



- Gekrümmte Sandwichpaneele
- Stabilisierung durch Sandwichelemente
- Wärmebrückenreduktion im Metalleichtbau
- Neue metallische Überzüge im Metalleichtbau
- Zum Feuerverzinken von Stahl
- Neubau der Waschmühlentalbrücke
- Korrosionsschäden an nichtrostenden Stählen
- Zur DAST-Richtlinie 022

Megastructure Expo Shanghai 2010

Konzept – Lage, Wettbewerb, Entwicklung

Die World Expo 2010 findet vom 1. Mai bis Ende Oktober 2010 statt. Das Expogelände liegt am Huangpu River westlich des Stadtzentrums Pudong. Der Eingangsbereich und der Hauptteil der Expo mit den Themen- und Länderpavillons unter dem Motto „Better City, Better Life“ liegen auf der Südseite des Flusses. Im Jahr 2007 erreichte das Architekturbüro SBA, Stuttgart/Shanghai, mit seinem Konzept einer offenen, in das Gelände eingebetteten Haupteinfahrachse die Endrunde im Internationalen Wettbewerb zum Eingangsgebäude für die Expo 2010 in Shanghai. Das Konzept sah vor, alle erforderlichen Funktionen wie Ticketverkauf, Sicherheitsschleuse, Restaurants, Shops und Verteiler kompakt als 1000 m lange und 100 m breite Achse

zu zwei Dritteln im Boden zu versenken. Licht und Luft gelangen über großzügige seitliche Böschungen in die Ebenen. Dies schafft eine großzügige Terrasse auf dem Gebäudevolumen, die ursprünglich mit einem weitgespannten Dach in Form einer verglasten Gitterschale mit Dreiecksmaschen überspannt werden sollte. Knippers Helbig Advanced Engineering unterstützte SBA seit August 2006 mit der Entwicklung der Tragkonstruktion. Neun Megastützen in Form von Glas-Stahlgitternetzen sollten die Hauptlasten aufnehmen, Reihen schlanker Rohre den Rand unterstützen. In einer ersten Entwicklungsphase wurde in Studien das Glasdach-Tragwerk optimiert. Im Mittelpunkt standen die Reduzierung und die Anpassung der Megastützen auf modifizierte Raumkonzepte. Veränderte Rahmenbedingungen führten ca. drei Monate nach dem Start

der Planungsphase zu dem Wunsch des Bauherrn, statt eines Glasdaches ein Membrandach planen zu lassen.

Man entschied sich für eine Lösung, die die konzeptentscheidenden Sun Valleys beibehielt und ein großzügiges, ergänzendes Membrandach vorsieht. Damit stellt sich die Expo-Achse in die Tradition des weltweit anerkannten Stuttgarter Leichtbaus, die ihre Anfänge im Deutschen Pavillon von *Frei Otto* auf der Expo 1967 in Montreal begründet.

In drei wesentlichen Entwicklungsschritten erhielt das Membrandach seine heutige Form: Die Untergliederung in Großdreiecke trägt in ihrem Zuschnitt nicht nur den statischen Erfordernissen Rechnung, sondern es waren auch zahlreiche Festlegungen zu Straßen, Brücken, Stegen und Bahnstationen, die in ihrer Lage bereits fixiert waren, zu berücksichtigen. Diese Rahmenplanung wirkte sich auch limitierend auf die Höhe der Außenstützen und die steilen Abspannwinkel aus. Die Mittelmasten mit ihren Sogsicherungseilen und Hängern minimieren die Verformung der Membrane unter Windlasten und nehmen einen Großteil der Vertikallasten, auch abhebende Lasten, auf. Des Weiteren dienen die inneren Ringe und Membranaufdopplungen der Lastverteilung und Aussteifung der Membran an den Lastkonzentrationen in den inneren Tiefpunkten.

