

Metropol Parasol Sevilla – ein neues Wahrzeichen für den Ingenieurholzbau

Seville's Metropol Parasol – a new landmark for
engineered wood construction

Metropol Parasol Sevilla – un nouveau phare
de l'ingénierie de la construction bois

Metropol Parasol Sevilla – un nuovo simbolo per
le opere di carpenteria in legno

Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid
Arup
Berlin, Deutschland



Dipl.-Ing. (FH) Marcus Fischer
Finnforest Merk GmbH
Aichach, Deutschland

Metropol Parasol Sevilla – ein neues Wahrzeichen für den Ingenieurholzbau

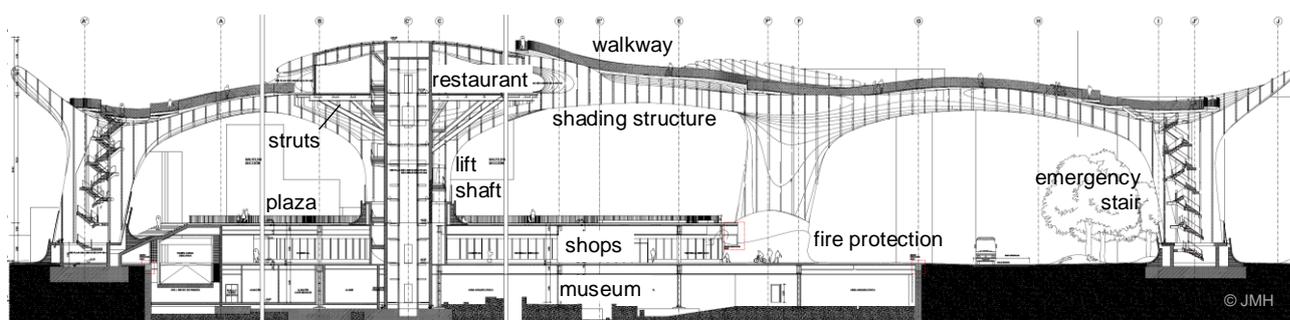


© JMH

Abbildung 1: Rendering der freigeformte Verschattungsstruktur aus Kerto-Q Furnierschichtholzplatten mit einer 2-3 mm dicken Polyurethan Beschichtung

1. Einführung

Die Planungen für die Neugestaltung des „Plaza de la Encarnación“ in der Altstadt von Sevilla begannen 2004 mit einem Wettbewerbsgewinn des Berliner Architekten Jürgen Mayer H. zusammen mit den Ingenieuren von Arup Berlin. Ziel war die Neugestaltung des Platzes und seiner Umgebung (Abbildung 2). Im Projekt zu integrieren war ein Museum für die unter dem Platz auf ca. -5,0 m stattfindenden Ausgrabungen römischer Mosaik, Verkaufsräume und Marktstände auf Straßenniveau und eine neue Platzgestaltung auf + 5,0 m (Abbildung 2).



© JMH

Abbildung 2: Längsschnitt durch die Parasol-Struktur

Den notwendigen Sonnenschutz für den neue Treffpunkt urbanen und touristischen Lebens liefert eine bis zu 28 m hohe hölzerne Verschattungskonstruktion. Ein integriertes Restaurant und Spazierwege ermöglichen die ungewöhnliche freigeformte Konstruktion hautnah zu erleben, zusammen mit dem Ausblick auf die denkmalgeschützte Altstadt von Sevilla. Die Holzkonstruktion, bestehend sechs ineinandergreifenden „Bäumen“ oder „Pilzen“, den sogenannten Parasoles (Abbildung 3), wird von Finnforest Merk ausgeführt und ist der architektonisch und tragwerkstechnisch auffälligste und innovativste Teil des Projekts.

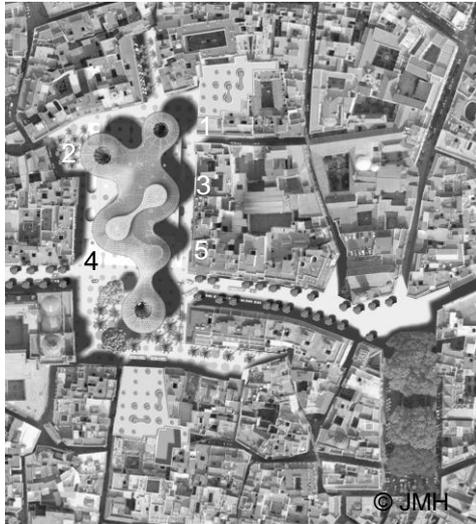


Abbildung 3: Draufsicht auf den Plaza de la Encarnación mit den 6 Parasoles

2. Konzept für das Gesamttragwerk

Entsprechend der unterschiedlichen architektonischen und strukturellen Anforderungen werden im Projekt verschiedene Tragwerksformen und Materialien verwendet und kombiniert (Abbildung 2). Für die Fundamente und die zylinderförmigen Aufzugstürme unter dem Aussichtsrestaurant wird Beton verwendet. Weitgespannte Stahlverbundträger und -decken überspannen den Museumsbereich. Eine Stahlverbundkonstruktion auf +21,50 m bildet auch die tragende Plattform für die Restaurantstruktur in Parasoles 3 und 4. Dieser Stahlverbundtisch wird durch unterschiedlich geneigte Druckstreben aus Stahlhohlprofilen gestützt, die dem Verlauf der außenliegenden Treppen folgen. Eine Besonderheit stellt der Anschluss dieser diagonalen Druckstreben an den 40 cm dicken Betonkern mit Hilfe einer besonders ausgeformten Zahnleiste dar. Diese ermöglicht eine gleichmäßige und damit besonders effiziente Lasteinleitung auf kleinstem Raum (Abbildung 4).

