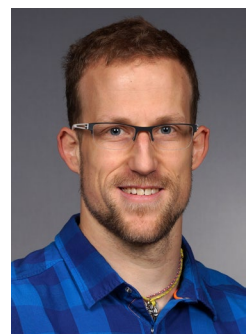


Wisdome – Technisches Museum Stockholm

Stefan Rick
SJB Kempter Fitze AG
Frauenfeld, Schweiz



Wisdome – Technisches Museum Stockholm

1. Das Siegerprojekt



Abbildung 1: Visualisierung (Elding Oscarson)

Das Design ging als Sieger eines geladenen Wettbewerbs im Jahr 2019 des Tekniska Museet Stockholm hervor, die eine Erweiterung ihres Technischen Museums in Stockholm planten. Mit Stora Enso als Hauptsponsor war ein spezielles Kriterium des Wettbewerbs, dass die Produkte Brettsperrholz (BSP) und Furnierschichtholz (FSH) von Stora Enso auf eine innovative Art und Weise für die Tragstruktur verwendet werden sollen. Somit war Stora Enso auch Teil der Jury des Wettbewerbs. Sieger des Wettbewerbs war das Projekt von Elding Oscarson und DIFK.

Im Inneren des Gebäudes befindet sich der Dome und ein Café.

Dach

- Fassadenstützen und Freiform Gridshell
- Breite x Länge x Höhe: 26m x 48m x 15m (ohne Vordach)

Dome

- Einhausung des 360° Kinos mit 3D Erlebnis
- Platz für 100 Personen
- Durchmesser x Höhe: 22m x 12m

Café

- Kaffee, Bar und WC
- Breite x Länge x Höhe: 4m x 13m x 3m

In den weiteren Ausführungen beschränkt sich der Beitrag auf das Dach des Wisdome Stockholm.

2. Die Aufgabenstellung

2.1. Das Gebäude

Das Gebäude ist ca. 26m breit und 48m lang. Umlaufend entlang der Fassade sind Stützen angeordnet, auf denen das Dachtragwerk sitzt. Auf der Nordseite grenzt der Neubau an ein bestehendes Museumsgebäude, weshalb das Vordach und die Glasfassade nur an den restlichen drei Seiten des Gebäudes angeordnet sind. Im Inneren befindet sich der Dome, der ein 360° Kino mit 3D Erlebnis beherbergt.

Die Geometrie des Dachs orientiert sich an der Form des Domes. Die Dachfläche ist entlang der Längsachse durch das Zentrum des Domes symmetrisch, wird aber dann von dem Bestandsgebäude abgeschnitten.



Abbildung 2: Visualisierung (Elding Oscarson)

2.2. Die Herausforderung

Die Option, die Freiformgeometrie mit gekrümmten BSH (einfach, zweifach, tordiert) zu konstruieren, wie wir es bisher gewohnt waren, gab es hier nicht. Mit der Vorgabe des Materialsponsors Stora Enso galt es, eine Konstruktion für das Dach mit Plattenmaterial aus BSP und FSH zu finden.

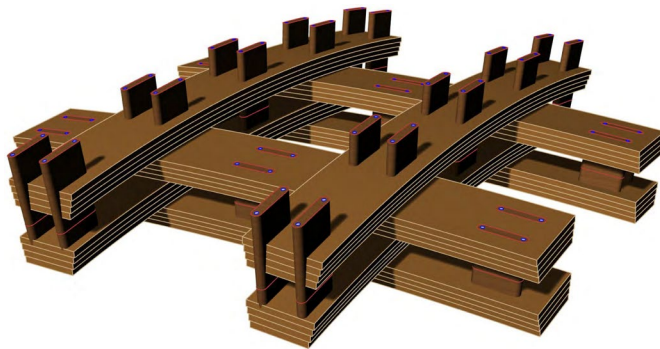


Abbildung 3: Konzept Freiformstruktur Dach (Hermann Blumer)

Mit dem Konzept von Hermann Blumer war die Fahrtrichtung gegeben: Vorgesehen ist eine Gridshell, die aus mehreren Lagen besteht und jede dieser Lagen besteht wiederum aus mehreren Lagen FSH, die in die finale Form gebogen und tordiert werden und ohne Verleimung, aber mit Schubdübel aus FSH in Form gehalten werden.

