



Prof. Julius Natterer
EPFL Lausanne, CH

Das Dach der Dächer „Das Expodach in Hannover“

Das Dach der Dächer „Das Expodach in Hannover“

1. STRUKTUR

Jede Baukörperform kann bei entsprechender Entwicklung der Form und Tragkonstruktion wirtschaftlich in Holz ausgeführt werden. Die Optimierung der Tragstruktur durch Reduzierung der Biegebeanspruchung zugunsten der Normalkraftbeanspruchung durch die Anordnung von Gelenken, zusätzlichen Stäben, Unterspannungen und Abspannungen bedarf jedoch einem erhöhten Planungszeitaufwand. Dadurch sind Holzkonstruktionen zumeist als leicht und filigrane Konstruktionen gestaltbar.

Eine Reduzierung des Baustoffbedarfes im Holzbau ist durch die Verwendung von druckbeanspruchten Stabsystemen möglich. Diese besitzen den Vorteil einfacher Anschlüsse und Verbindungspunkte. Pilz- oder Stabbündelstrukturen sind in vielfältigster Art gestaltbar und sind gleichzeitig innenraumausfüllende Strukturen. Es ergibt sich eine Raumgestaltung mit sichtbarer Tragstruktur ohne unterhängte Decken.

Einen weitere Möglichkeit zur Optimierung bzw. Minimierung des Materialaufwandes sind die statisch hochgradig unbestimmten Flächentragwerke, Platten, Roste, Fachwerkroste, Schalen und Hängeschalen. Derzeitige Entwicklungen laufen in Richtung statisch unbestimmter Systeme. Durch die statische Unbestimmtheit wird die Materialstreuungen des Holzes ausgeglichen und das Verformungsverhalten für die Dimensionierung maßgebend. Orthotrope Systeme aus Rundholz, Kantholz, Bohlen oder in Brettstapelbauweise, Brettschicht- oder Massivholz im Verbund mit Beton sind wirtschaftliche Konstruktionsmethoden.

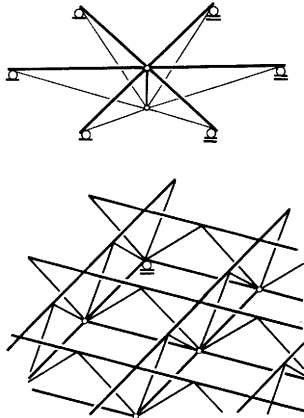
Die nachfolgende Beispiele zeigen ausgeführte Holzkonstruktionen mit verschiedenen Tragsystemen. Anschließend wird einer Ausführliche Beschreibung des „Dach der Dächer“ über das Expodach gemacht.



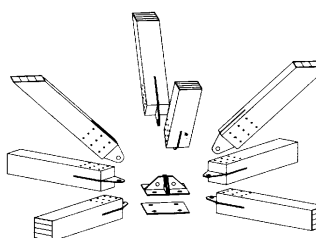
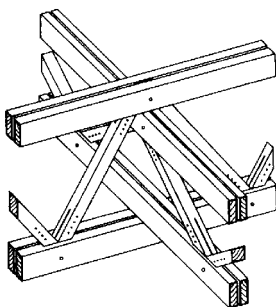
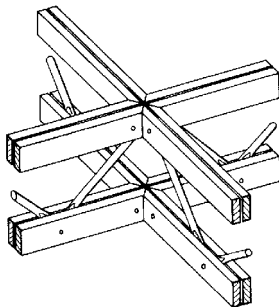
2. TRÄGERROSTE

Trägerroste sind flache Tragsysteme bestehend aus Einfeldträgern welche in einem Winkel von 90, 60 oder 45° zueinander stehen. Die Träger sind entweder in Kreuzungspunkt durchgehend oder biegesteif miteinander verbunden. Durch diese biegesteifen Knoten entsteht ein hochgradig unbestimmtes System, welches die Lasten in zwei oder drei Richtungen abträgt. Die Tragstruktur ähnelt in der Lastabtragung den Rippenschalen. Unter Last werden alle Träger beansprucht - nicht nur diejenigen, auf welche die Last aufgebracht wird. So beteiligen sich alle Träger entsprechend ihrer Steifigkeit an der Lastabtragung.

Tragsystem: Fachwerkroste



Beispiele:



Auditorium Weiherstephan, (D)

Hörsäle mit Verwaltung und Bibliothek. Hier dargestellt das Dachtragwerk über den Sälen welches in den Eckpunkten des 9.6 x 9.6 m Rasters gestützt sowie im Rand-bereich 1.8 m auskragt. Knotenpunktabstand im 3D-Fachwerk 1.20 m, System Höhe 1.20 m. Ober- und Untergurte sind zweiteilig hingegen die Diagonalen einteilige Bauteile. In einem Untergurtnknoten treffen acht Stäbe 6/14 cm der Untergurte und vier Diagonalstäbe 6/12 cm zusammen.

Auditorium, Weiherstephan



Mehrzweckhalle Lüterkofen, (CH) 1993

Nur der Eingangsbereich ist ein Fachwerkrost (Spannweite 16 x 16 m, Rasterfeld 2.3 x 2.3 m). Die Lastabtragung erfolgt in zwei Richtungen. Das Dach der Sporthalle besteht aus Fachwerkbindern.