Membrane – Statisches Konzept, Konstruktion

Das Membrandach hat eine Fläche von 65000 m², wobei knapp 5000 m² zweilagig ausgeführt sind. Es kam eine PTFE-Glas-Membran vom stärks-



Bild 1. Dachkonstruktion aus sechs Sun Valleys und dem Membrandach

ten Typ V zum Einsatz, die eine Zugfestigkeit von 8000 N/5cm aufweist, das entspricht 16 t bezogen auf einen 1 m breiten Streifen. Das minimale Vorspannniveau wurde auf 2,5 kN/m festgelegt. Das statische Konzept ist im Wesentlichen durch die Kombination der äußeren hohen Masten und der inneren Tiefpunkte geprägt, zwischen denen sich die Membran spannt. Diese werden ergänzt durch Sogsicherungsseile in der Membranebene zwischen Hoch- und Tiefpunkten und daran befestigten Hängern, die ein Durchschlagen der Membran nach unten ausschließen. Die Mastköpfe der Mittelmasten sind mit Sicherungsseilen mit den Außenmasten gekoppelt. Die Innenmasten mit einem Durchmesser von 600 mm sammeln einen Großteil der Vertikallasten. Sie tragen Stahlringe, an die die Hauptmembrane ebenso wie die Sogsicherungsseile angeschlagen sind. Am Mastkopf treffen sich jeweils 3 × 4 Hängerseile und die drei Kopfseile. Die Außenmasten werden durch je zwei Rückverankerungen mit Durchmessern bis zu 160 mm, Abmessungen, wie sie aus dem Brückenbau bekannt sind, nach außen abgespannt und tragen die Hauptlasten aus der Membrane. Schwerkraftfundamente, auf Pfählen gegründet, mit einer Würfelkantenlänge von bis zu 8 m liefern die erforderliche Masse für die Verankerung der Zugkräfte aus den Abspannseilen von teilweise weit über 1000 t. Die ca. 2 m × 2 m großen Fußplatten der Rückverankerungslaschen sind auf Gewindestäbe Durchmesser 80 mm aufgezogen und können in den ersten Monaten der Relaxation der Membrane folgend nachgestellt werden. Erst unmittelbar vor der Eröffnung der Expo wird der Raum unter den Platten mit Beton vergossen.



Bild 2. Mastkopf mit 3 × 4 Hängerseilen und 3 Kopfseilen

Am Mastkopf sind bis zu neun Hauptseile angebracht. An jedem Sun Valley ist die Membran an zwei bis drei Punkten angeschlagen, um sie eng um die Trichter herumführen zu können. Eine besondere Herausforderung stellte die zuverlässige Übergabe der Auflagerlasten an den Rückverankerungen und Mastfüßen dar, da jede Geometrieänderung auch eine Veränderung der Kräfteverteilung in der Membran impliziert. Die Tatsache, dass die Planung des Massivbaus und insbesondere der darunter liegenden Infrastruktur bereits Fakten geschaffen hatte, vermittelte Streckenweise den Eindruck des Bauens im Bestand – bei einem Dach dieser Komplexität keine leichte Aufgabe.

Die statische Berechnung stellte zwei Themen in den Mittelpunkt, die Seile und die Membrane. Für beide Bauteile ist ein Ausfall, d. h. ein Erschlaffen auch unter ungünstigen Windlasten, auszuschließen. Hierzu musste die Vorspannung der Seile und Membranen in einem komplizierten Iterationsprozess optimiert werden, bei dem auch wiederholt die Geometrie der Abspannungen und Lagerpunkte modifiziert wurde. Ein ganz besonderes Augenmerk galt dem inneren Tiefpunkt. Hier konzentrieren sich die größten Lasten und Lastspitzen, was eine zweilagige Ausführung erforderlich machte. In Analysen wurden gezielt Überspannungen identifiziert. Die zweilagige Membran wurde auf Wunsch der Architekten als Rosette angelegt, die in den meisten Tiefpunkten über acht Blätter verfügt. Zahlreiche Geometrieoptimierungen stellen sicher, dass Radialkräfte die Grenzwerte nicht übersteigen und in Ringrichtung stets ein minimales Spannungsniveau gewährleistet ist, um Faltenwurf auszuschließen.