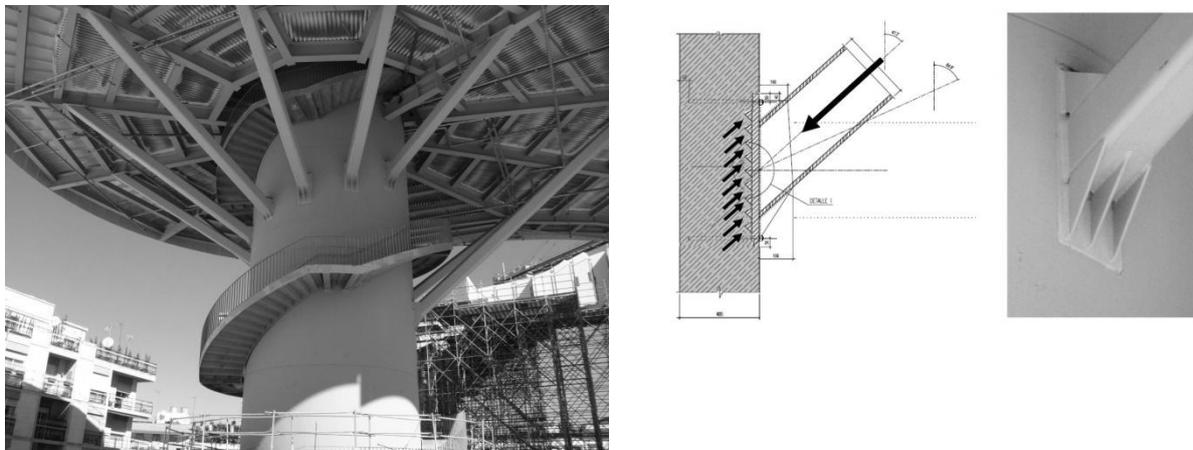


Abbildung 4: Anschluss der Druckdiagonalen mit Hilfe einer Zahnleiste

3. Das Holztragwerk der Parasoles

3.1. Die Entwicklung der Tragstruktur

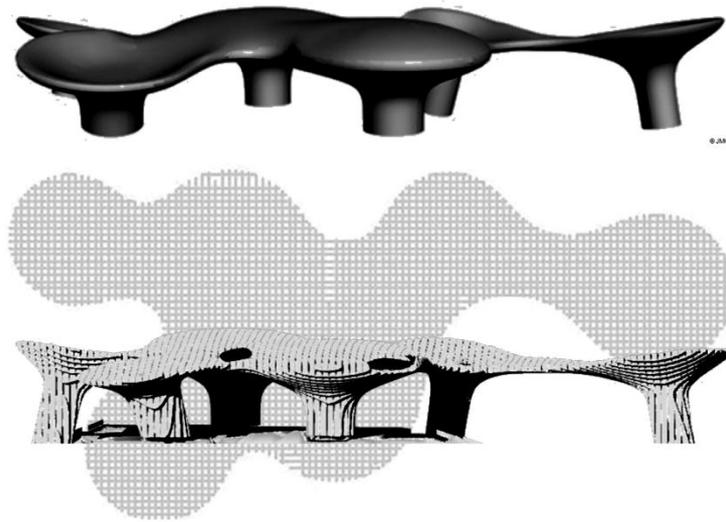


Abbildung 5: Entwicklung der Tragwerksgeometrie

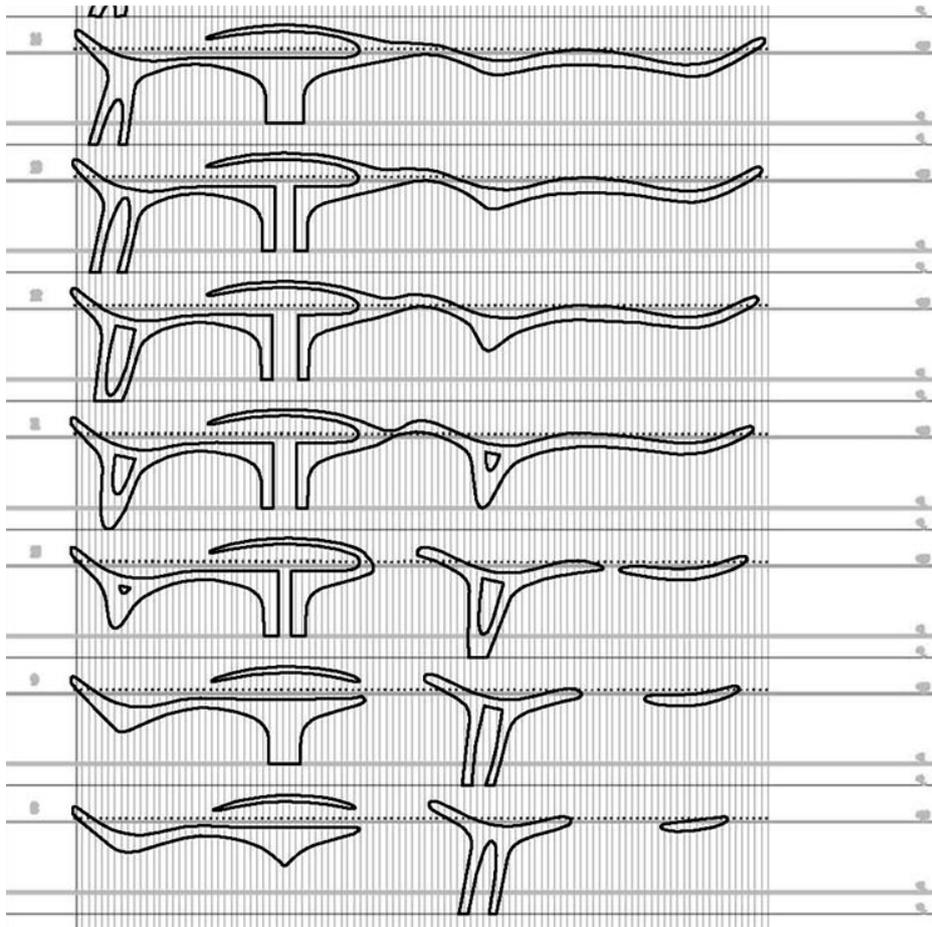


Abbildung 6: Schnittmuster der Holzelemente entsprechend dem Generierungsprozess

Ausgangspunkt der Gestaltung und damit zwangsläufig auch der Tragwerksgeometrie ist die Vorstellung des Architekten von einer baumartigen, freien Form der Verschattungs-konstruktion (Abbildung 5, oben). Daraus erhält man die Geometrie der Furnierschichtholz-Scheibenelemente, indem diese Freiform in einem 1,50 m x 1,50 m großen orthogonalen