Mehrzweckhalle, Lüterkofen



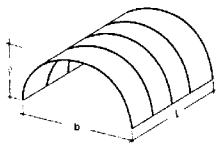
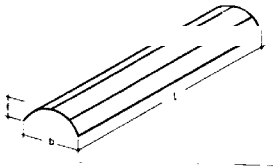
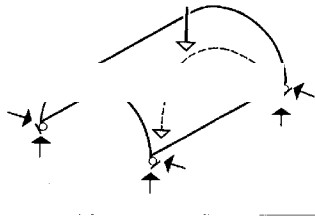
Beispiel vom Detail



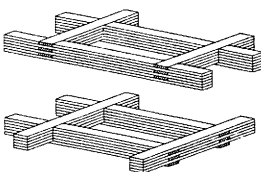
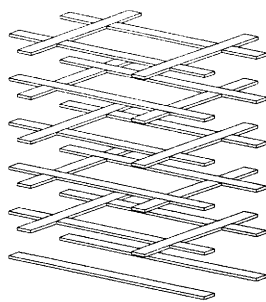
4. TONNENSCHALEN

Das Raster der dargestellten Rippentonnenschalen vereint folgende Vorteile: einfache und kostengünstige Errichtung, Verwendung von nicht verleimten Brettern ästhetisch ansprechende und sichtbare Tragstruktur. Die Rippen bestehen aus mehreren Brettlagen welche kreuzweise verschraubt werden. In einer Richtung sind die Bretter durchgehend, in der anderen Richtung sind sie unterbrochen und dienen als Füllhölzer.

Tragsystem: Tonnenschalen



Konstruktion



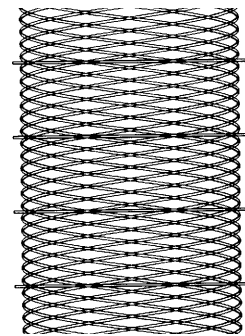
Halle für Galere, Morges (CH) 1995

Diese Brettstapelschale dient als Hallenkonstruktion für den Wiederaufbau einer historischen Galeere. Mit der Verwirklichung dieses Projektes wurde eine Konstruktion geschaffen, welche zeigt wie mit einfachen Mitteln von zum Teil ungelernten Arbeitskräften ein funktionelles ansprechendes Bauwerk entstehen kann. Durch die Optimierung der Konstruktionsdicke der Schale und der Anordnung der externen Rahmen wurden für das umbaute Volumen von der 60 m langen, 22 m breiten und 12 m hohen Halle insgesamt nur 51,3 m³ Holz verbaut.

Halle für Galere, Morges



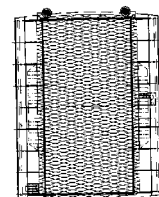
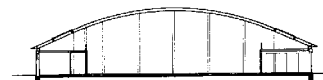
Grundriss



Sporthalle, Berlin (D) 1997

Die Tonnenschale überspannt 25,4 m. Das Rippennetz besteht aus vier sich kreuzenden Brettlagen. Drei Aussteifungselemente aus Brettschichtholz, zwei an den Giebelflächen und einer in der Mitte der Halle, nehmen die unsymmetrischen Lasten auf.

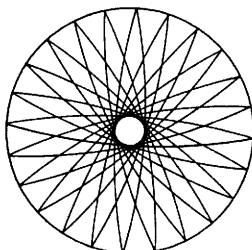
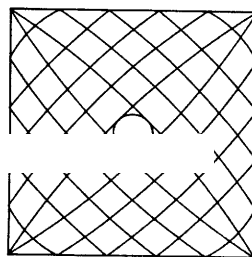
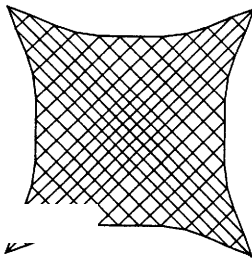
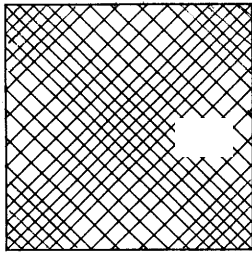
Sporthalle, Berlin



5. KUPPELSCHALEN

Die folgenden Projekte bestehen aus einer Rippenstruktur welche mit Hilfe der Brettstapeltechnik wie bei den vorher beschriebenen Tonnenschalen erbaut wurden. Die Schalenform unterscheidet sich durch ihre zweiseitige Krümmung

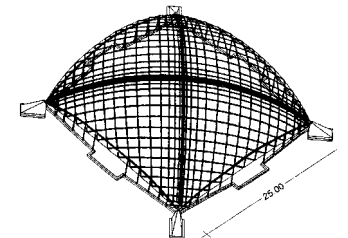
Tragsysteme: Kuppelschalen



Polydome, Ecublens (CH) 1991

Die sphärische Kuppel in geschraubter Brettstapelbauweise hat einen Radius von 27.5 m auf einer Basisfläche von 25 x 25 m und erreicht in der Mitte eine Scheitelhöhe von 6.8 m. Die über die Diagonalen gespannten Rippen bestehen aus zwei kreuzweise angeordneten Schichten verschraubter Bretter mit Füllhölzern in den Zwischenräumen. Die auf Lücke gelegte Schalung, welche auf die Rippen geschraubt ist, dient als Aussteifung der Rippenkuppel. Das Rippenschalen-Tragwerk erforderte ca. 32 m³ Vollholz.

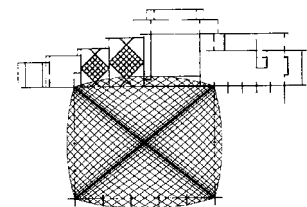
Polydome Ecublens,



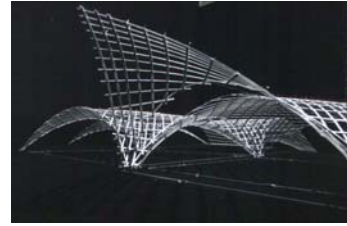
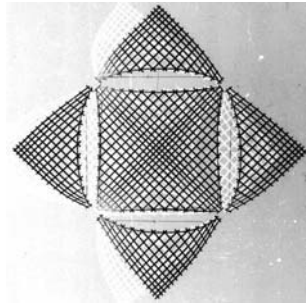
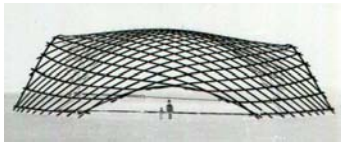
Ausstellungshalle, Ober-Ramstadt (D) 1997

Das Brettrippennetz der Dachschale überspannt einen rechteckigen Grundriß von 20 x 25 m, und ist auf 4 m hohen Stützen aufgelagert. Die Kuppel hat von der Fußbodenoberkante bis zum Kuppelstich eine Höhe von ca. 11 m. Auf die im Rechteck angeordneten Stützen und Scheiben wurde ein umlaufendes Brettschichtholz zugband flach aufgebracht. Dieses nimmt die Horizontalkräfte aus der Dachschale auf.

