

02
2022

Konstruktiver Ingenieurbau

Grundbau

Planung und Bau der neuen Bahnstrecke von Tel Aviv nach Jerusalem

Mauerwerksbau

Tragfähigkeiten von Dübel-Systemen mit ETA

Holzbau

Zaubertuch als Schalenfaltwerk

Herausforderung Holzhochhausplanung

Verbindungssysteme

Tragverhalten von Stützenschuhverbindungen

Aktuelles

Neufassung der DIN EN 1995-2/NA „Holzbrücken“

Zusammenspiel von Funktionalität und Optik



Susanne Jacob-Freitag

Zaubertuch als Schalenfaltwerk



Bild 1: Die Dachform des fast 26 m hohen Gebäudes haben die Architekten von einem Tuch abgeleitet, das – wie von Zauberhand aufgehoben – das Darunterliegende offenbart. Das freitragende Zelt Dach ist als Schalenfaltwerk konzipiert. (Foto: Ghisleni Partner AG)

Ein Wettbewerb sollte über die Gestalt des Wunschobjekts entscheiden

Faltwerk aus zwölf gleichen und zwölf gespiegelten Elementen mit Haube

Tragwerksgliederung in drei Höhenabschnitte

Ungewöhnlicher Ansatz: Gesamtstabilität nach Steifigkeit bemessen

Dreidimensionale Modellierung für perfekte Passgenauigkeit

Auf aufwändigen Gründungsbau folgt schneller Holzbau

Vom Auflager-Ring zum schwebenden Unterdach-Ring

Akustik und Brandschutz

Das neue Veranstaltungsgebäude namens „Zauberhut“ von Knies Kinderzoo am Zürichsee zeigt, wie eine Freiform aus sich wiederholenden Holzbau-Elementen realisiert werden konnte und mit großer Innen- und Außenwirkung brilliert.

Im Kinderzoo Knie, im schweizerischen Rapperswil am Zürichsee, sollte ein Gebäude für Zirkusvorstellungen und andere Events das in die Jahre gekommene Seelöwenbecken, das Otarium, ersetzen. Im März 2021 konnten sich die Besucher außer über die Wiederöffnung dann auch über den spektakulären Neubau auf dem Gelände, den sogenannten Zauberhut, freuen. Nicht nur ist die Ausstrahlung des Gebäudes zauberhaft, sondern die gesamte Konstruktion, von der Planung bis

zur Montage, ist ein fantastisches Beispiel für die Möglichkeiten des Ingenieur-Holzbaus von heute. Mit der 25,60 m hohen Freiform ist ein beeindruckendes Schalentragswerk in Holzelementbauweise entstanden. In dem Ersatzneubau finden nun Zirkusvorstellungen und Papageienshows statt und darüber hinaus dient er aber auch als multifunktionaler Veranstaltungsort.

Ein Wettbewerb sollte über die Gestalt des Wunschobjekts entscheiden

Startschuss des Projektes war ein eingelaudener Wettbewerb. Als Sieger daraus hervorgegangen ist das Büro Carlos Martinez Architekten aus Berneck (Schweiz) mit der Idee eines Zaubertuchs, welches – wie von

Zauberhand aufgehoben – das Darunterliegende offenbart. Aus dem quasi in der Luft erstarrten Zaubertuch wurde der Zauberhut, der im Prinzip der Form eines Zirkuszeltens folgt, allerdings stützenfrei. Das „Zeltdach“ in Holz auszuführen, war ebenfalls Teil der Entwurfsidee. Wenngleich ein Zirkuszelt üblicherweise aus einer dünnen Membran besteht und dadurch besonders filigran und leicht erscheint, ist es beim Zauberhut erstaunlich gut gelungen, genau diese Anmutung mit Holzelementen und einer Bedachung aus Zinkblech-Paneelen nachzuempfinden.

Besonders wichtig war der Bauherrin, der Gebrüder Knie Schweizer National-Circus AG, eine hohe Nutzungsflexibilität. So können im Gebäude nun dank ausfahrbarer Tribünenelemente und eines versenkbaren Bühnenpodests auf einer Fläche von 1.200m² Zirkusvorstellungen stattfinden, Konzerte veranstaltet oder Bankette professionell arrangiert werden. Für die Zirkusvorführungen werden die im Halbkreis angeordneten Tribünen-Elemente aus dem Boden gefahren. An einem der hölzernen Druckringe sind die Traversen für die technische Ausstattung sowie die Einhängungen für die Trapeze bereits vormontiert.