Raster vertikal durchgeschnitten wird. Die so gewonnenen Holzscheiben - ein Beispiel für das so gewonnene „Schnittmuster“ zeigt Abbildung 6 - werden zu dem Gesamttragwerk zusammengefügt (Abbildung 5, unten). Da die Verschattungsstruktur keinen geschlossenen Witterungsschutz oder eine durchgehende Abdeckung erhält, sondern oben offen und frei der Witterung ausgesetzt ist, sind zusätzliche Stahldiagonalen notwendig, um die Holzstruktur auszusteiern. Die Diagonalen sind möglichst unauffällig vor allem unter den Aussichtswegen angeordnet (Abbildung 7). Die sich ergebende Tragwirkung der Parasoles entspricht demnach der einer Gitternetzschale mit sehr hoher Biegesteifigkeit.

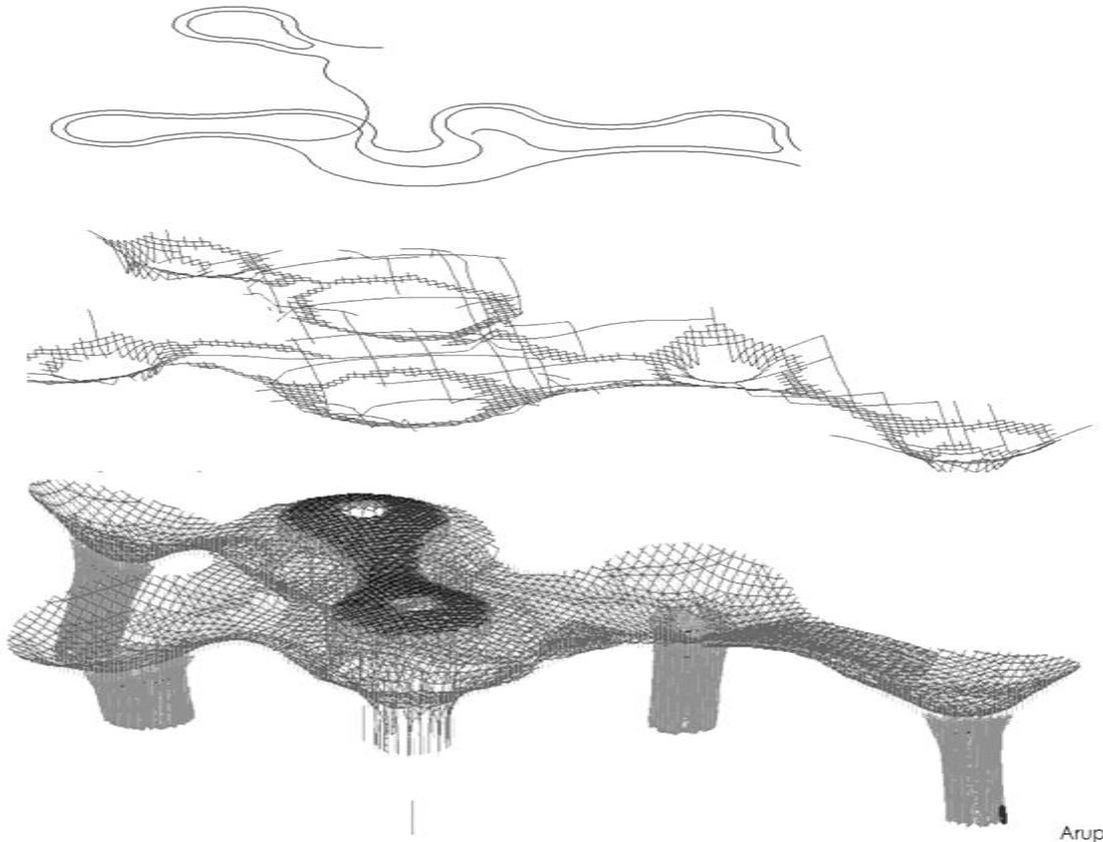


Abbildung 7: FE-Rechenmodell mit Auszug der Stahldiagonalen und der Aussichtswege

Mit Hilfe der Ergebnisse aus einer ersten Berechnung des Gesamttragwerks passen die Tragwerksplaner in Abstimmung mit den Architekten die Höhen der Holzscheiben an die Belastung im Tragwerk an.