Ausstellungshalle Ober-Ramstadt,



Arbeitsmodelle



Schule, Nantes (F) 1995

Rundholzstützen tragen eine orthogonalen, quadratischen Trägerrost. Darauf wurde diagonal ein verdübeltes Kantholzrost angeordnet, in welchem eine kreisrunde Rippenkuppel in Brettstapelbauweise eingesetzt wurde. Die Horizontalkräfte der Kuppel nimmt ein Ring aus BSH auf. Die vertikale Lastabtragung der Kuppel funktioniert über Holzstützen, welche gleichzeitig das Traggerüst des Kegelstumpfes bilden. Dessen Holzschalung übernimmt die Abtragung der Windkräfte.

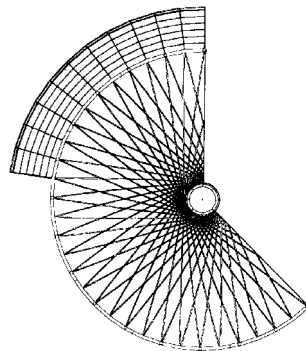
Schule, Nantes



Schule, Nantes



Schwimmbad, St. Quentin



Schwimmbad, St. Quentin, (F) 1997

Die Kuppel überdeckt die Umkleidekabinen, die Technikräume sowie die Cafeteria des Schwimmbads. Die Struktur mit einem Durchmesser von 54 m hat die Form eines Torus mit einer Segmentgröße von 225° . Außen ist die Schale auf Stützen gelagert, innen auf einem zentralen Kreis aus Stahlbeton. Die Rippen folgen den geodätischen Linien. Somit wird eine Biegung in zwei Richtungen vermieden. Ausgehend vom Rand werden die Rippen an den ersten Kreuzungspunkten verleimt, zur Mitte hin wurden diese auf der Baustelle vernagelt. Somit wurde sichergestellt, daß die Elemente in beiden Richtungen durchgehen. Die horizontalen Kräfte werden von einem äußeren Ring aus Brettschichtholz aufgenommen. Die Holzschalung auf der Dachoberfläche trägt zur Stabilität der Schale bei.

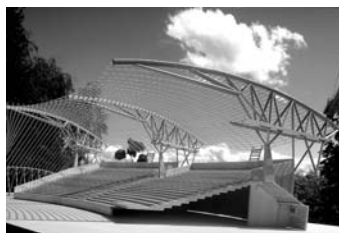
6. SATTELDACHSCHALEN

Bei diesen sattelförmigen Schalen werden die Lasten über Zugstreben zwischen den zwei hohen Punkten und über Druckstreben zwischen den zwei niedrigen Punkten zu den Randgliedern geleitet. Die Randglieder leiten diese Lasten zu den Lagern weiter. Die horizontalen Auflagerreaktionen müssen durch Zugbänder ausgeglichen oder durch massive Lager aufgenommen werden. Die Form wird von den Normalkräften in den Brettlagen, sowie von Schub- und Biegebeanspruchungen im Randbereich infolge einseitiger Lasten bestimmt. Wenn die Form der Schale den Biegemomenten angepaßt wird, nennt man die Schale Rippenschale. Diese Schalen bestehen aus zwei oder drei Rippengruppen und einer oder mehrere Brettschichten. Die Lasten werden nicht nur durch Zug-, Druck- und Scherkräfte in der Brettlagen, sonder auch über Biegung der Rippen abgetragen. Dadurch ist es möglich, abgeleitet von der reinen Membrantheorie, neben Kuppeln, Rotationsformen und sattelförmigen Schalen sowie freie Formen zu entwickeln. Das Design der Rippenschalen wird von der Spannweite, der Form und den äußeren Lasten (besonders unsymmetrische und Windlasten) bestimmt.

Freilichttribüne, Altusried (D) 1998 Translationform

Die Freiluftbühne nimmt 4000 Zuschauer auf. Die Struktur überdacht eine Fläche von 30 x 100 m in einer Höhe von 13 m. Die vier hoch belasteten Fachwerkträger sind im Abstand von 25 m (aus Fichtenrundholzstämmen) angeordnet. Die Dachschaale, welche zwischen den Fachwerkträgern gespannt ist, besteht aus zweilagig diagonal vernagelten Brettern.

Freilichttribüne Altusried



Rippenschale in München, West (D) 1968 Membranform

Rippenschale als Ausstellungspavillon vor dem Messegelände in München. Die Schale besteht aus vier zusammengesetzten Sattelflächen. Die Spannweite beträgt 9,00 m und die Auskragungen 4,50 m. Wegen der Auskragung und der freien Form der Schale wurde ein biegesteifer Aufbau der Schale aus einem Lattenrost 3/6 cm mit zwei Lagen schubsteif vernagelter Bretter gewählt.

Rippenschale in München,



Das Dach der Dächer „das Expodach in Hannover“



Der Entwurfsgedanke

Die 16.000 m² Dachfläche sind ohne umfassende Wände als reiner Witterungsschutz für den zentralen Veranstaltungsbereich der EXPO 2000 gedacht. Die Idee - "Das Dach ist die bauliche Urform des Wetterschutzes" - von Architekt Prof. Thomas Herzog, München, wurde in Zusammenarbeit mit dem Holzbauingenieur Prof. Julius Natterer, Lausanne, als Holztragwerk umgesetzt. Planung und Ausführung erforderte von allen Beteiligten - Planern, Fachexperten, Ausführenden und Bauherr - ein Höchstmaß an Einsatz. Planung, Arbeitsvorbereitung und Ausführung der verschiedenen Bauteile lief in weiten Bereichen parallel und erforderte einen erheblichen Koordinierungsaufwand.