Die Gridshell spannt in beide Richtungen des Gebäudes und lagert umlaufend auf einem Randträger, der wiederum seine Lasten auf Stützen abgibt.

3. Die ersten zwei (drei) Mock-ups

Nachdem das Konzept vorhanden war, kam der Entscheid für ein Mock-up, um das Konzept aus statischer und architektonischer Sicht zu testen. Für das statische Mock-up wurden jeweils zwei Träger aus dem Dach im Maßstab 1:1 gefertigt, um jeweils die Torsion und die Biegung zu testen. Die einzelnen Lamellen wurden mit Hilfe einer Schablone in die finale Form gezwungen und fixiert. In dieser Form wurden die Ausschnitte für die Schubdübel gefräst und danach die Schubdübel eingesetzt.



Abbildung 4 und 5: statische Mock-ups mit maximaler Torsion und maximaler Biegung (Blumer-Lehmann AG)

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den statischen Mock-ups:

- Die Träger behalten ihre Form nicht, die Rückstellung ist zu gross
- Anstelle von 4 x 39mm FSH Lamellen pro Lage wird gewechselt auf 5 x 31mm



Für das architektonische Mock-up wurde ein kleiner Ausschnitt aus dem Dach mit 4 Lagen, ebenfalls im Maßstab 1:1 gefertigt, welches als Veranschaulichung für die Architekten diente.

Die Mock-ups beinhalteten nur die Tagkonstruktion, keine Akustikelemente, oder irgendwelche Dachaufbauten.

Abbildung 6: architektonisches Mock-up (Blumer-Lehmann AG)

4. Konzept Verfeinerung

Mit den Erkenntnissen aus den ersten Mock-ups wurde das Konzept für das Freiformdach verfeinert. Zur selben Zeit ergab sich aus den ersten Berechnungen, dass der 4-lagige Aufbau zu große Verformungen mit sich bringt. Da sich die innere und die äußere Dachfläche in ihrer Geometrie unterscheiden, war für die Dachhaut eine Unterkonstruktion geplant, um dessen Geometrie darzustellen. Diese Unterkonstruktion wurde in diesem Zusammenhang als 5. Lage verwendet um der Konstruktion mehr Steifigkeit zu geben.

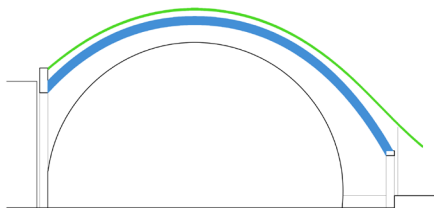


Abbildung 7: Schema Unterschied der Geometrie der inneren und äußeren Dachfläche (Elding Oscarson)

4.1. Der 5 x 5-lagige Aufbau

Mit der 5. Lage und dem Entscheid 5 x 31mm Lamellen zu verwenden war der 5 x 5-lagige Aufbau entstanden. Es gibt eine Haupttragrichtung mit 3 Lagen, die über die kurze 26m Distanz des Gebäudes spannt und dazwischen verlaufen 2 Lagen in der Längsrichtung des Gebäudes, die die 48m Distanz überspannen.

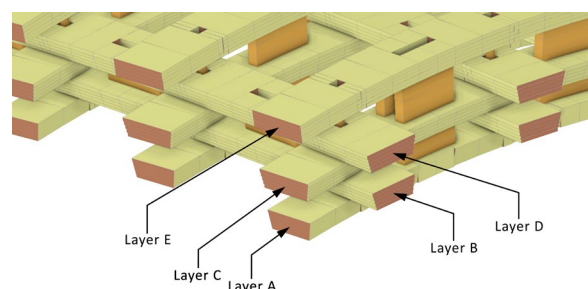


Abbildung 8: finaler Lagenaufbau der Gridshell

4.2. Die Vorspannung

Die Geometrie des gekrümmten Dachtragwerks führt zu horizontalen Spreizkräften am Kopf der Stützen, welche horizontale Verformungen entlang des Randträgers und der Stützenköpfe zur Folge haben. Durch diese Verformung ergibt sich eine Schiefstellung der Stützen und somit auch der Glasfassade, die an drei Seiten des Gebäudes vorgesehen ist. Und an der vierten Seite grenzt das Bestandsgebäude an.

