

# Holzdach im Betonkorsett

Autor(en): **Ekwall, Thomas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tec21**

Band (Jahr): **140 (2014)**

Heft 23: **Ein Dach für Zürichs Elefanten**

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-390716>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

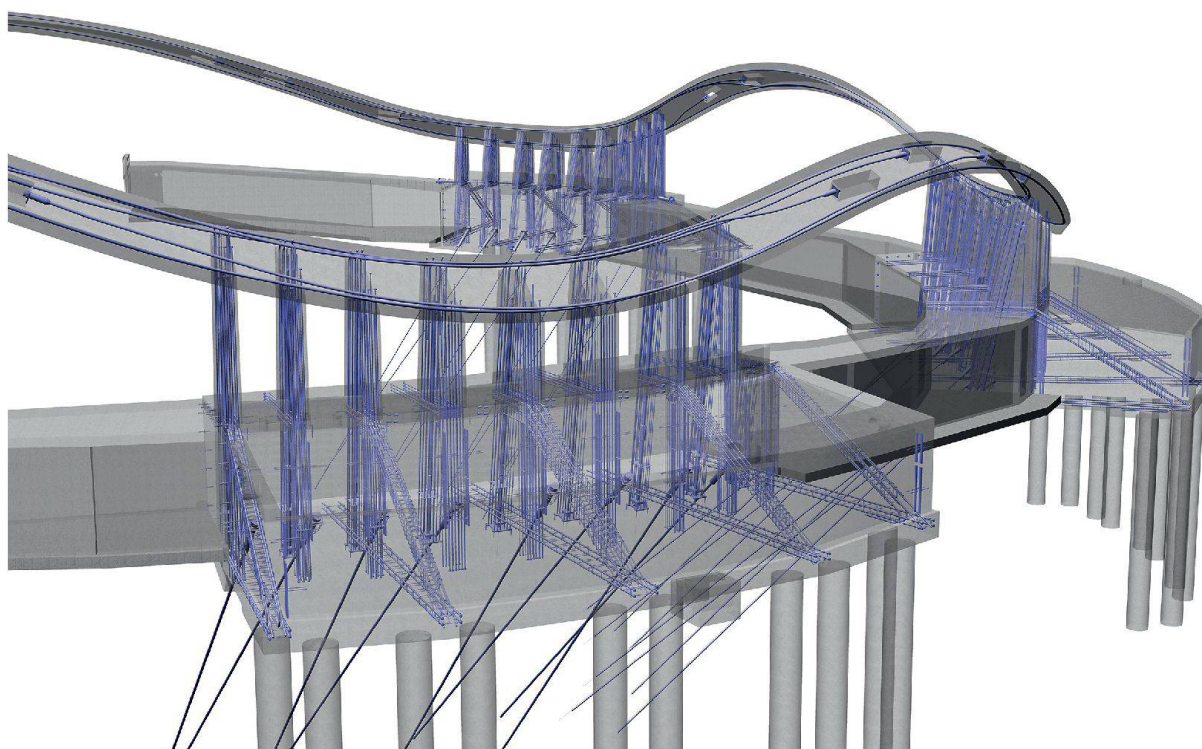
Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

TRAGWERK

# Holzdach im Betonkorsett

Die Dachlandschaft wirkt wie natürlich gewachsen, doch dahinter steckt ein technischer Kraftakt. Aus Holz konstruierten die Bauingenieure von Walt+Galmarini ein vielschichtiges, robustes Tragwerk. Die dreidimensionale Planung vereinfachte die Produktions- und Bauabläufe.

Text: Thomas Ekwall



3-D-Isometrie: Walt + Galmarini AG

Am Rand der Holzschale ist ein **Ringbalken aus Spannbeton verborgen**, der das Dach wesentlich mitträgt. Die **neun einbetonierten Kabel sind bis zu 120 m lang** und mit einer Kraft von 189 t vorgespannt. Horizontalkräfte von bis 500 t pro Widerlager werden über Betonscheiben vor der Fassade im Boden eingeleitet. Die Verankerung im setzungsempfindlichen Boden erfolgt über Druckpfähle und Zuganker.