Faltwerk aus zwölf gleichen und zwölf gespiegelten Elementen mit Haube

Bei der Planung gab es einige Vorgaben zu berücksichtigen. So war etwa die Grundfläche wegen des Standortes im Zoo begrenzt und der Grundriss durch die Orientierung am Vorgängerbau weitgehend festgelegt. Auch sollte das zu beheizende Volumen des Neubaus nicht zu groß sein, aber dennoch eine ausreichende Höhe für eine professionelle Vorstellung der Akrobaten im verbleibenden Luftraum unter der Konstruktion bieten. Das Dach durfte zudem keine Öffnungen für Oberlichter haben.

Die Lösung bestand in einer frei tragenden Konstruktion in Form eines Faltwerks aus gekrümmten Schalenelementen in Holzbauweise ohne Störzonen. Bei der Entwicklung des Dachtragwerks war es von Vorteil, dass die Architekten die Ingenieure der PIRMIN JUNG Schweiz AG bereits beim Wettbewerb involviert hatten. Das vereinfachte den anschließenden Planungsprozess, der mit einer umfangreichen 3D-Modellierung der Gebäudegeometrie beim ausführenden Holzbau-Unternehmen Blumer-Lehmann begann. Auf Basis des daraus entwickelten



Bild 2: Ein Holztragwerk, das sich wie ein Baldachin zur Turmspitze schwingt. Das Schalenfaltwerk des freitragenden Zeltdachs verleiht dem Veranstaltungssaal im Inneren seine charakteristische Erscheinung. Der multifunktional nutzbare Bau verbindet die Zirkus-, Gesellschafts- und Erlebniswelten miteinander. Zur modernen Veranstaltungstechnik gehören unter anderem eine hydraulische Bühne sowie eine sechsstufige Manege-Tribüne, die bedarfsweise elektrisch ausgefahren werden kann. (Foto: Luca Zanier)

Bild 3: Das Tragwerk ist als Holzfaltwerk konzipiert. Zusammengehalten wird es von einem Stahlbeton-Zugring unten und zwei Holzdruckringen in 11,50 m und 18,50 m Höhe. (CAD-Modell: Blumer-Lehmann AG)

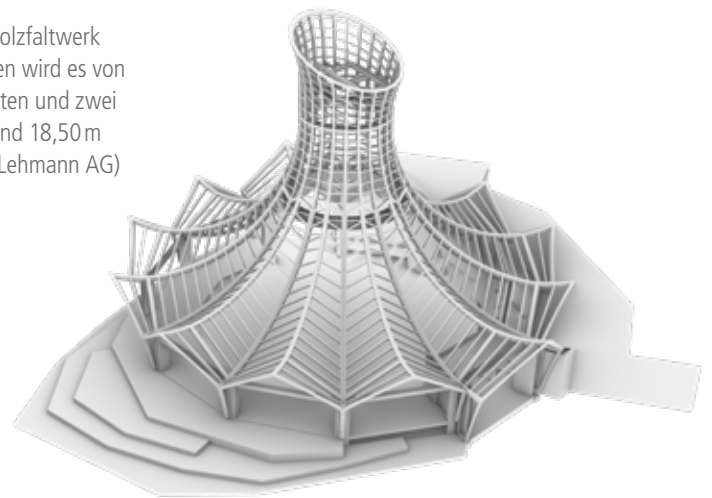


Bild 4: Querschnitt durch das 25,60 m hohe Gebäude mit Zugring unten (Durchmesser: 32 m) und den beiden BS-Holz-Ringen darüber. (CAD-Modell: Blumer-Lehmann AG)