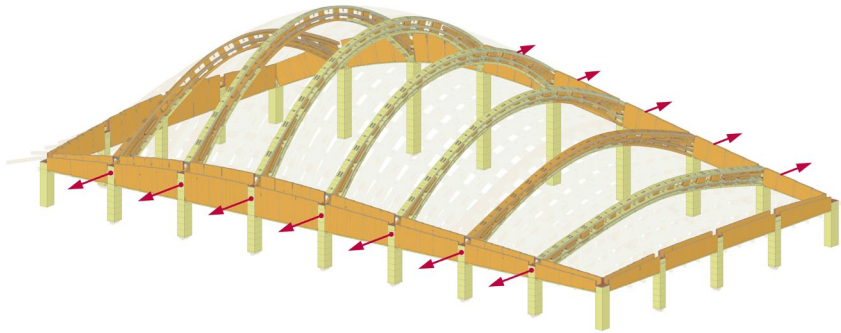


Abbildung 9: schematische Darstellung der horizontalen Spreizkräfte (rot) in Querrichtung des Gebäudes



Um der horizontalen Verformung entgegenzuwirken und diese zu begrenzen, wurden die Fassadenstützen exzentrisch mit Spanngliedern vorgespannt. Die Spannglieder haben jeweils eine Stahlplatte unter der Bodenplatte und auf dem Stützenkopf, um die Druckkräfte einzuleiten. Pro Stütze wurden 2 Spannglieder vorgesehen, die während der Montage des Dachtragwerks und vor dem Entfernen des Lehrgerüsts, vorgespannt wurden.

Aufgrund der exzentrischen Anordnung der Dachform auf den Stützen in Querrichtung und der asymmetrischen Dachform in Längsrichtung des Gebäudes, sind die horizontalen Spreizkräfte an jedem Stützenkopf unterschiedlich. Um am Ende einen gleichmäßigen Verlauf entlang des Randträgers zu erhalten, muss dementsprechend auch die Vorspannung bei jeder Stütze individuell sein.

Abbildung 10: Stützenkopf während der Montage, noch nicht vorgespannt

5. Holz-Holz Verbindungen

5.1. Kreuz- und Schubdübel

Entsprechend der Philosophie ein Holztragwerk auch mit Holz-Holz Verbindungen zu realisieren und mit Stora Enso als Materialsponsor, war die Grundlage gegeben, möglichst alle Bauteile mit BSP und/oder FSH umzusetzen. Mit dem Input von Design-to-Production GmbH ist dann auch das Konzept für die zwei am häufigsten vorkommenden Verbindungstypen, die Kreuz- und die Schubdübel, entstanden. Die Kreuzdübel als Verbindung an den Kreuzungspunkten der Lagen und die Schubdübel als Schubübertragung zwischen den Lagen, die in dieselbe Richtung spannen.

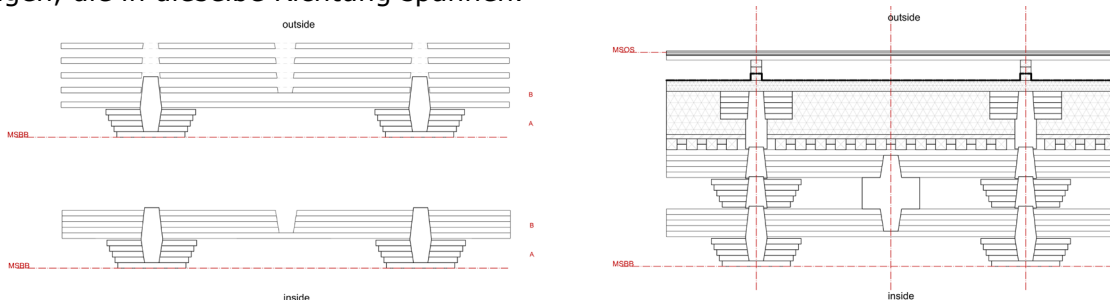


Abbildung 11 und 12: Konzept (links Montage, rechts Aufbau) Gridshell mit Kreuz- und Schubdübel (Design-to-Production GmbH)