Die in technischer und architektonischer Hinsicht anspruchsvolle und innovative Ingenieurholzkonstruktion symbolisiert die Aspekte des Leitthemas der EXPO 2000 - Mensch, Natur, Technik - in herausragender Weise. Das Bauwerk zeigt die Möglichkeiten der Verwendung von Holz im Bauwesen in allen Varianten: Rundholz, Schnittholz, Brettware, Leimholz und Furnierschichtholz. Die Wahl der jeweiligen Konstruktionsart und der Baustoffe für die einzelnen Bauteile richtete sich nach den jeweiligen Tragwirkungen, den gestellten Anforderungen und den unterschiedlichen Materialeigenschaften.

Tragwerkstruktur

Jeder einzelne Schirm besteht aus mehreren Baugruppen: vier Schalenflächen, vier auskragenden Trägern, einer zentralen Stahlkonstruktion und der Turmkonstruktion.

Die Schalenflächen weisen eine doppelte, gegensinnige Krümmung auf und übertragen die Belastungen aus Eigengewicht, Schnee und Wind auf die Randglieder und die Stahlkonstruktion. Die Lastabtragung erfolgt sowohl durch Schalentragwirkung als auch durch Biegetragwirkung.

Der über ca. 19 m frei auskragende Träger übernimmt die Lasten aus den Randträgern (Übertragung an der Spitze) und aus der Schale (Übertragung kontinuierlich am Untergurt). Der Untergurt folgt der Krümmung des Schalenrandes und ist im äußeren Drittel mit dem Obergurt zusammengefaßt. Zur Schirmmitte hin nimmt die Bauhöhe entsprechend der Beanspruchung zu.

Über die Turmkonstruktion aus vier zusammengesetzten Rundholzstützen und dreiecksförmigen Aussteifungsscheiben werden alle vertikalen und horizontalen Lasten auf die Gründung übertragen. Die zentrale Stahlkonstruktion ist an den vier Stützenköpfen gelenkig mit den Stützen verbunden. Die Aussteifungsscheiben übernehmen die gesamten horizontalen Belastungen aus Windbeanspruchung und unplanmäßiger Schiefstellung der Konstruktion.

Die Auflagerkräfte werden an den Stützenfußpunkten über Stahlfüße auf die Fundamente übertragen. Die Gründung besteht aus vier vertikalen Großbohrpfählen mit Längen von ca. 8 m bis 15 m. Die Pfahlköpfe sind durch einen Stahlbetonkranz verbunden, durch den unterschiedliche Horizontalkräfte auf die Pfahlköpfe ausgeglichen werden.

Unter Schnee- und Windlasten betragen die maximalen rechnerischen Gesamt-Verformungen- einschließlich der Anteile aus der Verformung der Turmkonstruktion und der Stahlkonstruktion - an der Spitze des Kragträgers ca. 13 cm und an der freien Ecke der Schale ca. 36 cm. Eine maximale Verformungsdifferenz zwischen frei stehenden, nicht gekoppelten Schirmen würde ca. 17 cm an der Kragträgerspitze und ca. 50 cm an der freien Ecke der Schale betragen. Um diese Differenzen auszugleichen, sind die Schirme an den auskragenden Ecken der Rippenschalen und an den Enden der Kragträger gekoppelt. Ferner werden durch die Kopplungen Torsionsschwingungen um die vertikale Achse der Turmkonstruktion verhindert.

Die gesamte Konstruktion wird von einer Kunststoff-Dachhaut überspannt, die im Abstand von ca. 5 cm über der oberen Schalungslage "schwebt" und gegen die Schalenränder vorgespannt ist. Die Befestigung erfolgt durch unterhalb der Dachhaut liegende und in Richtung der Längsrippen verlaufende Seile. Die Membranspannungen aus den Belastungen und aus der erforderlichen Vorspannung werden an den Schalenrändern auf die Schalungsebenen übertragen.

Lasteinwirkungen und Rechenmodelle

Anzusetzende Belastungen sind neben dem Eigengewicht Einwirkungen aus Schnee und Wind. Ferner sind geometrische Imperfektionen und dynamische Reaktionen zu berücksichtigen. Größe und Verteilung der Windlasten sowie Schneeumlagerungen wurden in Windkanalversuchen bestimmt. Im Gegensatz zu Windwirkungen, die in Anlehnung an freistehende Dächer zu erwarten wären, zeigte sich in den Versuchen eine stark belastende Windwirkung nach unten. Verursacht wird dies durch die besondere Form der Dachfläche, die sich aerodynamisch wie eine umgedrehte Tragfläche eines Flugzeugs verhält. Auf der Unterseite der Dachfläche entsteht Unterdruck, der die Dachfläche nach unten zieht.

Da die Dachhaut nicht direkt auf der Dachfläche aufliegt, treten bei belastender Wirkung aus Schnee und Wind zusätzlich Membranspannungen auf. Ab einer gewissen Belastung liegt die Dachhaut auf der Schalungsebene auf und die zusätzlichen Kräfte bleiben bei weiterer Belastung nahezu konstant. Die Lasten werden dann direkt auf die Schalenfläche übertragen. Bei Windsog müssen jedoch alle Kräfte über die Dachhaut und die Seile abgetragen werden.

Die Größe und Komplexität der Konstruktion machte eine Untersuchung des Tragwerks anhand von Teilstrukturen mit mehreren Rechenmodellen erforderlich. Die Struktur besteht im wesentlichen aus stabförmigen Bauteilen, die Gesamtstruktur als auch die Teilstrukturen wurden daher als Stabwerk idealisiert. Die wesentlichen Rechenmodelle zur Berechnung eines gesamten Schirmes waren: die Schirmstruktur mit den Schalenflächen und Kragträgern, die zentrale Stahlkonstruktion und die Turmkonstruktion.