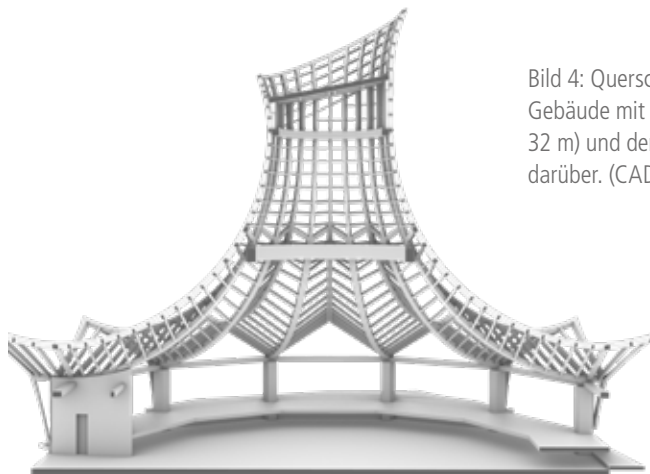




Bild 5: Der Stahlbeton-Unterbau ist fertig. Die ersten Dachelemente werden eingehoben. Sie spannen vom Stahlbeton-Zugring unten zum ersten BS-Holz-Druckring auf 11,50 m Höhe, den zunächst ein Montagegerüst stützt. (Foto: Blumer-Lehmann AG)



Bild 6: Die gesamte Dachkonstruktion lagert an den zwölf Kehlentiefpunkten auf Nischen im Betonzugring auf. Die Normalkräfte werden über die Kehlbalken in den Betonring eingeleitet bzw. aus den Gratbalken über die Dachrandträger in den Betonring. (Foto: Blumer-Lehmann AG)

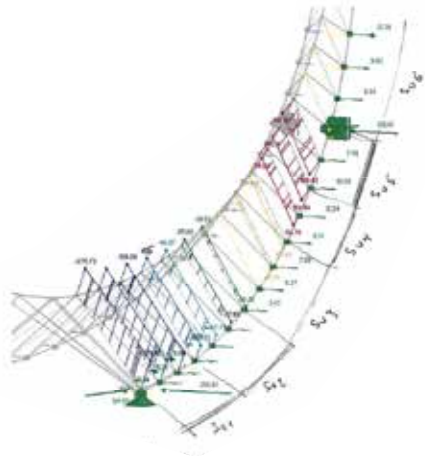
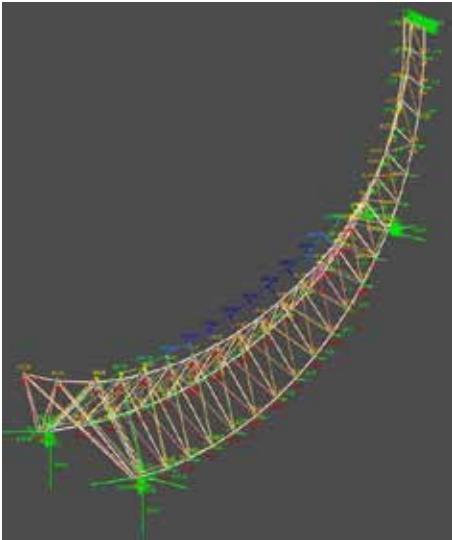
parametrisierten 3D-CAD-Modells ließen sich die optimale Gebäudehöhe mit 25,60 m und der Durchmesser mit 32 m eruiieren, sowie später die Prozesse der Produktion und der Montage exakt planen und steuern.

Statisch handelt es sich um eine geschwungene, rotationssymmetrische Dachform mit zentralem Hochpunkt. Ihr Tragwerk besteht aus 24 zweifach gekrümmten Holzschalen-Elementen, zwölf gleiche und zwölf gespiegelte, die paarweise jeweils ein umgekehrt V-förmiges Dachsegment mit Grat- und Kehlbalken bilden. Querbalken zwischen den beiden Gurthölzern bilden wie Sparren die „Unterkonstruktion“, auf die jeweils zwei Lagen diagonal verlegter, 24 mm dicker Holzschalung aufgenagelt wird. Diese V-förmigen Dachsegmente spannen als gebogene Einfeldträger vom Fußpunkt bis zum mittleren Holzdruckring.

Tragwerksgliederung in drei Höhenabschnitte

Als Auflager und Haltepunkte für die Dachelemente haben die Ingenieure auf 4 m Höhe, also da, wo die Kehlentiefpunkte liegen, einen Stahlbeton-Zugring (Ringbalken) angeordnet, sowie auf 11,50 m und 18,50 m Höhe zwei Druckringe aus Brettschicht(BS)-Holz. Das gesamte Gewicht des Daches wird über Schubkräfte aus den Dachsegmenten über die Grat- und Kehlbalken (b: 2 x 20 cm) als Normalkraft auf den Betonzugring geleitet, wo die unteren Enden der Kehlbalken in Aufлагertaschen mit einem Stahlteil verbunden eingelassen sind. So spannt der Zugring das Holztragwerk am Fuße des Daches zusammen und leitet alle dort ankommenden Lasten am oberen Ende der Stahlbetonstützen in diese ein und von dort in die Bodenplatte und die Fundamentpfähle.