Die Kreuzdübel sind rund gedrechselte, konische Kegel. Sie sind aufeinandergestapelt, verbinden die zwei Spannrichtungen miteinander und geben bei der Montage die Dachgeometrie immer von einer Lage auf die nächste weiter. Die Schubdübel sind entsprechend den Schubkräften massiver ausgeführt und mit einem trapezförmigen Zapfen versehen, um das Einfahren der Lamellen zu ermöglichen.

5.2. Längsstöße

Im selben Zusammenhang wurden auch die Längsstöße der Lamellen der Lage B bis E entwickelt. Die Länge der Lamellen und somit auch die Lage der Längsstöße im Dach, werden definiert von der Transportlänge und den Einfahrrichtungen im Dachtragwerk. Je gekrümmter die Dachform, desto kürzer die Lamellen. Mit dem Ziel einen möglichst einfachen und montagefreundlichen Längsstoß zu haben, der auch den statischen Anforderungen genügt, wurde hier eine Variante gewählt, die in das bisherige Konzept passt und keine weiteren Anpassungen benötigt.

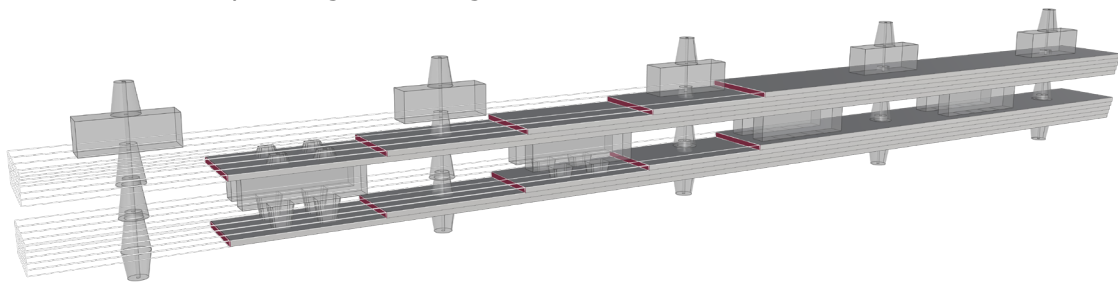
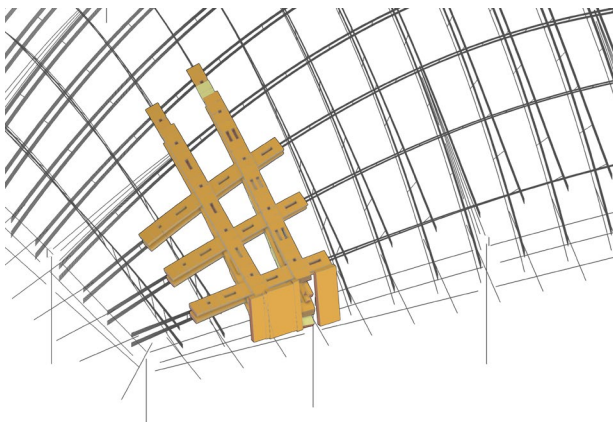


Abbildung 13: Konzept Längsstöße im Dach

Die Lamellen sind ohne statische Verbindungsmittel zwischen den Kreuz- und Schubdübeln gestoßen und der Lastabtrag erfolgt über den Kontakt zwischen den Lamellen und den jeweiligen Dübeln.