**D**ie Dachkonstruktion des Zürcher Elefantenhauses fällt auf wegen ihrer doppelt gekrümmten Form, die über einem stützenfreien Innenraum schwebt. Diese auf den ersten Blick freie Form entstand im Spannungsfeld von technischer Machbarkeit und architektonischen Wünschen, das nur wenig Spielraum zuließ (am Bau beteiligte Planer vgl. Kasten S. 34). Gewünscht war ein

«Blätterdach» von nahezu beliebiger Form, bei dem das Sonnenlicht durch viele Öffnungen in der Fassade und im Dach den Innenraum durchfluten würde. Die Tragkonstruktion sollte aus Holz bestehen – mit dessen visuellen Qualitäten, aber ohne technisierende Verbindungen. Auf der anderen Seite standen die konstruktiven Zwänge, die mit Spannweiten von 80 m verbunden sind. Die Ideallösung wäre eine Kuppel aus Stahlbeton gewesen: eine Regelfläche ohne Öffnungen, die linien-

förmig auf dem Boden steht. Diese Überlegungen sind in ein Bauwerk eingeflossen, das sich aus beiden Gedanken speist, ohne den Charakter der ideellen Vorstellung zu verlieren.

Das Dachauflager wurde entsprechend der Nutzung des Bauwerks auf fünf Streifen entlang der Fassade mit Zwischenabständen von 15–30 m reduziert. Der Anteil der Dachöffnungen wurde auf 35% begrenzt. Architekt und Ingenieur legten iterativ und in enger Zusammenarbeit das Öffnungsbild fest: Zuerst wurden die Hauptstrahlen definiert, die den direktesten Lastpfad zwischen den Auflagern bilden. Darauf wurde ein zweites Strahlenraster superponiert – dadurch stellt sich tatsächlich eine statische Schalenwirkung ein, die Spannweiten der Oblichter überschreiten wegen der Dachabdeckung nicht 4 m, und es entsteht der Eindruck eines Blätterdachs.

Als Ausgangspunkt für die dritte Dimension des Dachs diente das statische Prinzip der Kettenlinie.<sup>1</sup> Die erste 3-D-Dachform entstand im Berechnungsmodell, aus dem Verformungsbild des 2-D-Modells einer biegeschlaffen Membrane unter negativem Eigengewicht. Diese Rohform wurde dann auf architektonische Rahmenbedingungen kalibriert, etwa die zulässige Gebäudehöhe, die Durchlaufhöhen im Torbereich – oder die Reichweite eines Elefanten.

Das Tragwerk aus sichtbarem Holz wurde nicht allein wegen der architektonischen Qualität des Materials, sondern vielmehr wegen des geringen Gewichts und der Vorteile bei der Herstellung gewählt. Erst durch den gezielten Einsatz von Spannbeton in den Ringbalken wurde die Holzkonstruktion als Schale aktiviert.

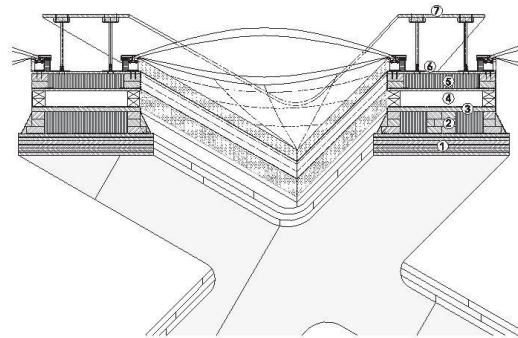
## Schale, Bögen und Biegeträger im Dach

Die Stärke der tragenden Primärkonstruktion macht nur 54 cm der gesamten 93 cm Dachaufbau aus (Kasten rechts oben). Sie besteht aus drei Lagen Schichtplatten, deren Faserrichtung um 60° gegeneinander gedreht sind. In Längsrichtung sind sie gestossen oder mit Mörtel vergossen und in Querrichtung mit einer 2 cm breiten Fuge ausgebildet. Durch eine flächendeckende Anordnung von Nägeln wirken sie als Verbundquerschnitt.

