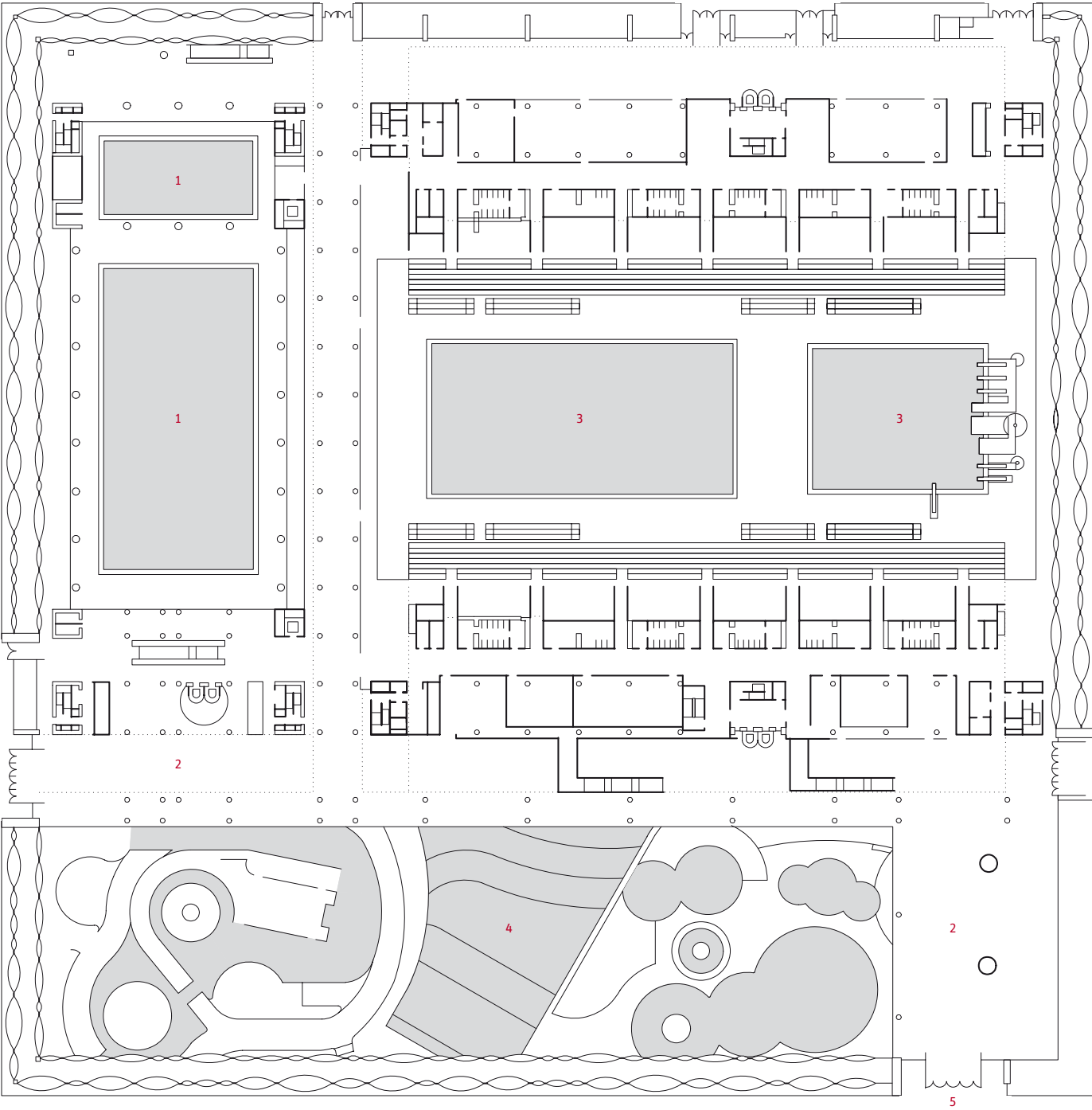
**Projektteam PTW**  
John Bilmon, Mark Butler,  
Chris Bosse