Weitere Berechnungen der Parasolstruktur müssen iterativ durchgeführt werden, wobei in jedem Iterationsschritt an jedem Knotenpunkt neu der jeweils erforderliche Verbindungstyp bestimmt wird und mit seinem Gewicht und seiner Tragfähigkeiten im FE-Modell des Tragwerksplaners neu generiert wird. Die unterschiedlichen Verbindungstypen mit ihrem jeweiligen Eigengewicht und ihrer Tragfähigkeit sind in Abhängigkeit von den anzuschließenden Holzstärken und -höhen und der veränderlichen Neigungen der Holzfasern in einer großen Matrix festgelegt. Sie bilden einen interaktiven Baustein der Tragwerksanalyse, mit der die endgültigen Holzstärken und Verbindungstypen iterativ ermittelt werden.

3.2. Das Tragwerk

Die Abmessungen der Holzstämmen sind unterschiedlich, mit einem maximalen Durchmesser von 15 m. Die Stämme werden aus verleimten Kerto-Q Platten mit einer Mindestdicke von 140 mm gefertigt (Abbildung 8). Die Stämme sind im Innern hohl um Platz für die Stahlkonstruktion der Fluchttreppen zu schaffen. Sie sind alle unterschiedlich geneigt mit Ausnahme der Stämme 3 und 4. Diese haben einen Stahlbetonkern mit 6 m Durchmesser der das Restaurant trägt und die Fahrstuhlchächte beinhaltet. Der Innenraum des Restaurants ist nur vernünftig nutzbar wenn er frei von jeglicher Tragstruktur bleibt. Deshalb und um gleichzeitig das Problem des Brandschutzes zu vereinfachen, wird

dieser Bereich von einer Stahlbetonverbundplattform getragen. Die Holzkonstruktion unter dem Restaurant ist folglich nur angehängt und nicht tragend.

Die einzelnen Trägerlängen werden von Finnforest Merk in Abhängigkeit von der Krümmung der Elemente, der Faserneigung der Elemente, die sich nicht mehr als 7° ändern sollte und den Randbedingungen aus der Tragwerksplanung festgelegt. Die Elemente sind zwischen 1,50 m und 16,5 m lang und haben Breiten zwischen 68 mm und 311 mm. Die Höhe der Schirm-Elemente erreicht maximal etwa 3,0 m, das größte Bauteil befindet sich im Stamm und misst 16,5 x 3,5 x 0,14 m. Die rund 3400 Elemente mit einem Gesamtvolumen von ca. 3500 m³ werden bei Finnforest Merk in Aichach gefertigt.



Abbildung 8: Stamm im Bau

3.3. Die Verbindungen



Abbildung 8: Draufsicht auf Parasole 2, noch ohne Gehwege

Das Anschlussprinzip der mehr als 3000 Verbindungsknoten wird von Arup zusammen mit Finnforest Merk entwickelt. Die Parameter für die Konzeption lauten:

- Montagefreundlichkeit
- Hohe Belastbarkeit
- Keine Überstehenden Stahlteile (Transportfreundlichkeit)
- Toleranzausgleich in 3 Richtungen möglich

Die einzelnen Knoten werden im Zuge der Detailplanung von Finnforest Merk vorbemessen und nach der Festlegung der Festigkeitsparameter in Anschlussstypen katalogisiert. Die Bauwerksform und das vorgegebene Gesamtgewicht der Konstruktion stellen dabei die Grenzen dar. Jeder Knoten wird für die extremalen Schnittgrößen aus den unterschiedlichen Lastfällen bemessen, plus einem zusätzlichen Vorhaltemaß für unerwünschte Lastumlagerungen von 20%. Um bei der unüberschaulichen Vielzahl an Lastfallkombinationen den Überblick zu bewahren, werden die Lasten vereinfacht mit einem einheitlichen Teilsicherheitsbeiwert von 1,5 überlagert. Diese Vereinfachung auf der sicheren Seite ergibt eine kleine zusätzliche Reserve von maximal 5-7%. Dank des konstruktiven Holzschutzes durch die 2-3 mm dicke Polyurethanbeschichtung (s.u.) kann für die Holzbaubemessung die Nutzungsklasse II angesetzt werden. Der Nachweis der Extremschnittgrößen erfolgt mit der Lasteinwirkungsdauer „mittel“.



Abbildung 9: Der standardisierte Knoten für den Normalkraft- und Momentenanschluss ist in 15 Grundtypen unterteilt und wird je nach Bauteilgröße in 450 verschiedenen Größen verwendet.