6. Das finale Mock-up



Das finale Konzept war gefunden, die Dimensionen und Details weitestgehend festgelegt, nun war der Zeitpunkt für ein weiteres und finales Mock-up. Mit diesem Mock-up sollten alle Ideen, offenen Fragen und vor allem auch die Montage geklärt werden. Um unter möglichst realitätsnahen Bedingungen die Fragen zu klären, wurde ein Ausschnitt aus dem Dachtragwerk im Maßstab 1:1 gefertigt, das von dem Team produziert und montiert wurde, welches auch die Produktion und Montage des Wisdome Stockholm machen wird.

Abbildung 14: Ausschnitt des Dachtragwerks der für das Mock-up gewählt wurde

6.1. Toleranzen

Ein wichtiger Punkt des Mock-ups waren die Toleranzen. Wieviel grösser soll der Ausschnitt für die Kreuz- und Schubdübeln in den Lamellen nun gefräst werden? Aus der Sicht des Ingenieurs war die Antwort klar: am besten keine Toleranz, da der Lastabtrag zwischen Lamellen und Dübel auf Kontakt funktioniert und Toleranzen Verformungen mit sich bringen. Auf der Seite des Holzbauunternehmers war die Antwort eine andere: auf jeden Fall Toleranzen, damit die Montage reibungslos funktioniert. Um die Frage zu klären wurde bei dem Mock-up mit drei verschiedenen Toleranzen zwischen Lamellen und Kreuz- und Schubdübeln gearbeitet: 0mm, 1mm und 2mm.

Mit der Fertigstellung des Mock-ups wurde festgelegt, mit 0mm Toleranzen zu planen, da aufgrund der konischen Dübelform das Einfahren der Lamellen gut funktioniert.

7. Modellierung und Bemessung

Das Konzept sieht vor, dass alle Elemente bei der Montage aufeinandergestapelt werden. Lage A gibt die Geometrie vor und dann werden Kreuz- und Schubdübel eingesteckt, die Lamellen der Lage B eingefahren und dann die nächsten Dübel, bis alle Lagen montiert sind. Die Lamellen (mit Ausnahme von Lage A) sind nicht miteinander verleimt und einzelne Elemente, die auch so in der Bemessung berücksichtigt werden sollen. Das statische Modell wurde auf Grundlage der Referenzgeometrie von Design-to-Production GmbH erstellt. Mit dem Input der Stützensvolumen, der Masterfläche und der Achsen der Lagen, wurde mit Hilfe von Grasshopper die Geometrie für das Stabwerksmodell erzeugt.

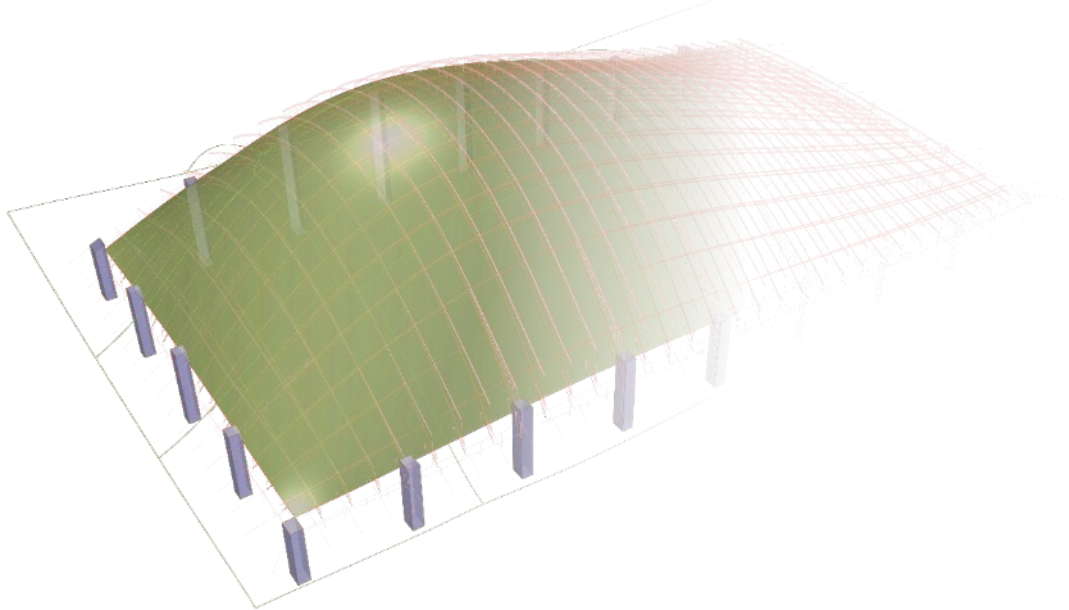
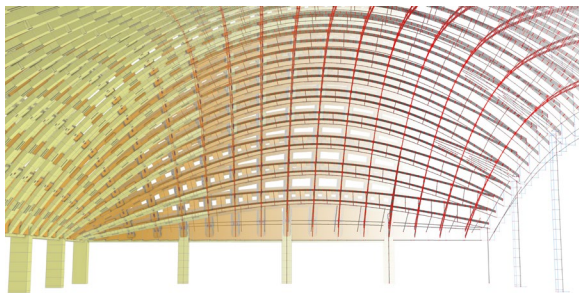