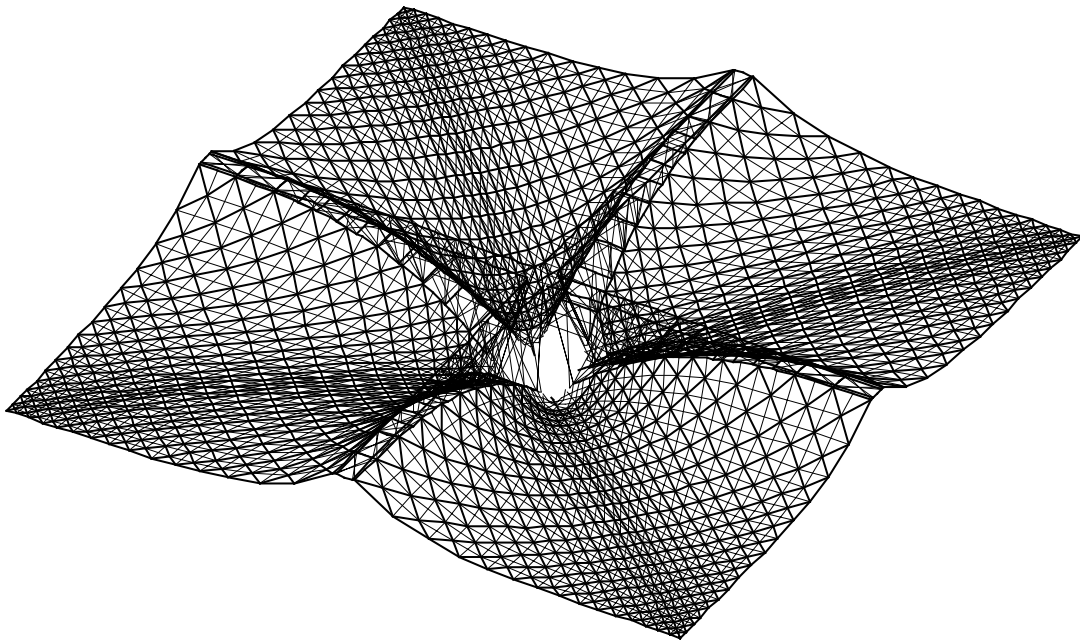


Abb. 4 Rechenmodell der Schirmkonstruktion

Das Rechenmodell der Schirmkonstruktion setzt sich aus insgesamt etwa 2500 räumlich angeordneten Knotenpunkten und nahezu 9000 Einzelstäben zusammen, die alle in ihrer Geometrie, den Materialeigenschaften, der Lage und den Knotenverbindungen zu definieren waren. Am Übergang vom Kragträger zur zentralen Stahlkonstruktion sind feste Auflager eingefügt. Die Nachgiebigkeit von Anschlüssen wurde in den Rechenmodellen durch entsprechende Reduzierung der Querschnittswerte berücksichtigt.

Die Berechnung für die Turmkonstruktion wurde aus terminlichen Gründen vorgezogen. Die Belastungen auf den Schirm wurden über Gleichgewichtsbetrachtungen auf entsprechende Kraftwirkungen am Turmkopf umgerechnet und als Belastungen auf die Turmkonstruktion angesetzt. Damit konnten die Belastungen auf die Fundamente bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt bestimmt werden.

Um die Schnittkräfte und Verformungen zu überprüfen, wurden die Übergangsbedingungen bei allen Schnittstellen zwischen den einzelnen Modellen auf ihr Kräftegleichgewicht und ihre Verträglichkeit hin überprüft. Dies war aufgrund der hochgradigen statischen Unbestimmtheit und des komplexen Zusammenwirkens der Schalen und der Kragträger zwingend erforderlich.

Die Rippenschale

Die Rippenschale ist als Brettstapelkonstruktion mit sich rechtwinklig kreuzenden Rippen ausgeführt und überdeckt eine Grundfläche von ca. 19 m x 19 m. Die vertikalen Abstände zwischen dem Tiefpunkt und den Hochpunkten betragen 6,0 m. Die Schale hat ein Gewicht von 36 t.

Die Anordnung der Rippen orientiert sich an den auftretenden Kräften. Sie sind aus 8 bis 10 Brettlagen mit einem Querschnitt von 30/160 mm aufgebaut. Die Brettlagen laufen an den Rippenkreuzungspunkten wechselseitig durch und bestehen aus Brettern der Sortierklassen S10 und S 13 sowie in hoch beanspruchten Bereichen aus Furnierschichtholz. Sie sind durch Keilzinkenstoß in voller Rippenlänge hergestellt. Das jeweils quer verlaufende Brett ist als Füllbrett eingesetzt. In der Mitte der Kreuzungspunkte ist jeweils ein Paßbolzen angeordnet. Infolge des lagenweisen Aufbaus der Rippen ist die Herstellung der Kreuzungspunkte einfach.