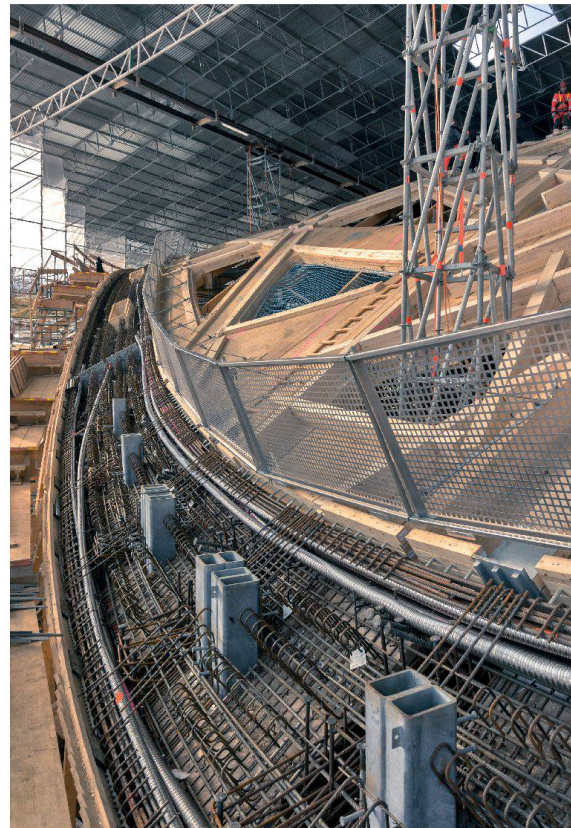
Die Hauptstrahlen auf der oberen Schichtplatte sind als dreischichtige Vollholzbalken ausgebildet. An den Kreuzungspunkten werden die Balkenstösse mittels Stahlblechen und selbstbohrender Stabdübel biegesteif ausgebildet. Die Randträger der Oblichter sind in der gleiche Ebene verlegt. Darauf bildet eine Obergurtplatte den Abschluss. Mittels feuerverzinkter Vollgewindeschrauben wird sie mit der untersten Schichtplatte kreuzweise im 45°-Winkel verbunden.

Die Dachkonstruktion aus Holz stützt sich auf einen vorgespannten Ringbalken aus Spannbeton, der im Dachrand integriert ist (Abb. rechts). An diesem Bauteil sind die Holzpfosten der Fassade angeschlossen, die eine relative Verschiebung zwischen Dachrand und Glasfassade von bis 100 mm in vertikaler und 25 mm in horizontaler Richtung zulassen. Die Dachlasten werden in der Aussenwand des Manage-

## Blätterdachaufbau



Die 60 cm hoch aufgeständerte Wartungsebene (7) besteht aus Kerto-Platten mit rund 20 Jahren Lebensdauer. Die Dachhaut ist im geschlossenen Bereich mit Dachabdichtung (6) und bei den Dachöffnungen mit ETFE-Luftkissen samt integrierter Hagelschutzschicht versehen. Die 39 cm hohe Sekundärkonstruktion (4–6) setzt sich aus 19 cm Dämmebene (5) mit Mineralwolle und der Installationsebene (4) mit 18 cm lichter Höhe zusammen. Zur Installation gehören die Leitungen für die UV-Leuchten, die Luftkissen, die Eventbeleuchtung und die Bewässerungsanlage. Die 54 cm hohe tragende Primärkonstruktion (1–3) setzt sich zusammen aus 57 mm Kerto-Obergurtplatte (3), den Randträgern, 240 mm Hauptstrahlen aus drei Schichten Konstruktionsvollholz (2) und 240 mm Holzschale (1) aus drei Lagen Nadel-Brettsperrholz.