**Projektteam ARUP**  
Tristram Carfrae, Peter Mac-  
donald, Kenneth Ma, Haico  
Schepers, Mark Arkinstall,  
Steve Pennell, Stuart Bull

**Berechnungsblatt für die sta-  
tische Bestimmung der Bau-  
glieder.**  
**Impressionen vom illuminierten Wasserwürfel. Die Rea-  
lität bei Tag sieht anders aus. Ein aggressives Gemisch aus  
herbeigewehem Wüstensand und Dieselruß hat die EFTE-  
Folien mit einem stumpf-  
grauen, klebrigen Film über-  
zogen.**

Grundrisse 1:1000,  
zuerst veröffentlicht in Detail  
12/2007 (Digital Details)

- 1 Luftraum Aufwärmbecken, Wasserpolo
- 2 Galerie Publikum
- 3 Luftraum
- 4 Wettkampfbecken
- 5 Luftraum
- 6 Freizeitbad
- 7 Haupteingang
- 8 Eislauffläche
- 9 Bar, Restaurant





eher organischen Kurven des Olympiastadions auf der anderen Straßenseite, das in der zweiten Fassadenebene unter dem Licht rot leuchtet. In der chinesischen Mythologie stehen Kreise für den Himmel, Quadrate für die Erde, die rote Farbe für das Männliche, die blaue für das Weibliche. Auf diese Weise bilden die beiden Gebäude ein nach Yin und Yang ausgewogenes Eingangstor in das Olympiagelände. Sie stehen zu beiden Seiten der zeremoniellen Nord-Süd-Achse Beijings, die von der Verbotenen Stadt ausgeht.

Die Konstruktion des Wasserwürfels beruht auf der Lösung eines jahrhundertealten, von Lord Kelvin formulierten Rätsels: „Wie lässt sich ein dreidimensionaler Raum am effizientesten unterteilen?“ Dafür haben Professor Weaire und Dr. Phelan nun eine Lösung gefunden. Die Geometrie des Weaire-Phelan-Schaums, die auf dem „Seifenblasenprinzip“ beruht, ermöglichte eine Konstruktion für eine riesige Box aus einer theoretisch vollkommenen, sich wiederholenden Anordnung von Blasen. Nachdem wir uns für diese komplexe Struktur mit 22.000 Trägern und 12.000 Knoten entschieden hatten, mussten wir den gesamten Entwurf erst einmal für eine virtuelle Welt digitalisieren.

Gemeinsam mit China State Construction Design International wurde eine Software geschrieben, die einen großen abstrakten Block Weaire-Phelan-Schaum zugrunde legte und daraus eine Gebäudekonfiguration modellierte, bei der sich Decken und Wände nach den Vorgaben eines Raumprogramms von selbst sortieren konnten. Wenn ein neues geometrisches Modell gebraucht wurde, weil sich eine Dimension geändert hatte, ließ man einfach die Software erneut durchlaufen und erhielt so das neue, dreidimensionale CAD-Wireframe-Modell. Die erhaltenen mittleren Modelldaten wurden nun in Strand 7, ein System zur statischen Analyse, übertragen, um jedes einzelne Bauglied zu bestimmen. Wurde auch nur ein einziges Bauglied geändert, aus welchem Grund auch immer, beeinflusste das die Lastverteilung auf alle anderen 21.999 Bauglieder.

Schnell stellte es sich heraus, dass es unmöglich war, manuell einen Satz von Gliedern geeigneter Größe auszuwählen. Waren die Glieder zu groß, wurde das Dach zu schwer, waren sie zu klein, erwiesen sie sich als zu schwach. So schrieben wir ein Prozesskontrollprogramm zur Unterstützung der Analysesoftware. Das Kontrollprogramm begann mit einem sehr kleinen Satz tragender Glieder und analysierte sie dann nach allen 190 möglichen Kombinationen aus Eigengewicht, Windbelastung, Schneebelastung und seismischen Belastungen; sodann wurde jeder einzelne Träger mit den chinesischen Vorschriften für Stahlkonstruktionen verglichen. Die überbeanspruchten Glieder wurden eine Nummer größer genommen, die Glieder, deren Belastung weniger als die Hälfte betrug, eine Nummer kleiner. Danach wurde die Analyse noch einmal wiederholt. Als kein einziges Glied mehr eine Größenveränderung erforderte, war die optimale Lösung gefunden, bei der alle Glieder die gleiche Rolle beim Widerstand gegen auftretende Lasten spielten.