Die Masten sind kugelgelagert und bestehen am Mastfuß und -kopf aus Gussstahl GS20. Die Mastköpfe sind alle unterschiedlich und wurden intensiv dreidimensional und im Modell untersucht. Die Laschen sind zur Vermeidung von Gabelkopfkollision zum Teil bis zu 2 m lang. Um die Fügung der Masten zu vereinfachen, sind Mastkopfschaft und Anschlusslaschen aus einem Guss. Besonderes Augenmerk wurde auf die Abbildung der durch die großen Laschenlängen

in Kombination mit Windlasten auftretenden Exzentrizitäten gelegt. Diese verursachen erhebliche lokale Momente infolge Seil- und damit Achsauslenkung, die für jeden Mastkopf ermittelt wurden. Die Detailausbildung der Membrananschlüsse an die Sun Valleys ist geometrisch komplex. Doppelgelenkanschlüsse verhindern die Einleitung unplanmäßiger Momente aus Seilwinkelveränderungen unter Windlast.

Grundsätzlich entwässert die Dachkonstruktion nach innen zu den Innenmasten. In der Detaillierung wurde hierbei besonders auf eine möglichst schlanke und reduzierte Ästhetik Wert gelegt, um einer visuellen Kumulation von Bauteilen an diesem komplexesten Detailpunkt entgegenzuwirken. Die Integration der Entwässerung in den Mast erwies sich als Voraussetzung für die saubere Ausbildung der unteren Anschläge der Mastversteifungsseile. Die Hauptmembrane ist am inneren Ring befestigt. Eine weitere Membrane Type II, damit deutlich weniger steif, stellt die Verknüpfung zwischen dem inneren Ring und dem untersten Entwässerungspunkt, dem Einlauftrichter, her. Auf diese Weise ist die Hauptmembrane mehr als 4 m von den Besuchern entfernt, und rückstauendes Wasser oder Schneeanhäufungen können keinen Schaden an der Hauptmembrane verursachen. Vom Entwässerungstrichter mit Notüber-



Bild 3. Außenmast mit Rückverankerung hält die Hauptlast der Membrane



Bild 4. Komplexe Dateilausbildung der Membrananschlüsse an den Sun Valleys

lauf führen vier Rohre mit einem Durchmesser von 200 mm zum Mastfußpunkt, treten dort heraus und werden an der Fußplatte vorbei in den Massivbau weitergeführt. Der Mastfuß ist kugelgelagert und hat eine Abhebesicherung erhalten.

Sun Valleys – Form, Geometrie, Konstruktion

Die sechs Sun Valleys haben jeweils eine Fläche von ca. 5000 m². Am Fuß weisen sie einen Durchmesser von ca. 16 m auf, am oberen Rand von 80 m. Die Flächen wurden unter statischen und gestalterischen Gesichtspunkten in zahlreichen Iterationsschritten optimiert. Die Generierung des Dreiecksmaschennetzes interpretiert die Prinzipien der dichten Packung und Multifunktionalität, die *Buckminster Fuller* beim US-Pavillon für die Expo 1967 mit der geodätischen Kuppel zur Anwendung brachte. Insofern folgen die Sun Valleys dem gleichen Ansatz natürlicher Konstruktionen wie die Membrane – dem des minimalisierten Materialeinsatzes. Das Dreiecksmaschennetz ist das Ergebnis zweier Hauptüberlegungen: Die Zahl der Dreiecke muss von unten nach oben aus geometrischen Gründen deutlich zunehmen, und die Hauptlinienführung sollte der Hauptkrafttrichtung folgen, um ein möglichst effizientes Tragwerk zu erzielen. So sind am Fuß die

Linien vertikal ausgerichtet und am oberen Rand ringförmig. Um dies zu erreichen, sind auf halber Höhe 5er- und 7er-Sonderknoten eingefügt, die eine Rotation des Netzes um 30 Grad bewirken. Lage und Anzahl sind so gewählt, dass die Maschengröße möglichst homogen bei ca. 2,20 m liegt.