Abb. 5 Rippenanschluss an Kastenträger

Die einzelnen Brettlagen sind nachgiebig durch Verschraubung miteinander verbunden. In höher belasteten Teilbereichen (v.a. im Kehlbereich und über die Diagonale zur auskragenden Ecke) sowie bei den Rippenanschlüssen an die Randglieder wurden sie verleimt. Um das dynamische Verhalten der Konstruktion nicht ungünstig zu beeinflussen, waren die verleimten Bereiche aber auf ein Mindestmaß zu beschränken. Die Rippen sind an den Randgliedern über Schlitzbleche und Paßbolzen angeschlossen.

$$z(x,y) = \frac{15}{359}(-5\sqrt{2}+4x)\sqrt{2} - \frac{75}{257762}(-5\sqrt{2}+4x)^2 + \\ + y^2 \frac{\left(-\frac{229}{69} + \frac{109}{50}x - \frac{147}{808}x^2 + \frac{9}{1450}x^3 - \frac{2}{29841}x^4 - \frac{15}{359}(-5\sqrt{2}+4x)\sqrt{2} + \frac{75}{257762}(-5\sqrt{2}+4x)^2\right)}{\left(x + \frac{8}{75}\sqrt{2}\left(-\frac{229}{69} + \frac{109}{50}x - \frac{147}{808}x^2 + \frac{9}{1450}x^3 - \frac{2}{29841}x^4\right) - \frac{5}{4}\sqrt{2}\right)^2}$$

Abb. 6 Geschlossene mathematische Funktion

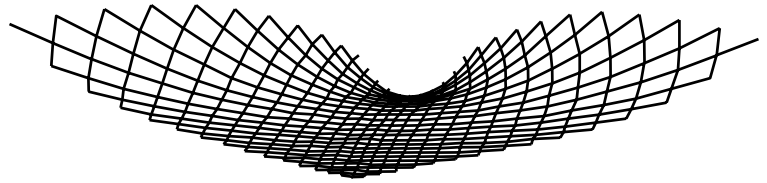
Die Rippenschale wird durch zwei unter 45° zu den Rippen verlaufenden Brettlagen ausgesteift. Die einzelnen Bretter haben einen Querschnitt von 24/100 mm und sind im Abstand von 10 cm verlegt. Im Kehlbereich sind die Brettlagen wegen der hohen Kräfte und der starken Krümmungen durch eine in mehreren Schichten verleimte BFU-Schale ersetzt.

Koordinaten in m

x: in Richtung der Hauptdiagonale

y: in Richtung der Nebendiagonale

z: Höhenkoordinate



Die bekannten HP-Schalen ergeben bei dem hier vorhandenen quadratischen Grundriss gerade Randglieder. Eine Konstruktion mit gekrümmten Randgliedern in dieser Dimension ist neuartig und erforderte besondere Überlegungen bei der Wahl der Schalengeometrie.

Die Schalenfläche wird durch eine geschlossene mathematische Funktion beschrieben. Fixpunkte für die Definition sind die Koordinaten der vier Eckpunkte der Schale. Die vertikale Spreizung der Struktur, d.h. die Höhenunterschiede zwischen diesen Eckpunkten, hat einen wesentlichen Einfluß auf die auftretenden Kräfte und somit auf das Trag- und Verformungsverhalten der Schale.

Anhand der mathematisch definierten Schalenform wurden die Rippenachsen als geodätische Linien bestimmt. Die Abstände der Rippen wurden den statischen Erfordernissen angepaßt und variieren zwischen 38 cm im Bereich der Hauptdiagonalen und 160 cm im Bereich der Schalenhochpunkte.

Um nach unten hängende Außenecken zu vermeiden, wurde beim Festlegen der Schalengeometrie eine vertikale Verformung der freien Ecke von 15 cm (Eigengewicht und Schneelast) durch eine Überhöhung im äußeren, frei auskragenden Teil der Schale berücksichtigt. Dies geschah nicht nur aus ästhetischen Gründen, sondern auch um eine mögliche Wassersackbildung zu vermeiden.

Der Kragträger

Der Kragträger hat eine Länge von ca. 19 m, eine Breite von ca. 3,0 m und eine maximale Höhe von 7,0 m. Er hat ein Gewicht von 22 t und besteht aus zwei geneigten Teilquerschnitten mit veränderlicher Bauhöhe.

Die geraden Obergurte bestehen aus Brettschichtholz BS 14 mit Querschnitten von 22/100 cm. Die Untergurte bestehen ebenfalls aus Brettschichtholz BS 14 und sind entsprechend den Randgliedern der Rippenschale gekrümmt. Sie weisen mit 22/110 cm bis ca. 22/145 cm aus fertigungstechnischen Gründen

(vorgegebener Verlauf der Brett lamellen wg. Verleimung) einen veränderlichen Querschnitt auf. Im Bereich großer Trägerhöhe verlaufen Ober- und Untergurt getrennt und sind über einen Vollwandsteg aus zwei

schraubpreßverleimten Furnierschichtholzplatten (2x 33 mm) verbunden. Die beiden Teile des Untergurtes sind durch einen K-Verband ausgesteift. In Höhe des K-Verbands verlaufen

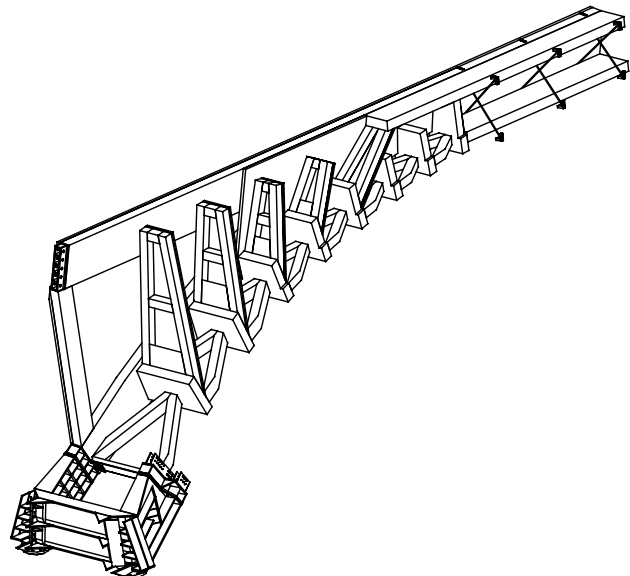


Abb. 7 Isometrie der Innenansicht des Kragträgers

quer zum Kragträger horizontale Stahl-Zugstangen, mit denen die Horizontalkräfte der einzelnen Rippenschalen kurzgeschlossen werden.