Für die Verbindung der konstruktiven Glieder wählten wir einfache Hohlkugeln, deren Größe etwas über der des größten konstruktiven Glieds lag, das in die Verbindung eingepasst werden sollte. Ein Computerprogramm setzte die Größen der Glieder aus der statischen Analyse in dreidimensionale Röhren um, fügte die kugelförmigen Verbindungen hinzu, schnitt die Röhren so zurecht, bis sie genau mit der Außenseite der Verbindungen abschlossen, und übertrug schließlich alle Daten zurück in das 3D CAD-Programm.

Um sicherzugehen, dass dieses dreidimensionale Festkörpermodell auch so informativ wie möglich ist, wurde es der ausführenden Firma noch in zwei weiteren Formen vorgelegt. Alle Daten wurden in eine Excel-Tabellenkalkulation übertragen, bei der jedes einzelne Glied und jeder einzelne Knoten genau bestimmt und die Daten zu Größe, Länge, Schweißstelle, Material und Lage angegeben wurden. Wireframe-Diagramme der Konstruktion konnten eine genaue Bestimmung jedes Elements in der Tabellenkalkulation gewährleisten. Darüber hinaus ließen wir konventionelle zweidimensionale Markierungspläne für jedes Teil der Konstruktion und alle Verbindungsstellen ausdrucken und stellten sie den ausführenden Firmen zur Verfügung.

In Australien oder auch in Deutschland, wo Arbeitskraft relativ teuer ist, hätten wir die Konstruktion aus Komponenten errichtet, die in der Fabrik vorgefertigt und dann vor Ort montiert worden wären. In China, wo Arbeitskräfte in Massen zur Verfügung stehen und Arbeitszeit billig ist, ließen wir die Röhren und Kugeln direkt auf die Baustelle liefern und schweißten sie dort mit Hilfe eines kompletten tragenden und Zugang gebenden Käfiggerüsts zusammen. Ab Juni 2005 arbeiteten mehr als hundert Schweißer gleichzeitig in mehreren Schichten rund um die Uhr. Diese Art von Bauarbeit erwies sich als erstaunlich effektiv.

Die einzige wichtige Komponente des Wasserwürfels, die außerhalb Chinas hergestellt wurde, war die ETFE-Folie. In Beijing wurde eine Fabrik aufgebaut, um die Folie zu formen und sie zu Kissen weiterzuverarbeiten. Die Kissen wurden vor Ort in den Aluminiumrahmen montiert; die äußeren mit Hilfe eines Krangerüsts, die inneren mit Hilfe des Innengerüsts, das für die Stahlarbeiten Verwendung gefunden hatte. Die Montage der Verkleidung wurde im Oktober 2007 fertiggestellt. Nach der Entfernung des Innengerüsts arbeiteten täglich mehr als 2000 Arbeiter am Innenausbau, der rechtzeitig zur Bauabnahme am 26. Januar 2008 abgeschlossen werden konnte.

Die konstruktive Struktur und der Bagedanke sind wunderbar lesbar. Der Bar- und Restaurantbereich wirkt trotzdem reichlich unterkühlt, aber das wird sich nach der Inbesitznahme durch die Besucher des Schwimmbads wohl schnell ändern. Wie sich die Fassade aus ETFE-Folien unter den Extrembedingungen des Stadtklimas in Beijing auf Dauer verhalten wird, ist noch nicht ausgemacht.

Foto: Bernardo De Niz