Ringbalken vor dem Betonieren mit den Stahleinbauteilen über den Betonstützen und den Hüllrohren für die Spannkabel.

## Entwurf und Werkpläne aus einer Kette

Der Ausgangspunkt der digitalen Kette (vgl. TEC21 14/2014, «Nahtlose Planung») bildete das digitale Modell der Dachform als NURBS-Fläche. Ab der Entwurfsphase wurden parametrische Prozesse entwickelt, die die weitere Zeichen- und Konstruktionsarbeit weitgehend vereinfachten und automatisierten. Als Plattform wurden die Programme Rhinoceros, Rhinocript und Grasshopper verwendet. Das Modell entstand in enger Zusammenarbeit mit den Fachplanern, um dieses auf den benötigten Output und die einfache Handhabung abzustimmen.

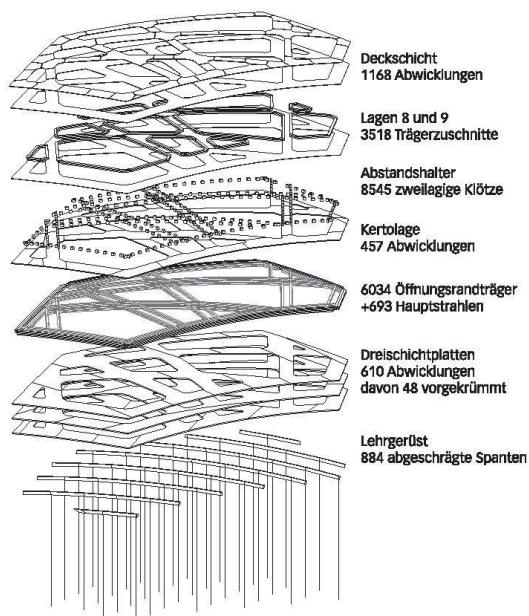
Für die morphende Fassade wurde ein eigenes Tool entwickelt. Somit konnte der Architekt durch die Steuerung konstruktiver Parameter seine Idee selber generieren und visualisieren. Die späteren Angaben zur Dachverformung liessen sich nachträglich erfassen und die Fassadengeometrie einfach aktualisieren.

Für die Bauingenieure wurde ein achtschichtiges, parametrisches Quadmesh und dessen Export ins Berechnungsprogramm Sofistik realisiert. Auch hier konnten spätere Änderungen in ein neu generiertes Finite-Elemente-Modell einfließen.

In Abstimmung mit den Holzbauunternehmen wurden die fertigungs- und montagerelevanten Daten als Metainformationen erfasst (Träger-ID, Querschnitt, Länge, Anschlagwinkel und Lieferpaket), sodass die Daten später in ein entsprechendes Abbundmaschinenformat und automatisch erzeugte Montagepläne überführt werden konnten.

Die Prüfung der erzeugten Outputs ist dabei nicht zu unterschätzen. Aufgrund der schieren Masse an unterschiedlichen Bauteilen kann diese nur stichprobenhaft erfolgen. Durch die 3-D-Darstellung sowie die Hinterlegung aller Bauteil-IDs und Metadaten stehen jedoch komfortable Kontrollmechanismen zur Verfügung, um die korrekte Arbeit der Algorithmen einerseits und die Gültigkeit der konstruktiven Ansätze andererseits zu überprüfen.

Andreas Eisenhardt, Kaulquappe GmbH, Zürich



Übersicht der parametrisch erstellten Dachbauteile.

mentbereichs und in vier Stützenreihen eingeleitet. Darunter sind massive Fundamente erforderlich, um die Lasten in den tragenden Bodenschichten zu verankern (Abb. S. 41 unten).