Der mittlere BS-Holz-Druckring mit einem b/h von 50 cm x 78 cm (GL 24h) und einem Innendurchmesser von 8,30 m ist so platziert, dass die Dachschalen-Elemente sich wie auf einer Pfette abstützen. Gleichzeitig wirkt er einer Verformung der Dachfläche entgegen und hat somit auch aussteifende Funktion. Der obere Druckring (b x h: 39 cm x 36 cm) mit einem Innendurchmesser von 7 m dient zusammen mit dem mittleren Ring zur Befestigung der mit rund 6 m Länge vergleichsweise kurzen Dachelemente und zur Stabilisierung.



Bilder 9: Links: Schnittkräfte am Teilsystem „Dachsegment“ aus dem Stabwerksmodell als gebogener Einfeldträger, der vom Fußpunkt (feste Auflager) bis zum mittleren Holzdruckring (bewegliche Auflager) spannt.

Rechts: Als Streckenlast auf den Diagonalen der Dachfläche des Stabwerksmodells wirkende Schnittkräfte. An einem repräsentativen Einzelstab erfolgt die Gesamtstabilitätsbetrachtung nach Göggel.

(Zeichnungen: PIRMIN JUNG Schweiz AG)



Bild 10: Aufsetzen der komplett vorgefertigten Haube bzw. Hutspitze. Das fast 20 Tonnen schwere Sonderbauteil mit einem Durchmesser von 7 m wurde mit einem Spezialkran eingehoben und passgenau montiert. (Foto: Beat Brännimann GmbH)

charakteristische Last zugeordnet und ihre jeweilige Auslenkung bei einfacher Last (4,5 mm), bei doppelter Last (16 mm) sowie bei dreifacher Last (105 mm) festgestellt haben. Dabei zeigte sich, dass die Laststeigerungen bei der Berechnung nach Theorie II. Ordnung eine exponentielle Deformationssteigerung zur Folge haben. Entsprechend konnten die Ingenieure die Verformung der Stabwerksdiagonalen am realen Tragwerk, die nach Göggel das Verhältnis von 4,5 nicht überschreiten darf², begrenzen. Oder umgekehrt gesagt: Sie konnten eine erforderliche Steifigkeit über Vernagelungen an definierten Stellen entlang der diagonal verlegten Schalung bestimmen. Dabei variiert die Menge der Nägel je nach Beanspruchung über die Länge der jeweiligen Dachelemente hinweg. Anzahl und Anordnung der Nägel zur Aufnahme der Biegekräfte ließ sich dann wieder über das Stabwerksmodell berechnen. Auf dieser Basis konnte die Vernagelung für das gesamte Dachtragwerk berechnet werden.

Das beschriebene Verfahren diente der Abschätzung von Verformung und Stabilität des Gesamttragwerkes. Mit der errechneten Anzahl Nägel und den korrekt modellierten Normkraftfedern in den Diagonalstäben konnte der Tragsicherheitsnachweis über Abscheren der Nägel, respektive Spannungsnachweise in den gebogenen Gurthölzern, geführt werden.

2 Da der Tragsicherheitsnachweis keine Beurteilung des Systemverhaltens im Gebrauchszustand erlaubt, muss zusätzlich untersucht werden, ob die Gebrauchsfähigkeit des Tragwerks infolge zu großer Verformungen, wie z.B. Horizontalverschiebungen von Rahmenecken und Vertikalverschiebungen von Firstpunkten, beeinträchtigt wird. Wegen den mit einer Instabilität häufig einhergehenden großen Verformungen ist die praktische Brauchbarkeit des Tragsystems mit Erreichen der idealen Knicklast erschöpft. Deshalb stellt die DIN 1052 die Bedingung, dass gegenüber der idealen Knicklast eine mindestens 3,5-fache Sicherheit gegenüber der vereinfachten Stabilitätstheorie mit Knickzahlen vorhanden ist. Dies ist der Fall, wenn das Verhältnis der maßgebenden Verformungen unter dreifachen Lasten zu den maßgebenden Verformungen unter doppelten Lasten nicht größer als 4,5 ist.