Im äußeren Drittel ist der Kragträger als Kastenquerschnitt aus Brettschichtholz ausgeführt und trägt die Kräfte aus den Randträgern aufgrund der geringen Bauhöhe über Biegung ab. Aus ungleicher Belastung der Schalen tritt eine zusätzliche Torsionsbeanspruchung im Kragträger auf, die durch den geschlossenen Kastenquerschnitt aufgenommen wird. Die Verbindung der Querschnittsteile zu einem geschlossenen Kasten erfolgte durch ein spezielles Anschlußsystem (Bertsche-VA-Verbinder), das aus Stahl-Schubverbindern besteht, die in Ausfräsungen eingebaut werden. Nach Zusammensetzen des Kastens werden die Hohlräume mit einem volumenneutralen Zementmörtel vergossen. Dadurch ergibt sich ein vollständiger Formschluß und eine hohe Steifigkeit der Verbindung.

Die Zentrale Stahlkonstruktion

Die Stahlkonstruktion im Verschneidungsbereich der vier Kragträger ist der zentrale Verbindungsknoten der Konstruktion, über den alle Kräfte aus den Rippenschalen und Kragträgern übergeleitet und auf die Turmkonstruktion umgelenkt werden. Sie hat Grundrißabmessungen von ca. 5,5 m x 5,5 m, eine Höhe von 7,0 m und wiegt 32 t. Die Gurtquerschnitte der Kragträger sind an einem steifen oberen bzw. unteren Kranz angeschlossen. Die Kränze sind mit rechteckigen Hohlprofilen verbunden. Die Neigungen der Profile und Stege nehmen die Achsen der Turmkonstruktion und der Kragträger auf. Die Aussteifung erfolgt über Auskreuzungen, die zur Minimierung der Verformungen vorgespannt sind.

Am unteren Kranz sind große Auflagerstege für den Anschluß der Untergurte angeschweißt. Das gekrümmte Widerlager für den Anschluß des Kehlbereiches der Schale stützt sich über Druckstreben auf die Auflagerstege und den unteren Kranz ab. Vor der mittleren Druckstrebe zwischen dem gekrümmten Widerlager und dem entsprechend gekrümmten Kehlsteelteil der Schale ist eine Tellerfeder angeordnet. Hohe Druckkräfte in der zentralen Längsrippe werden so gleichmäßiger auf die Längsrippen im Kehlbereich verteilt.

Der Stahlknoten ist als Schweißkonstruktion ausgeführt und stellte hohe Anforderungen an die Herstellung. Sie erforderte sowohl bei der Planung als auch bei der Ausführung höchste Genauigkeit und Präzision.

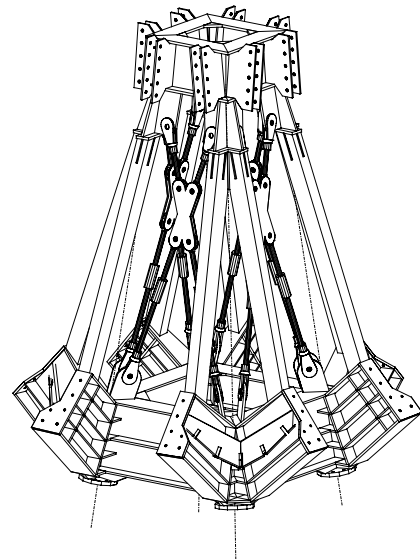


Abb. 8 Isometrie der Stahlpyramide

Die Turmkonstruktion

Die Turmkonstruktion besteht aus vier Stützen und ist über dreiecksförmige Scheiben ausgesteift. Die Stützen mit Durchmessern von mind. 68 cm am unteren und bis zu ca. 110 cm am oberen Ende bestehen aus einem Baum, der der Länge nach mittig in zwei annähernd gleiche Halbrundstämme aufgetrennt wurde. Die Halbrundstämme sind mit einem Abstand von 63 mm über Zwischenhölzer im Abstand von 50 cm bis 75 cm nachgiebig mit Einpreßdübeln verbunden.

Für die Stützen wurden Weißtannen in entsprechenden Durchmessern verwendet. Die Rundholzauswahl erfolgte visuell durch Beurteilung der Ästigkeit, der Krümmungen und durch Bestimmung der Stammdurchmesser am stehenden Baum. Der Durchmesser in Brusthöhe wurde direkt gemessen. Der Durchmesser in 20 m Höhe konnte nur durch empirische Zusammenhänge und mit Hilfe eines Theodolithen abgeschätzt werden. Als Unterstützung der visuellen Sortierung und um keine Bäume mit Kernfäule einzuschlagen wurden alle Bäume durch Ultraschallmessungen untersucht.

Die Stämme konnten wegen ihrer großen Dimensionen nicht künstlich getrocknet werden. Sie wurden daher auf einem sonnigen und windigen Platz gelagert und für die weitere Bearbeitung vorbereitet. Die Stämme wurden mit Hochdruck-Wasserstrahl entrindet und anschließend der Länge nach mittig aufgetrennt.

Die Holzfeuchte der Stämme nach dem Einschlag betrug bis zu 200 %. Zum Zeitpunkt der Montage wiesen die Stützen noch Holzfeuchten oberhalb des Fasersättigungspunktes auf. Bei der Bemessung wurden die Festigkeits- und Steifigkeitswerte daher gemäß DIN 1052 um 1/3 bzw. 1/6 abgemindert. Eine weitere Austrocknung ist aber durch die Konstruktion der Stützen als zusammengesetzter Querschnitt mit Zwischenraum gewährleistet.

Durch den kleineren Achsabstand am Stützenkopf treten hier größere Beanspruchungen in der Stütze auf als am Stützenfuß mit deutlich größerem Achsabstand. Die Stütze ist deshalb, der Größe der Beanspruchung folgend, entgegen der natürlichen Wuchsrichtung mit dem kleineren Durchmesser am Stützenfuß eingebaut.