Abbildung 15: Input der Elemente der Referenzgeometrie zum Output der statischen Geometrie in Grasshopper (auf Basis des 3D-Modells von Design-to-Production GmbH)



Der Output von Grasshopper in die Statiksoftware bestand aus folgenden Elementen:

- Knoten
- Stäbe
- Materialien
- Querschnitte
- Kopplungsstäbe
- Stabdrehungen

Abbildung 16: Ausschnitt Stabwerkmodell

7.1. Eigenspannungen

Mit dem Biegen und Tordieren der Lamellen in die finale Position auf der Baustelle entstehen in den Lamellen Eigenspannungen, die auch für die Bemessung relevant sind. Diese Eigenspannungen sind einerseits wichtig für die Bemessung der Lamellen und andererseits für die Bemessung der Anschlüsse, da die Rückstellkräfte der Lamellen in den Anschlusspunkten befestigt werden müssen.

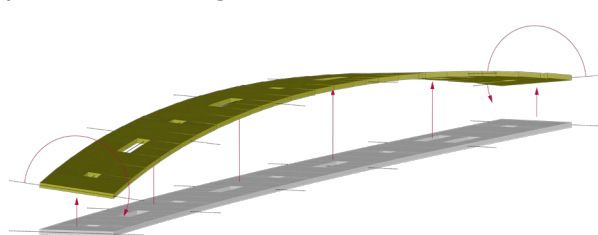


Abbildung 17: Schema der Biege- und Torsionskräfte

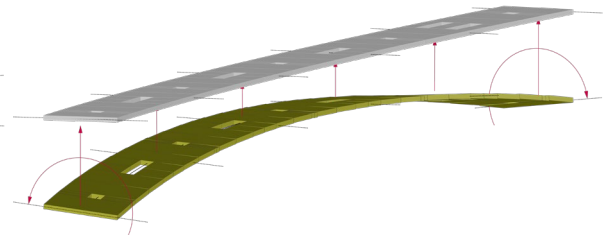


Abbildung 18: Schema der Rückstellkräfte

8. Freigabeprozess

Für Die Kreuz- und Schubdübel wurden jeweils verschiedene Typen entwickelt, die aus statischer Sicht verschiedenen Leveln an Belastung entsprechen. Bei allen Verbindungen wurden alle Bearbeitungen, Bohrungen und Verbindungsmittel im 3D eingeplant, vom Holzbauingenieur kontrolliert und freigegeben.