Dreidimensionale Modellierung für perfekte Passgenauigkeit

Die Dachelemente wurden in der Halle des Holzbauunternehmens Blumer-Lehmann in Gossau auf Schablonen vorgefertigt. Zur Herstellung der Dachelemente erarbeiteten die Ingenieure für die Werkstattplanung ein 3D-CAD-Modell der Dachkonstruktion. Dies lieferte nicht nur deren exakte Abmessungen bzw. Geometrien samt Verschraubungen, Bohrungen und sonstiger Bearbeitungen für den CNC-Abbund, sondern auch alle anderen Eingangsgrößen für die Fertigung bzw. den Schablonenbau.

Bevor es allerdings in die Produktion ging, haben die Planer anhand eines Mock-ups erst mal sämtliche Materialien bemustert und den Herstellungs- und Montageablauf geprüft und festgelegt.

Für den Bau der großen Elemente wurden zunächst die gebogenen BS-Holz-Gurte aus entsprechend geformten und miteinander verklebten Lamellen hergestellt und dann auf der CNC-Fräse nach Maß präzisiert. Das heißt, die Gurtoberseiten erhielten aufgrund der zweifachen Krümmung der Dachelemente eine kontinuierliche Neigungsänderung (Abgratung) über die Länge, damit die Holzschalung „fließend“, ohne Verkantung, darauf verlegt werden kann (2 x 12 gleich gefräste BS-Holz-Bögen mit $b = 20\text{ cm}$). Nach Montage der Dachelemente ergeben sich dann am Grat wie in der Kehle Winkel, die sich über die Länge von spitz bis flach ändern. Gurte und Querbalken wurden zuerst in die Schablonen gelegt und auf der späteren Innenseite mit einer Dampfbremse belegt. Anschließend wurde das gesamte Element umgedreht, wieder in die Schablone gelegt, und die Gefache mit 24 cm Mineralwolle ausgedämmt. Jetzt konnten die Schalungsbretter als Kreuzschalung im 60°-Winkel ineinandergeschoben, in Form gedrückt und nach Vorgaben der Tragwerksplaner von PIRMIN JUNG Schweiz AG mit Nägeln fixiert werden.

Auch die Bedachung auf den Elementen wurde im Werk der Holzbauer befestigt. Hierfür brachten die Spengler zunächst die EPDM-Abdichtungsbahn und anschließend die Aluminium-Abstandsklötzchen sowie die mit Zinkblech belegten Kunstharz-Vollkernplatten selbst auf. Lediglich die Elementstöße ließen sie zunächst frei, sie wurden erst auf der Baustelle geschlossen. Die Planung für die wabenförmige Bedachung sowie die