Die Tragwirkung des Dachs lässt sich mit einfachen Modellen kaum erfassen. Sie besteht vielmehr aus ineinander verflochtenen Systemen: Für die Schalentragwirkung sind nur die unteren Schichtplatten zuständig. Im Verbund tragen sie in alle Richtungen sowie auf Zug und Druck gleich. Zudem wird die Schale durch den Verbund mit den Hauptstrahlen – als gerichtete Stabbögen – verstärkt. Somit kann ein direkter Lastpfad mit hohen Normalkräften zu den Dachauflagern ausgebildet werden. Die erforderliche Biegesteifigkeit erfolgt über einen idealisierten Fachwerkträger: Die Kerto-Platte des Primärträgers wirkt als Obergurt, die Schale als Untergurt und die Vollgewindeschrauben – als Bindeglied zwischen den zwei Gurten – als Diagonalen. Die Biegemomente treten insbesondere infolge der asymmetrischen Lastfälle wie Schnee und Wind, der Abweichungen der Dachgeometrie gegenüber der idealen Kettenlinie, der Oblichter und der Einspannung im Ringbalken auf. Der Ringbalken fungiert als dreifach gekrümmter Biegebalken. Die Vorspannung wird so definiert, dass der Balken im Gebrauchszustand ungerissen bleibt. Die Lage des Kabels im Querschnitt ist variabel, sodass die Zugspannungen aus den Biegemomenten stets kompensiert werden. Die Torsion wird durch die Schubbewehrung aufgenommen.

Die Interaktion all dieser Systeme konnte nur am achtschichtigen Finite-Elemente-Modell zuverlässig erfasst werden. Die Ingenieure konnten sich nicht allein auf ihre Berechnungen verlassen, sondern mussten auch ihrem Gefühl vertrauen: Einfache Handrechnungen als überschaubares Kontrollinstrument des digitalen 3-D-Modells waren unverzichtbar. Weil die Verformung von Spannbeton infolge Torsion kaum erfassbar ist, mussten sie an der Schnittstelle mit der Fassade ausreichende Toleranzen einplanen: Diese war bereits in Produktion, bevor das Lehrgerüst abgesenkt wurde.

## Von der Hightech-Planung zur Lowtech-Baustelle

Viele konstruktive Entscheide leiten sich aus wirtschaftlichen Aspekten des Bauablaufs ab. Die Schalenskonstruktion besteht aus Brettsperholzplatten mit Standardabmessungen von 3.4 × 12.0 m. Diese Platten sind so weich ausgebildet, dass sie sich auf dem Lehrgerüst dank weniger Hilfsmittel in die gewünschte Form biegen lassen. Auf aufwendige Vorkrümmungen im Werk und schwer transportierbare Bauteile konnte man daher verzichten. Nur bei einem Dachradius unter 50 m, also bei etwa 15% der Dachfläche, wurden sie vorgängig einachsrig vorgekrümmt und im Werk verklebt.

Die Fertigung kam ohne teure Fünf-Achs-Fräsmaschinen aus und erzeugte Hunderte von Unikaten aus dem Standardprodukt (Kasten links): Ähnlich dem

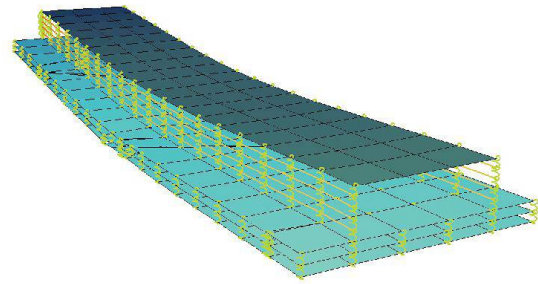
Stoffzuschnitt eines Kleidungsstücks wurden die Platten «verebnet», das heisst so zugeschnitten, dass aus den verlegten Elementen ein regelmässiges Fugenbild entstand. Zudem wurden die Dachöffnungen eingeschnitten oder eingeritzt und nachträglich auf der Baustelle mit der Kettensäge gesägt. Die Bauarbeiter und nicht die Roboter diktierten das Bautempo: Als die Bauerntermine eng wurden, konnten bis zu 80 Zimmerleute gleichzeitig am Dach arbeiten.