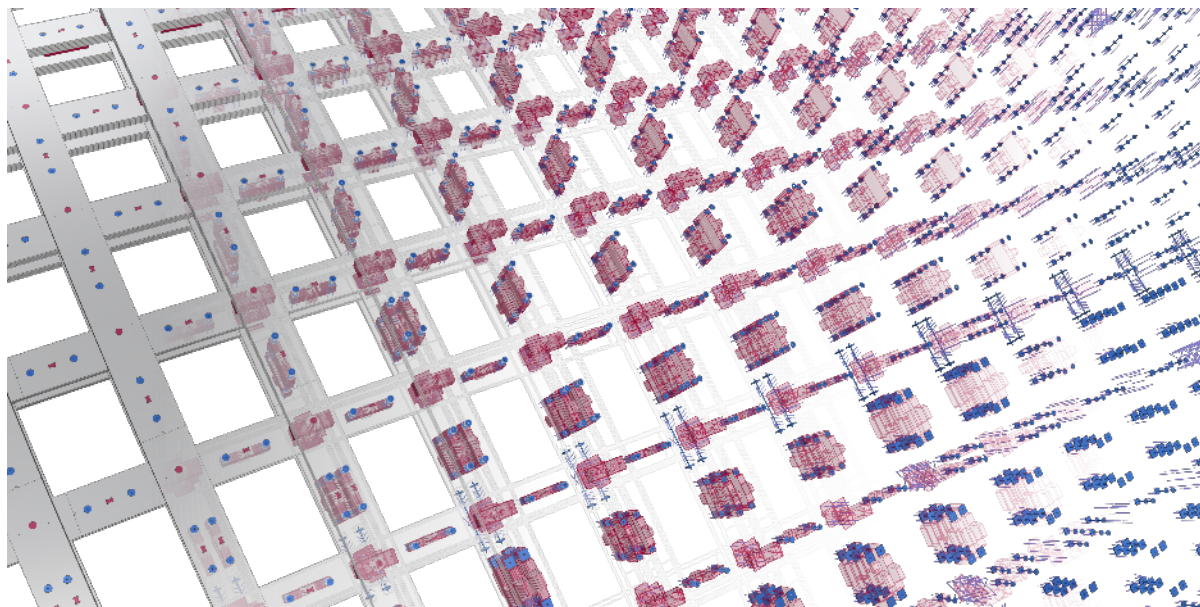


Abbildung 19: Ausschnitt 3D der Gridshell mit allen Bauteilen und Verbindungsmitteln (auf Basis des 3D-Modells von Design-to-Production GmbH)

9. Montage

Für die Montage wurde die gesamte Baustelle mit einem Zelt überbaut, um wetterunabhängig den engen Zeitplan einhalten zu können. Nach der Montage des Domes im Juni und Juli 2022 erfolgte die Montage des Dachs angefangen mit Stützen, über Randträger und dann der Gridshell. Bei der Gridshell wurde mit dem Input von Blumer-Lehmann AG entschieden, die Lamellen der Lage A miteinander zu verleimen, um eine exakte Schablone für die Dachgeometrie und den weiteren Montageablauf zu haben.