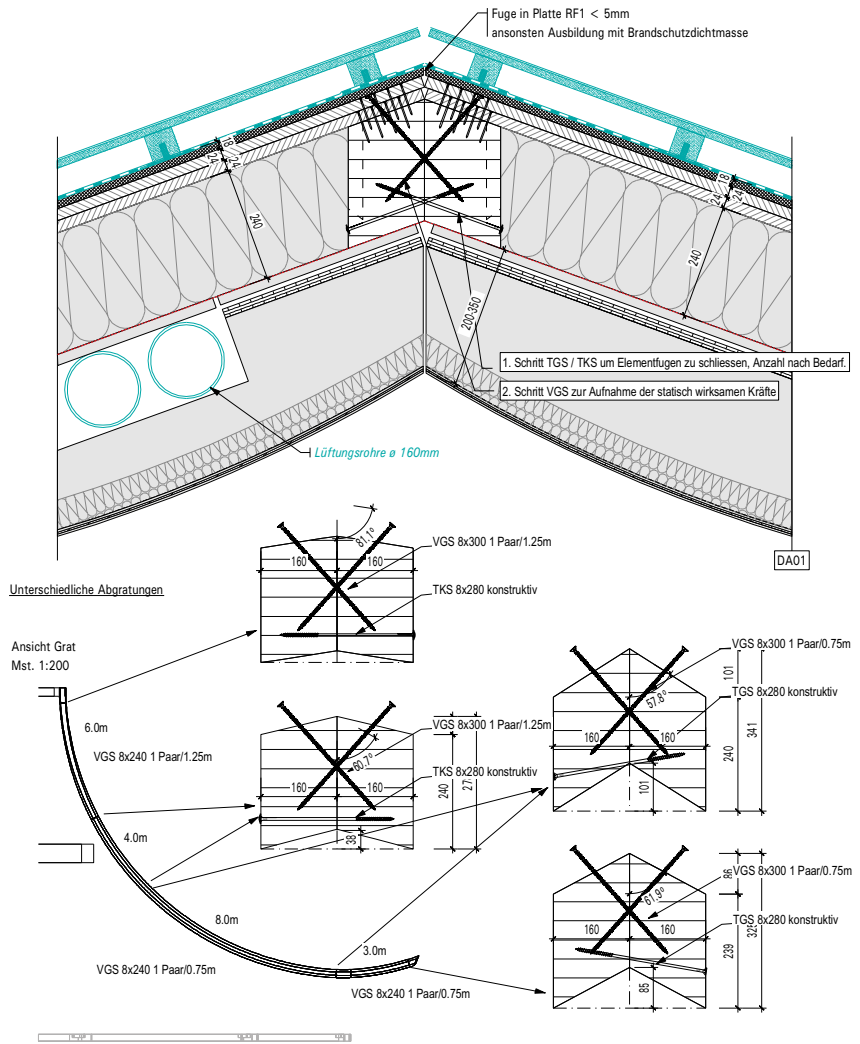


Bild 11: Konstruktionsdetail für Gratbalken mit kontinuierlichen Winkeländerungen der Abgratung (Zeichnung: PIRMIN JUNG Schweiz AG)



Bild 12: Vorne im Bild: Fertigung eines Dachelements auf einer Schablone. Hinten im Bild: Gewendetes Element mit ausgedämmten Gefachen. (Foto: PIRMIN JUNG Schweiz AG)

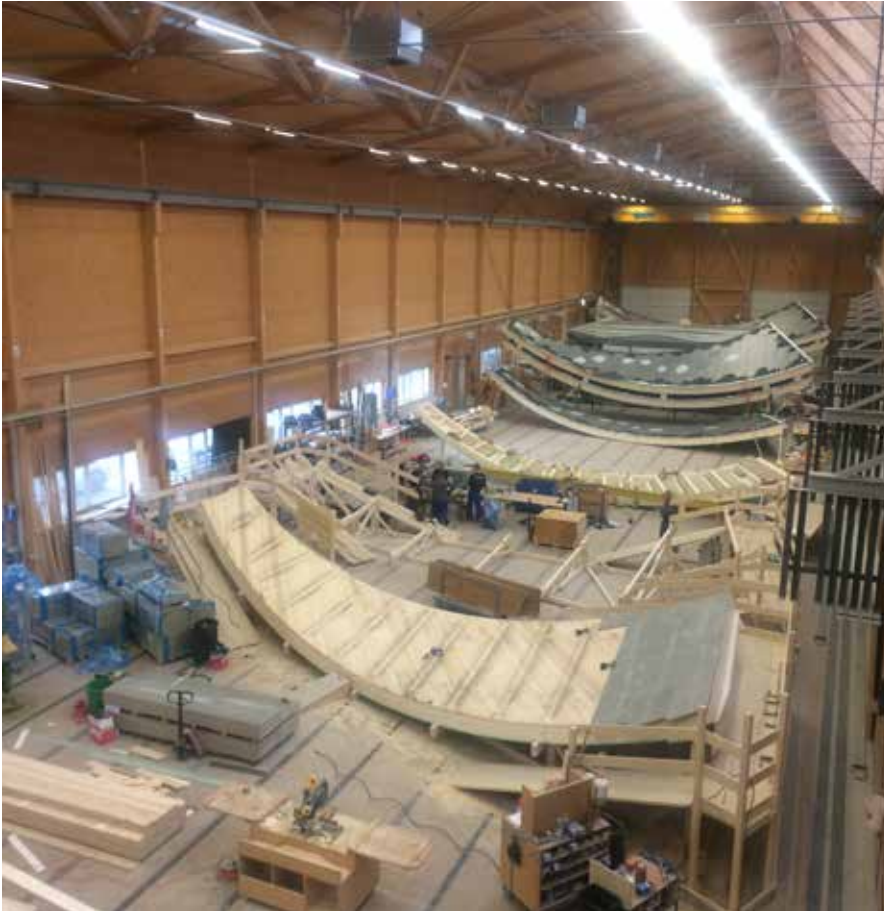


Bild 13: Blick in die Werkhalle auf die unterschiedlichen Vorfertigungsphasen (Foto: PIRMIN JUNG Schweiz AG)