Nachdem die drei Schichten versetzt und vernagelt worden waren, konnte der Randbalken vorgespannt und das Lehrgerüst entfernt werden: Das Dach senkte sich vertikal um 35 mm ab, errechnet waren 50 mm. Ab diesem Moment erfolgten die weiteren Arbeiten auf dem Dach parallel zum Innenausbau.

## Holz auf Robustheit getrimmt

Das Leitmotiv hinter der konstruktiven Ausbildung des Tragwerks ist die Robustheit<sup>2</sup>. Vier Aspekte tragen entscheidend dazu bei. Erstens ist die Struktur statisch vielfach unbestimmt: Die Ringbalken wirken als Durchlaufträger zwischen den nachgiebigen Auflagerpunkten. Bei hohen Beanspruchungen können sich plastische Gelenke ausbilden, ohne einen Versagensmechanismus zu verursachen. Zweitens verhindern die duktilen Verbindungsmittel ein sprödes Verhalten des Holzes. Drittens sind die Lastpfade redundant, das heisst – um es analog zum elektrischen Schaltkreis auszudrücken –, die Bauteile sind parallel geschaltet statt in Serie. Würde das Fundament nachgeben oder ein Zuganker versagen, könnte der Ringbalken die Kräfte zum nächsten Linienauflager weiterführen. Und viertens ist die Formstabilität der Schale durch den vorgespannten Randbalken erhöht.

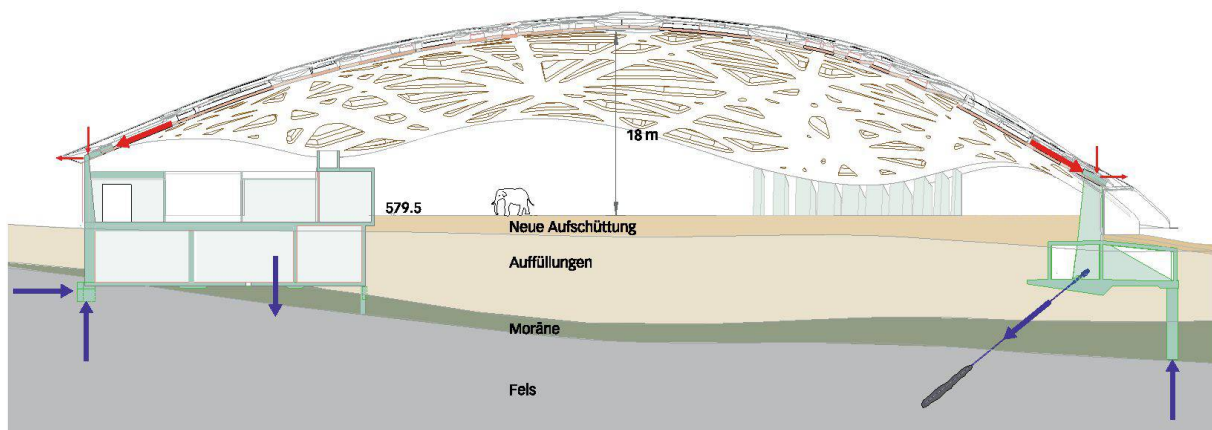
Aus dieser Holzkonstruktion entsteht ein doppelt gekrümmtes Tragwerk, das in der Lage ist, dem zweiachsigen Lastabtrag mit Biegungsanteil standzuhalten. Damit werden auch Verluste in der Materialeffizienz verzeichnet:



**Oben:** Visualisierung des achtstufigen Berechnungsmodells. Die Verbindungen wurden mit Federn modelliert, deren Steifigkeit anhand von Materialversuchen an der Empa (**Abb. darunter**) kalibriert wurde.