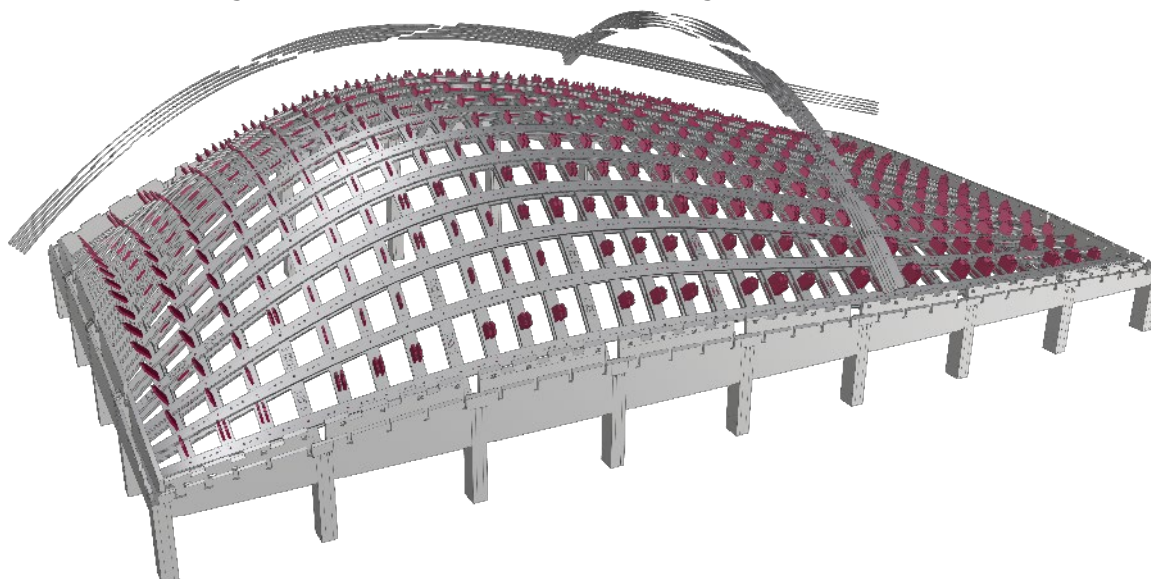
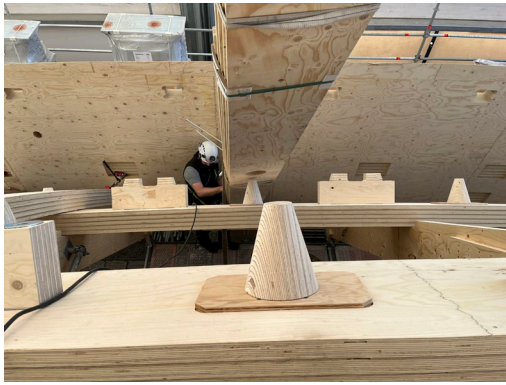


Abbildung 20: Schema Montage der Lamellen (auf Basis des 3D-Modells von Design-to-Production GmbH und Blumer-Lehmann AG)



Die Lamellen wurden sortiert, nummeriert und in der Montagerihenfolge gestapelt auf die Baustelle geliefert, damit keine Sortierung der vielzähligen Bauteile auf der Baustelle notwendig ist.

Während der gesamten Montagezeit wurde die Gridshell bis zum Zeitpunkt der Stützensvorspannung mit einem Lehrgerüst temporär unterstützt. Die Montage der Lamellen erfolgte lagenweise und paketweise, immer 5 Lamellen zusammen wurden in ihre Position gehoben, in ihre finale Form gebracht und befestigt.

Abbildung 21: Einfahren eines Lamellenpakets der Lage B in den Randträger und auf die Kreuzdübel



Abbildung 22 und 23: Montage Lage B (links), Vorspannprozess Spannglieder der Stützen (rechts)

10. Zahlen und Fakten

- | | | |
|--|--|-------------------|
| – Bauherr: | Tekniska Museet | Stockholm (SE) |
| – Architekt: | Elding Oscarson | Stockholm (SE) |
| – Bauingenieur und Design Tragstruktur: | DIFK Dipl.- Ing. Florian Kosche AS | Oslo (NO) |
| – Hauptpartner und Materialsponsor: | Stora Enso | Stockholm (SE) |
| – Konzept Tragstruktur Dach und Dome: | Hermann Blumer, Création Holz | Herisau (CH) |
| – Holzbauingenieur Dach und Dome: | SJB Kempter Fitze AG | Frauenfeld (CH) |
| – Digitale Planung, Projektmanagement, Beratung Holzbau: | Design-to-Production GmbH | Erlenbach ZH (CH) |
| – Holzbauunternehmer: | Blumer-Lehmann AG | Gossau SG (CH) |
| – Statisches Modell: | 118'557 Knoten / 153'746 Stäbe | |
| – Dachfläche: | ca. 1'600 m ² | |
| – Fertigholzvolumen Dach: | ca. 490m ³ (FSH) | |
| – Fertigholzvolumen Dome: | ca. 265m ³ (BSP) | |
| – Raster Dach: | ca. 1'550mm | |
| – Stützenabmessungen: | 600 x 600mm, 600 x 800mm (FSH blockverleimt) | |
| – Bauzeit Tragkonstruktion: | Juni 2022 – Dezember 2022 | |
| – Eröffnung: | 06. Dezember 2023 | |