Bei der Wahl der Verbindung für die Stützenanschlüsse spielte neben der Steifigkeit die Frage des Tragverhaltens bei hoher Holzfeuchte und dessen Veränderung bei zunehmender Austrocknung eine entscheidende Rolle. Die Stützenanschlüsse wurden daher mit einer speziellen Verbindung ausgeführt (Bertsche-BVD-Verbindung). Sie besteht aus einem profilierten Stahl-Ankerkörper, der in eine stirnseitige Sacklochfräsung eingebracht wird. Durch die Profilierungen verlaufen senkrecht zum Ankerkörper kreuzweise angeordnete Stabdübelpaare. Für das Herstellen der Verbindung sind ausreichende Toleranzen erforderlich, die durch Verfüllen der Hohlräume mit einem volumenneutralen Zementmörtel eliminiert werden. Dadurch ergibt sich ein vollständiger Formschluß, der die hohe Steifigkeit der Anschlüsse und die Tragfähigkeit sowohl im feuchten als auch im getrockneten Zustand gewährleistet.

Die Turmkonstruktion ist durch Diagonalen in Brettschichtholz mit beidseitiger Beplankung aus Furnierschichtholz-Platten ausgesteift. Auch diese Aussteifungsscheiben sind mit den Stützen kontinuierlich über Einpreßdübel verbunden. Zum Ausgleich der Schwindverformungen werden die Bolzen der Einpreßdübel durch eingebaute Tellerfedern auf Spannung gehalten. Die Aussteifungsdiagonalen sind über Stabdübelverbindungen an die Stützen angeschlossen.

Mit Ausnahme der Verbindungen mit den Stützenfüßen und der Stahlkonstruktion sind alle Anschlüsse in der Turmkonstruktion als nachgiebige Verbindungen ausgeführt. Mit zunehmender Austrocknung der Stützen auftretende Zwangsbeanspruchungen infolge von Schwindvorgängen in den Stützenquerschnitten werden so durch Verformungen und Kraftumlagerungen reduziert. Die Bolzen der Einpreßdübel in den Stützen sind auch im Endzustand zugänglich und müssen nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte der Stützen nochmals nachgezogen werden.

Ein Ausweichen der Aussteifungsscheiben senkrecht zur Scheibenebene und damit ein Verdrehen der Stützen um ihre Längsachse wird durch zwei horizontale Schottenebenen und horizontale Stahlzugstäbe zwischen den zentralen Verbindungsknoten der Scheiben verhindert. Auf Höhe der Scheibenanschlüsse an die Stützen sind jeweils zwei gegenüberliegende Stützen ebenfalls durch Stahlzugstäbe miteinander verbunden.



Abb. 9 Ansicht des Turmes

Konstruktiver Holzschutz

Die im allgemeinen hohe Dauerhaftigkeit von Holz kann ohne Einsatz chemischer Hilfsmittel nur durch Einhaltung konstruktiver Regeln des baulichen Holzschutzes gewährleistet werden. Dies ist durch eine Vielzahl zum Teil sehr alter Holzkonstruktionen, die ausnahmslos ohne chemischen Holzschutz auskommen, dokumentiert. Beim "EXPO-Dach" sollte auf einen chemischen Holzschutz vollkommen verzichtet werden.

Mit der kompletten Überdeckung der Schirme und deren Bauteile durch eine Dachhaut ist ein kompletter Regenschutz der Konstruktion gegeben. Die Dachhaut ist von allen Bauteilen abgehoben. Dadurch wird eine vollständige Umlüftung aller Bauteile gewährleistet. Bei vorübergehender Befeuchtung, beispielsweise durch Abtropfen von Tauwasser, können die Bauteile innerhalb kurzer Zeit wieder vollständig austrocknen. Begünstigt wird dies durch einen ständigen Luftaustausch zwischen den Bauteilen infolge Windeinwirkung.

Kritischer Punkt war vor allem die Fuge zwischen der Stahl-Grundplatte und der Hirnholzfläche am Stützenfuß. Hier wurde das Hirnholz mit einem Latexanstrich versehen.

Die Montage

Die einzelnen Baugruppen wurden unabhängig voneinander gefertigt. Für die Anschlüsse auf der Baustelle wurden Stahl-Stahl-Verbindungen vorgesehen. Die Stahl-Übergangsstücke an den Holzbauteilen konnten gleichzeitig als Lehre für die Fertigung der einzelnen Baugruppen verwendet werden.

Die Rippenschalen wurden auf vollflächigen Lehrgerüsten in einer Messehalle komplett hergestellt. Mit Hilfe einer stählernen Traversenkonstruktion wurden die fertigen Schalen aus den Lehrgerüsten gehoben und auf einen Tieflader gelegt.

Die Montage der Schirmkonstruktion erfolgte schrittweise. Der Zusammenbau der Stützenquerschnitte und der Aussteifungsscheiben erfolgte im Werk. Die Teile wurden auf der Baustelle zusammengefügt und auf den Stahlfüßen zur Turmkonstruktion aufgerichtet. Auch die zentrale Stahlkonstruktion wurde in Teilen vorgefertigt, vor Ort zusammengeschweißt und auf die Turmkonstruktion gehoben. Die Kragträger wurden vollständig im Werk gefertigt, im Ganzen auf die Baustelle transportiert und an die Stahlkonstruktion angehängt.

Nach der Montage der Kragträger wurden die Rippenschalen mit den Stahltraversen eingehängt, wobei die beiden Kragträger neben der ersten Schale an der Spitze abgestützt waren. Die Montagetraversen der Schalen wurden erst nach dem Zusammensetzen eines kompletten Schirmes und der Verbindung der Schalen untereinander sowie mit dem Kragträger entfernt.

Fotos und Zeichnungen

- Prof. Julius Natterer
- Ibois EPFL Lausanne
- IEZ Natterer GmbH
- Dipl. Ing K. Koetitz
- Dipl.-Ing. J. Natterer
- Dipl. Ing. A. Müller



Abb.11 Einheben einer Rippenschale