Für die Sun Valleys sind neben Eigengewicht, Schnee, Wind und Erdbeben auch Lasten aus der Membrane von entscheidender Bedeutung. Die Berechnung der Abhängigkeiten zwischen der Stahlkonstruktion der Sun Valleys und der Membrane erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde mit Referenzlasten die Federsteifigkeit der lokalen Lasteinleitungspunkte an die Membranberechnung übergeben. Die resultierenden Membranlasten wurden dann in der Berechnung der Sun Valleys abschließend berücksichtigt. Dabei zeigte sich erwartungsgemäß, dass die Sun Valleys die fast tangential eingeleiteten Abspannlasten aus der Membrane sehr gut aufnehmen können und sich die recht hohen lokalen Lasten aus der Membrane nur in lokalen Biegemomenten und damit Verformungen widerspiegeln. Es waren daher auch nur lokale Aufweitungen der Stabwerkskonstruktion erforderlich, für die Stäbe im Umkreis von ca. vier Feldern um die Lasteinleitung herum kontinuierlich aufgevoutet wurden. Der Regelquerschnitt von 180 mm × 65 mm wächst hier lokal auf bis zu 500 mm × 140 mm.

Entsprechend ihrer Belastung wurden die Stäbe in Gruppen sortiert und ihre Querschnitte der Belastung angepasst. So wurden ca. 48 Querschnitte entwickelt und optimiert eingesetzt. Es handelt sich um zusammengesetzte Profile aus längs geschweißten Flachstählen. Durch eine Abstufung der Blechdicken wurde eine präzise Anpassung an die Belastungssituation ermöglicht, und die Querschnittshöhen konnten gering gehalten werden. Die Optimierung ging dabei Hand in Hand mit der Abstimmung der Stabanordnung. Vertikale Hauptlinien am Schaft und ringförmig liegende Hauptlinien am oberen Rand bilden exakt die jeweilige Hauptrichtung der zulässigen Normalkräfte ab. Dadurch wurden in geeigneten Bereichen auch Vollprofile hocheffizient eingesetzt. Die Fest-

legung der Verformungen wurde in Zusammenarbeit mit chinesischen Experten und Verfassern der chinesischen Normregelung entwickelt. Dabei spielte die Verformungsbegrenzung für Glas eine entscheidende Rolle.

Ingenieurbaukunst – international

Es erforderte bereits von Beginn an in allen Planungsphasen der Expo-Achse eine enge Deutsch-Chinesische Kooperation. Der ursprüngliche Wettbewerbsentwurf wurde in mehreren Stufen weiterentwickelt, bis das endgültige Konzept gefunden war. Während dieser Zeit waren zahlreiche Besprechungen in Shanghai erforderlich, bei denen nicht nur die Entwicklung des Entwurfes mit dem Bauherren diskutiert, sondern auch dessen chinesische Berater von der Machbarkeit der Konstruktion überzeugt werden mussten. Wegen der in Shanghai üblichen sommerlichen Taifune standen stets die Beanspruchungen und Verformungen unter Wind im Mittelpunkt der Diskussion. Von besonderer Bedeutung waren daher die umfangreichen Windkanalversuche zur Ermittlung der Windlasten und Strömungswerte, die an der Tongji Universität durchgeführt wurden. Darüber hinaus wurde in China ein über 20 m langes Modell des Dachtragwerkes gebaut, an dem mit Kraftmessdosen und Wegmessern die Beanspruchungen und Verformungen der Dachkonstruktion unter verschiedensten Belastungen untersucht wurden. Dabei wurde auch das Verhalten des Systems bei Ausfall einzelner Abspannseile betrachtet. Auch die Tragfähigkeit hochbeanspruchter Detailpunkte, wie Randklemmungen und Membranverstärkungen wurde an mehreren großen Funktionsmodellen geprüft. Diese begleitenden experimentellen Untersuchungen sind für europäische Ingenieure, die sich in der Regel weitgehend auf Computerberechnungen verlassen, überraschend und bereichernd.

Knippers Helbig Advanced Engineering

Fotos:
Thomas Ott, Mühlthal, Bilder 1 bis 4