Entsprechend dem Generierungsprozess der Tragwerksgeometrie sind alle Knotenpunkte im Grundriss rechteckig. In der Ansicht weisen jedoch alle Verbindungen unterschiedliche Neigungen auf. Die Momentenverbindung an der Ober- und Unterseite des Elements basiert auf einer speziellen standardisierten Gabelkopfverbindung. Diese kann auf der Baustelle schnell durch einen Bolzen stahlbaumäßig geschlossen werden. Die Laschen sind über eine Verzahnung mit 3,5 mm Steigung und vorgespannten HV-Schrauben Typ 10.9 am Flansch angeschlossen. Die hohen Anschlusskräfte zwischen Stahlverbindungs- teil und Holz werden mit eingeleimten Gewindestangen ins Holz eingeleitet. Der Querkraftanschluss wird an jedem Knoten individuell dimensioniert. Stahlwinkel zur Übertragung der Querkraft und zum Anschluss der Auskreuzungen werden nachträglich vor Ort an die Holzplatten genagelt und können so die Bautoleranzen problemlos ausgleichen.

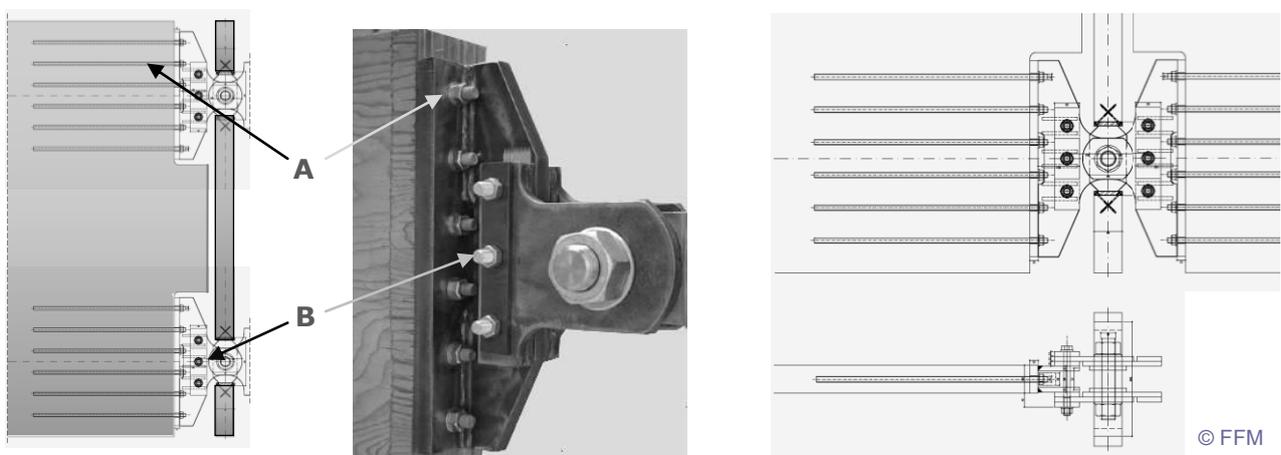


Abbildung 10: Prinzipskizze des Momentenanschlusses mit eingeleimten Gewindestangen (A) und vorgespannten Schrauben (B)

3.4. Innovative Temperierung eingeklebter Gewindestangen

Die deutsche Normung schreibt für Klebstoffe, die zum Einkleben von Gewindestangen verwendet werden, eine Zulassung bis zu einer Klebstofftemperatur von 60° C vor. Die von Arup durchgeführten thermischen Simulationen zeigen jedoch, dass in Sevilla, mit sommerlichen Maximaltemperaturen deutlich über 40° C, im Innern der Holzstruktur durchaus 60° C oder etwas mehr erreicht werden können (Abbildung 11). Dieser Wert schwankt stark in Abhängigkeit von der gleichzeitig angesetzten Windbewegung und wird auch vom WKI-Institut in einer Nachrechnung bestätigt. Damit wäre ein Tragwerksversagen zwar auszuschließen aber das Sicherheitsniveau u.U. etwas reduziert. So wird von FFM der Vorschlag von Arup aufgegriffen, die Glasübergangstemperatur des Epoxid-Harzes durch eine sogenannte Temperierung des Epoxid-Harzes zu erhöhen: Durch ein kontrolliertes, nachträgliches Erwärmen des Bauteils auf über 70° C, inklusive der unter normalen Werkstattbedingungen eingeklebten Zugstangen, gelingt es, die Glasübergangstemperatur sicher und kontrolliert auf über 70° C zu steigern (s.u.).

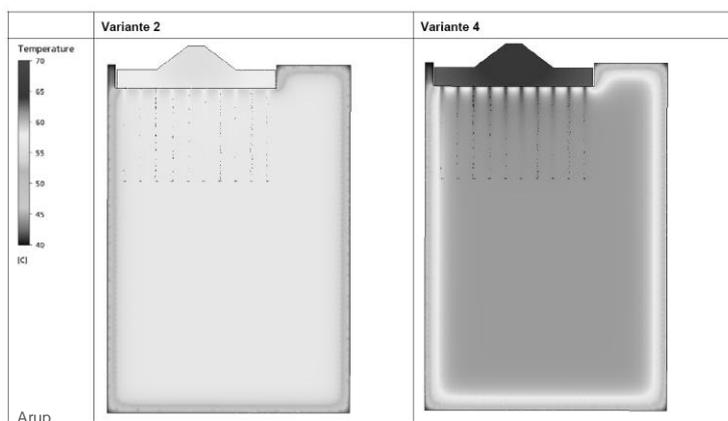


Abbildung 11: Temperatursimulation an 68 mm dicken Kerto-Q-Platten

3.5. Neuartiger Holzschutz mit Polyurethan-Spritzbeschichtung



Abbildung 12: PUR-2K-Beschichtung: Details und Stammdetail

Die Holzstruktur ist der Witterung mit Regen, Wind und Sonne ungeschützt ausgesetzt. Zum konstruktiven Holzschutz werden die imprägnierten Furnierschichthölzer mit einer 2-3 mm dicken Polyurethan-2K-Spritzbeschichtung versehen. Dank seines ausgeprägten