Holz ist ein anisotropes Material, das sich durch den dreifach gerichteten Aufbau isotrop verhält. Die Beanspruchung erfolgt möglichst in Faserrichtung. Im Fugenbereich heisst dies aber, im ungünstigsten Fall kann nur eine der drei Platten statisch aktiviert werden.

Holz ist ein sprödes Material, das sich durch die Verbindungsmittel duktil verhält. Dafür sorgen die Nägel und die Gewindeschrauben, die so schlank ausgebildet sind, dass sie zuerst einen plastischen Zustand auf Biegung erreichen, ehe das Holz versagen würde. Zudem verhindern die Plattenfugen in Querrichtung, dass Querkzugspannungen mit sprödem Bruchverhalten auftreten. Bei Druckversuchen an der Empa (Abbildung)



Im Managementbereich (links) werden die horizontalen Kräfte aus der Dachschale durch das eingeschossige Bauwerk in den Boden eingeleitet. Hangabwärts (rechts) werden die Lasten durch Pfähle und Litzenanker in die tieferen Felsschichten geführt.

gen oben) bildete sich ein Fließplateau im Kraft-Verformungs-Diagramm aus – die Bestätigung für das duktile Verhalten. Der schichtweise Aufbau der Primärträger führt aber auch dazu, dass die Biegesteifigkeit des Verbundquerschnitts in der Regel nur 30% eines massiven Querschnitts entspricht. Die Biegeversuche der Empa belegen jedoch, dass der Anteil für diesen spezifischen Dachaufbau auf 70–80% erhöht werden konnte.

Holz ist feuchtigkeitsanfällig, deswegen haben die Ingenieure möglichst auf Klebeverbindungen verzichtet, insbesondere auf der Baustelle. Das Facility Management soll im Unterhalt und in der Überwachung des Tragwerks achtsam agieren (Kasten unten).

Alle diese Ansätze legen einen exemplarischen, sorgfältigen Umgang mit Holz nahe. Man würde meinen, dass diese Materialwahl gegen die Robustheit des Tragwerks spricht. Die kausale Kette muss aber umgekehrt betrachtet werden: Je unübersichtlicher das Trag- und Materialverhalten und je gravierender die Konsequenz eines Kollapses, desto eher muss der Tragwerksplaner eine Antwort auf die Robustheit geben und die konstruktive Ausbildung in diesem Sinn fördern.

Holz eignet sich als Schalentragwerk, doch dafür muss ein grosser Aufwand in Kauf genommen werden. Angesichts der komplexen Form, der vielen Oblichter und der ungünstigen Bodenverhältnisse ist er im

Fall des Zürcher Elefantenhauses berechtigt. Dies erklärt auch, warum die Schlankheit – und auch die Kosten – dieser Dachkonstruktion nur wenig mit einer Hängeschale von Isler gemeinsam haben, obwohl die Form aus den gleichen statischen Prinzipien abgeleitet wurde. Diese Spannweite hätte mit einem geringeren Aufwand realisiert werden können. Im Gegensatz zu Isler hatten die Ingenieure aber auch eine architektonische Vorstellung zu erfüllen – und sie besaßen die seltene Fähigkeit, diese Vision möglichst wirtschaftlich umzusetzen. •

Thomas Ekwall, Redaktor Bauingenieurwesen

Anmerkungen

1 Das Formproblem der Gewölbestatik wurde 1675 von Robert Hooke mit folgendem Anagramm formuliert: «Wie die biegeschlaffe Linie hängt, so wird umgekehrt das stabile Gewölbe stehen.»

2 Robustheit kennzeichnet die Sensitivität einer Tragkonstruktion gegenüber dem Versagen einer ihrer Bauteile. Sie ist nicht mit Festigkeit gleichzusetzen. Robuste Tragwerke schränken allfälliges Versagen ein, ein progressiver Kollaps wird verhindert. Beim Ausfall eines Tragelements lässt die Konstruktion eine Lastumlagerung über das Resttragwerk zu (vgl. TEC21 19/2009 zum Thema «Robustheit»).