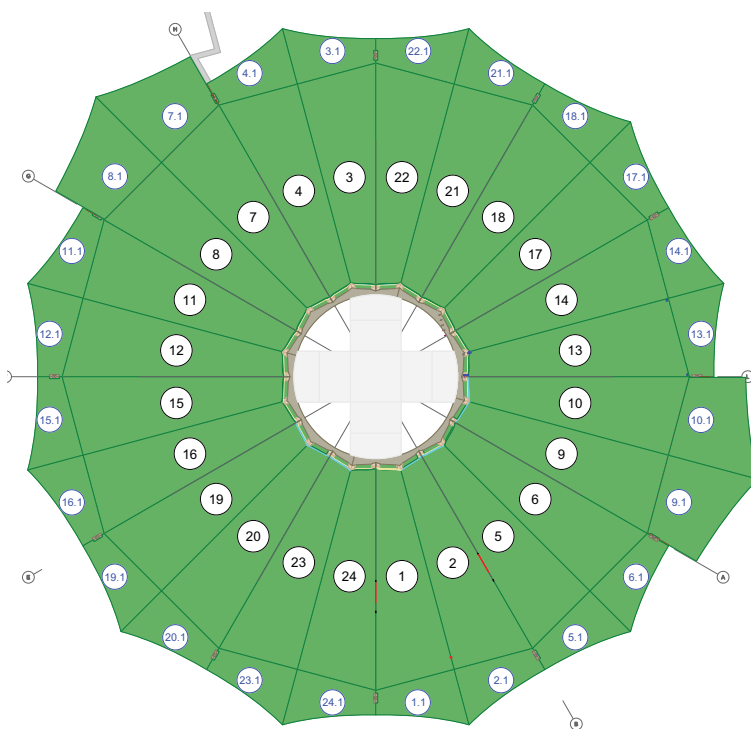


Bild 14: Die Montage erfolgte nach einer genau festgeschriebenen Reihenfolge, um die Lasten während der Montage möglichst gut zu verteilen. (Zeichnung: Blumer-Lehmann AG)

Herstellung einer Schablone für die Aluminium-Abstandshalter stammte ebenfalls von Blumer-Lehmann.

Auf aufwändigen Gründungsbau folgt schneller Holzbau

Die Gründung des Gebäudes gestaltete sich nicht ganz einfach, unter anderem weil das Gelände sehr sumpfig ist. Auf der Baustelle mussten zunächst 247 Holzpfähle mit einer Länge von 18m in die Erde getrieben werden. Gegen das durch die Seennähe stark drückende Grundwasser wurde zudem eine Weiße Wanne, inklusive einer zusätzlich vorapplizierten Abdichtungsbahn, für das Technikgeschoss (bis 4m unter Seespiegel) ausgebildet. Die Pfähle wurden eingetrieben und sind auf Reibung belastet. Dort, wo der Wasserspiegel schwankt, hat man kurze Betonaufsätze angebracht, damit die Holzpfähle konstant im Wasser stehen, was für die Dauerhaftigkeit der Stämme sorgt.

Nach der Pfahlgründung wurde die Bodenplatte gegossen, auf die wiederum die Stahlbetonstützen und -wände mit dem Stahlbeton-Zugring gestellt werden konnten. Nach Fertigstellung des Rohbaus wurde das Lehrgerüst aufgebaut, an dem die BS-Holz-Ringe exakt eingemessen, ausgerichtet und temporär fixiert werden konnten.

Dank der Elementbauweise war es möglich, die Holzkonstruktion im Werk vorzufertigen, während auf der Baustelle die Betonbauarbeiten liefen – für den engen Bauzeitenplan ein entscheidender Vorteil.

Vom Auflager-Ring zum schwebenden Unterdach-Ring

Die vorgefertigten Dachelemente der Ebene 1 konnten nun am Fußpunkt in die stählernen Widerlager und am oberen Ende mithilfe einer aufgeschraubten Knagge und einer am Grat ausgebildeten Kerbe auf den ersten BS-Holz-Druckring aufgelegt werden. Nach der Demontage des Lehrgerüsts drehte sich die Lastsituation allerdings um: Nun stützt sich das Element nicht mehr auf dem Ring ab, sondern der Ring hängt an bzw. unter der Dachkonstruktion und ist an dieser mit Gewindestangen verankert.