Dehnungsvermögens und der sehr guten Haftung auf Holzuntergründen kann die Beschichtung mögliche Risse an Fugen und im Holz sehr gut überbrücken. Die 3 mm dicke PUR-Beschichtung ist ausreichend wasserdampfdurchlässig. Mit einem s_d -Wert von ca. 1,8 m hat sie etwa die gleiche Durchlässigkeit von Wasserdampf wie 36 mm Vollholz oder 12 mm Furnierschichtholz. Zusammen mit dem leicht beige Deckanstrich, der gleichzeitig als UV-Schutz dient, verleiht die Beschichtung dem Holz eine ganz neue Oberflächenqualität. Gleichzeitig entstehen durch die Kombination von PUR mit Holz ganz neue Möglichkeiten der Detaillierung von Holzkonstruktionen.

3.6. Integrale Planung und Herstellung

Das Team aus Architekten, Tragwerksplanern, Haustechnikern und Brandschutzspezialisten beginnt seine Zusammenarbeit schon in der frühesten Entwurfsphase. Die von den Architekten im virtuellen 3D-Modell vorgeschlagene Geometrie wird direkt von den Ingenieuren verarbeitet und an die Ergebnisse der Berechnungen angepasst. Die Daten der Architekten und Ingenieure wird dann elektronisch an den Holzbauer weitergegeben, der sie für die Detailnachweise weiterverarbeitet und zur Steuerung seiner Fertigungsanlage benutzt.

4. Die Herstellung

4.1. Materialwahl Kerto-Furnierschichtholz

Kerto ist aus (3 mm dicken) Schäl furnierschichten aufgebaut. Bei Kerto-Q sind einige Furnierlagen um 90 Grad gedreht für flächige Anwendungen und aussteifende Aufgaben. Kerto zeichnet sich durch eine hohe Biegefestigkeit in Faserrichtung aus, da Schwachstellen im Holzaufbau durch die Lagenverleimung großflächig verteilt sind. Der Absperreffekt bei Kerto-Q macht den Plattenwerkstoff auch bei Feuchtebeanspruchung relativ formstabil, was ihn für den Einsatz im Außenbereich begünstigt.

Parasole-Bauteile mit Querschnitten von bis zu 68 x 3000 mm erfordern eine hohe Dimensionsstabilität des Holzwerkstoffes. Die Quernurnierlagen „armieren“ den Querschnitt, Quellen und Schwinden werden minimiert. Als zusätzliche Vorsichtsmaßnahme gegen Feuchtenester bei einer etwaigen Verletzung der PUR-Beschichtung sind die Platten kesseldruckimprägniert und somit vor Feuchteschäden und Termitenbefall geschützt.

Mit Einsatz des Furnierschichtholzes sind die gewählten Anschnittwinkel der Bauteile, die Lage der Aussparungen und verkleinerte Randabstände realisierbar geworden. Die Geometrie der mittels Vakuumverfahren mehrfach verklebten Querschnitte liegt außerhalb der in der BAZ Z-9.1-100 geregelten Werte. Ein spezielles Gutachten regelt deren Bemessung mit entsprechend reduzierten rechnerischen Festigkeiten.

4.2. Fertigungsablauf

Parallel zur CAD Planung läuft die Fladenverleimung der kesseldruckimprägnierten Kerto-Q Rohplatten im Vakuumverfahren. Nach Freigabe werden die Bauteile gleicher Dicke in den Platten verschachtelt, mit einem CNC gesteuerten Abbundroboter millimetergenau ausgeschnitten und dabei mit Fräsungen und Aussparungen versehen. Die 65-70 cm tiefen Längsbohrungen für die Gewindestangen werden manuell erstellt.

Für das Tempern der eingeklebten Gewindestangen werden die Bauteile in der Trockenkammer erhitzt. Ab einer gemessenen Temperatur von 70°C in der Klebefuge beginnt die Temperzeit von 3 Stunden. Der Gesamtvorgang mit Aufheizen und Abkühlen nimmt etwa 2-3 Tage in Anspruch.

An die Gewindestangen können nun die Stahlflansche angeschraubt werden, die Gegenteile in Form der sog. Kästen werden in die Aussparungen eingebaut (s. Abbildung 10).

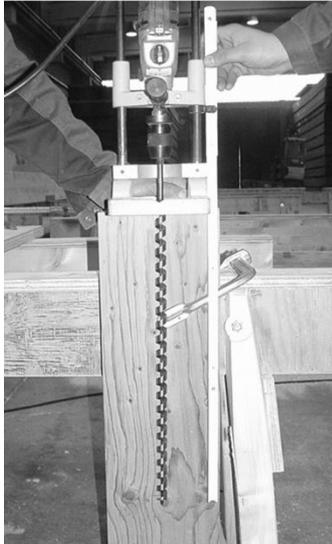


Abbildung 13: Stirnseitige Längsbohrung für eingeleimte Gewindestangen.