**Eine Halle – drei Anlagen**

Das HLK-Konzept reagiert auf die speziellen Anforderungen des Elefantenhauses. Das Gebäude ist über einen umlaufenden Mediengang erschlossen und besteht aus drei unabhängigen Lüftungsanlagen, in denen die Temperatur nie unter 16°C fallen darf.

Zwei Monoblockgeräte versorgen den Hallenteil, in dem sich die Elefanten befinden. Im Besucherraum wird frische Luft an der Glasfassade eingebracht. Dadurch spürt der Besucher keinen Kaltluftabfall an der Fassade. Der dritte Bereich umfasst den Managementtrakt und die Innenstallungen. Hier wird über die Belüftung auch geheizt. Durch die so zugeführte Transmissionswärme kann rasch auf wetterbedingte Temperaturschwankungen reagiert werden. Ein System mit statischer Heizung wie Boden-, Flächen- oder Radiatorenheizung hätte eine viel längere Reaktionszeit, was sich negativ auf das Innenraumklima auswirken würde. Die Lüftungsanlagen verfügen über eine leistungsstarke kreislaufverbundene Wärmerückgewinnung.

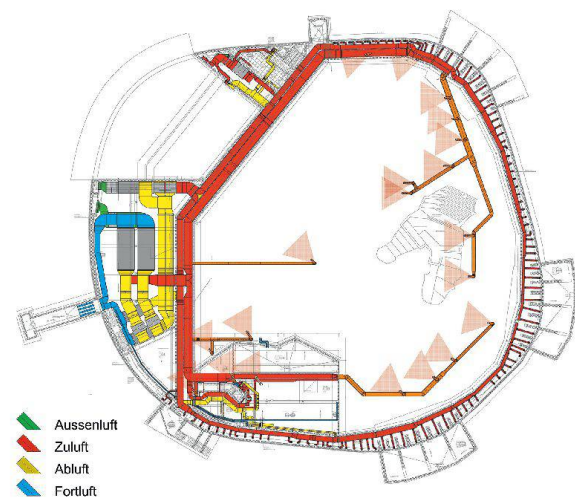
Eine Herausforderung des Systems war es, dem Holzbau gerecht zu werden. Eine Luftfeuchte über 70% würde die Tragfähigkeit der Holzkonstruktion gefährden. Andererseits benötigen die tropischen Pflanzen in der Halle eine gewisse Mindestfeuchte. Die unterschiedlichen Lüftungsanlagen gehen auf diese gegensätzlichen Ansprüche in den einzelnen Bereichen ein.

Von Seiten der Bauherrschaft war weder eine Kälte- noch eine Entfeuchtungsanlage gefordert. Es wurde dennoch die Möglichkeit offen gelassen, über eine nachträglich eingebaute Kältemaschine zu kühlen, falls sich das später im Betrieb als nötig erweisen sollte.

Durch ein Leitsystem wird die Anlage überwacht: Aufgezeichnet werden die Aussen- und Zulufttemperatur, die Temperatur von Hallenboden und -dach sowie die Zuluft-, Hallen- und Holzfeuchte. Durch diese Aufzeichnungen und die richtige Regulierung ist es möglich, den Betrieb optimal zu bewirtschaften.

Wegen des hohen Anteils an Öffnungen im Dach sind an heissen, sonnigen Sommertagen Wärmestaus möglich. Über die kontrollierte Öffnung der Lüftungsklappen mit den integrierten Luftkissen kann das Facility Management die heisse Luft nach Bedarf entweichen lassen.

Eine andere Herausforderung für das Facility Management besteht in der Wassertechnik für die Aussen- und Innenbecken. Luftfilter und Schmutzfänger in der Wassertechnik müssen regelmässig vom hohen Staub- und Sandgehalt befreit werden. • (ne)



Lüftungsanlage im 1. UG, Grundriss.