Bei der Montage der Ebene 1 galt es allerdings, eine Aufrichtreihenfolge einzuhalten: Es wurden immer gegenüberliegende Elemente montiert, um so die Last um den Ring herum gleichmäßig zu verteilen.

Nachdem die Elemente der Ebene 1 montiert waren, wurden vor Ort zunächst die Vordächer ergänzt, die aus Transportgründen separat montiert werden mussten. Anschließend folgte die Montage der deutlich kleineren Dachelemente der Ebene 2 zwischen den beiden Holzringen. Schließlich konnte der vollständig vorgefertigte, knapp 20 Tonnen schwere obere Teil, der Hut, mit einem Durchmesser von 7 m in einem Stück eingehoben und aufgesetzt werden. Das gesamte Dach benötigte nur 14 Tage Montagezeit.

Akustik und Brandschutz

Zum Dachaufbau im Zaubertut gehören außerdem 450 einzeln vorgefertigte und gebogene Akustikelemente. Der Diplom-Akustiker der PIRMIN JUNG Schweiz AG erstellte diverse Schallsimulationen, auf deren Basis die Lochung der Dreischichtplatten erfolgte. In die Tests flossen 20 unterschiedliche Veranstaltungsszenarien ein, um einen umfassenden Akustikkomfort zu gewährleisten.

Wie präzise hier geplant und ausgeführt wurde, zeigt sich nicht zuletzt darin, dass die Elemente am Ende exakt an der tragenden Konstruktion eingepasst werden konnten. Die Akustikschalen haben eine Höhe zwischen 20 cm und 55 cm und nehmen unter anderem Kabel und Leitungen für Licht, Luft und Medien auf.

Die gesamte Technik ist in einem Technikring im Untergeschoss untergebracht und wird über zwei Steigschächte nach oben geführt. Sämtliche Schnittstellen mit der Gebäudetechnik konnten durch die 3D-Modellierung im Vorfeld optimal gelöst werden.

Um auch den Anforderungen des Brandschutzes bei Veranstaltungen mit bis zu 500 Personen gerecht zu werden, dienen die Betonwände im EG und UG zur Aufteilung der Brandabschnitte. Technische Maßnahmen, wie beispielsweise die Entrauchung der Arena oder eine Sprachalarmierungsanlage, komplettieren das Brandschutzkonzept.

Das Gebäude ist übrigens nicht nur durch die Umsetzung der Freiform in Holz nachhaltig, sondern auch die Fernwärmenutzung, eine Bauteilaktivierung und die Aufbereitung des Seewassers für Brauchwasser leisten ihren Anteil im Betrieb.

Linktipp:

<https://tinyurl.com/2p8npbnp>



Bauzeit: Oktober 2019 bis September 2020

Montage Holzbau: 3. bis 19. Juni 2020

Gebäudevolumen (SIA 416): 6.600 m³

Nettogeschossfläche (SIA 416): 1.400 m²

Bauherr:

Gebrüder Knie, Schweizer National-Circus AG, CH-8640 Rapperswil, www.knie.ch

Generalplanung und Projektentwicklung:

Ghisleni Partner AG, CH-8640 Rapperswil, www.ghisleni.ch

Architektur:

Carlos Martinez Architekten AG, CH-9442 Berneck, <https://carlosmartinez.ch>

Tragwerksplanung Holzbau, Bauphysik, Brandschutz:

PIRMIN JUNG Schweiz AG, CH-6026 Rain, www.pirminjung.ch

Vor-, Werkstatt- und Fertigungsplanung Holzbau,

3D-Modellierung, Fertigung und Montage:

Blumer-Lehmann AG, CH-9200 Gossau, www.lehmann-gruppe.ch

Abdichtungsarbeiten Fassade und Fassadenbekleidung in Metall:

Beat Brönnimann GmbH, CH-9000 St. Gallen, www.broennimannspenglerei.ch

Holzverbrauch:

224 m³ Fichte und Tanne aus der Schweiz und aus Österreich; davon 180 m³ für das Tragwerk (Träger, Schalung und Dreischichtplatten) und 44 m³ für die Innenbekleidung



Dipl.-Ing. (FH)

Susanne Jacob-Freitag

Redaktionsbüro manuScriptur

info@texte-nach-mass.de

www.texte-nach-mass.de

in Zusammenarbeit mit

Nina Greve, Lübeck