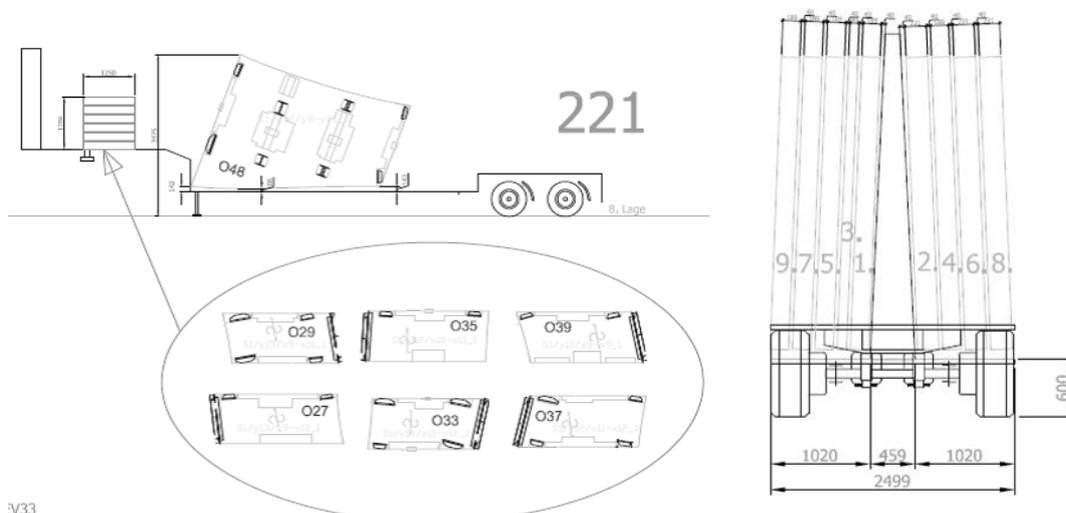
4.3. Qualitätssicherung

Versuche, Prüfungen und Gutachten ziehen sich wie ein roter Faden durch die Entwicklung und Umsetzung dieses komplexen Holzbauprojektes: Welchen Einfluss haben die hochwertige KTL-Korrosionsschutzbeschichtung und die UV-beständige Pulverbeschichtung der Stahleile auf die Verbindung der Knoten? Entspricht die aus 3D FEM Berechnung ermittelte Kraftverteilung im Paket von 24 Gewindestangen der Tatsächlichen? Wird die erforderliche Festigkeit des Stahlteiles erreicht? Wie stark müssen dazu die Anschlussschrauben vorgespannt werden? Werden alle 3400 Bauteile unter gleichen Bedingungen hergestellt, imprägniert, rückgetrocknet? Sind alle Teile passgenau, sauber und gekennzeichnet? Entsprechen Holzfeuchte, Luftfeuchte, Hallentemperatur und Aushärtezeit den Vorgaben für die Verleimung? Erfüllen die zugelieferten Stahlteile die gewünschten Anforderungen?

Eine detaillierte Datenerfassung und zahlreiche Prüfungen sichern das hohe Niveau aller Arbeiten. Teils sind die Qualitätsprüfungen Standardanforderungen der Produktionsstätten, teils speziell für die Verfahren dieses Projektes entwickelt. Die permanente Qualitätssicherung pro Bauteil, Paket oder Lieferung wird durch regelmäßige externe Kontrollen durch Materialprüfanstalten oder Technische Büros ergänzt.

5. Die Montage

5.1. Logistik



:V33

Abbildung 14: Ausschnitt aus einem Beladeplan für einen liegenden und stehenden Transport

Die Vielzahl der Bauteile wird ab Werk Aichach in drei verschiedenen Transportarten nach Sevilla gebracht: ca. 50 der 100 LKW-Ladungen entsprechen den Standardmaßen, die andere Hälfte ist mit Überbreite oder Überhöhe ein Sondertransport. In einem Zwischenlager in Sevilla werden die Elemente mit Polyurethan beschichtet und können von dort wöchentlich auf die Baustelle abgerufen werden, da dort die Platzverhältnisse keine Lagerung zulassen.

5.2. Montage

Zunächst werden die Türme montiert bis zur stählernen Trennfuge zwischen Stamm und Schirmen. Dieser Stahlanschluss wird auf der Baustelle verschweißt. Es erfolgt der Aufbau des Gerüsts für die Schirmmontage. Hierzu hat der Gerüstplaner eine 3D-Kontur der Parasoles erstellt und kann passgenaue Plattform- oder Turmgerüste montieren. Die Turmgerüste sind 70 x 70 cm groß und erlauben die Montage der Tragelemente im Bereich über den Türmen. Sie dienen als Innengerüst, an dem die Holzbauteile fixiert werden können, bis sie eingemessen und verschweisst sind. Für die Montage der freien Teile der Schirmkappen werden Plattformgerüste erstellt.

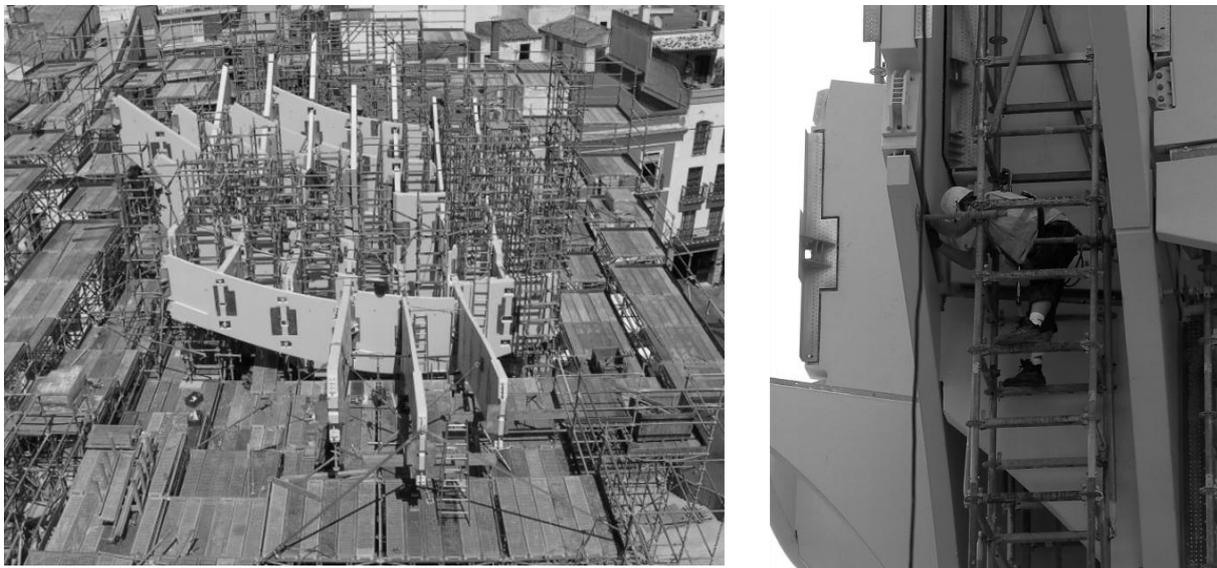


Abbildung 15: Blick auf Plattform- und Turmgerüste (li). Arbeiter im 70 x70 cm-Turmgerüst (re)

Finnforest Merk entwickelte ein Einmesskonzept, mit dem ein örtlicher Vermessungsingenieur jedes durchlaufende Bauteil einmisst. Als Referenzpunkte dienen Fixpunkte an den Bestandsgebäuden der Umgebung, sowie eine Einmessmarke auf dem Dach des aus Beton erstellten Turmes des Cafés. Die Messpunkte dienen später auch zur Kontrolle etwaiger Verformungen der Konstruktion.

Die Bauteile werden auf dem Boden vorbereitet und provisorisch fixiert. In der Höhe werden sie dann am Einbauort justiert und endgültig befestigt. Pro Tag werden von den 4-5 Montageteams unter der Leitung von rund 30 Finnforest Merk Mitarbeitern je 3 Elemente über den Türmen oder bis zu 12 Elemente ausserhalb der Türme montiert. Die Arbeiten dauern ein Jahr und finden zum Teil auch nachts statt. Die besonderen Herausforderungen bestehen aus Sicherheitsaspekten - so wird z.T. freischwebend angesieilt und ohne festen Boden gearbeitet - und aus den klimatischen Bedingungen der spanischen Stadt mit Temperaturen bis zu 45°C.



Abbildung 16: Monteure in Spezialkörben unter spanischer Sonne.

5.3. Qualitätssicherung

Auf der Baustelle spielt die gleichmäßige Vorspannung der Verbindungsschrauben eine wichtige Rolle. Bei der Belastung der Knoten durch das Entlasten der Montagegerüste ist eine Verformungskontrolle der Verzahnung und sorgfältiges Arbeiten erforderlich. Die Bautoleranzen liegen bei ± 1 cm und einer 3 cm Luftfuge zwischen den Bauteilen im Kreuzungspunkt. Die aufnehmbaren Bautoleranzen am Momentenanschluss liegen bei ± 7 mm pro Lasche.

Metropol Parasol - Technik in Zahlen

- 3.500 m³ Kerto-Furnierschichtholz
- 3.400 verschiedene Bauteile
- 700 t Stahl
- Kleinstes Anschlussstück 2,88 kg
Kapazitäten: $N_{Rd} = \{-131,0 \text{ kN (Druck); } 85,4 \text{ kN (Zug)}\}$
- Größtes Anschlussstück 69,13 kg
Kapazitäten: $N_{Rd} = \{-1363 \text{ kN (Druck); } 1251 \text{ kN (Zug)}\}$
- ca. 11.000 Momentenanschluss-Stahlteile
- ca. 22.000 Laschen
- ca. 5.500 Kästen
- ca. 12.000 Querkraftwinkel
- ca. 2.000 Diagonalen
- 16 horizontale Abspannungen mit Tellerfederpaketen um die Café-Plattform umlaufend
- 89 vertikale Abhängungen unter der Café-Plattform (Stahlverbundstruktur)



Abbildung 17: Blick über die Baustelle des Metropol Parasol und die Altstadt von Sevilla

6. Zusammenfassung

Metropol Parasol ist ein multifunktionales Projekt, das den vormals ungenutzten Plaza de la Encarnación in einen einmaligen, unverwechselbaren Platz voller städtischem und touristischem Leben verwandelt. Gleichzeitig ist es ein architektonisches und ingenieures Ausrufezeichen, das die Möglichkeiten des modernen Holzbaus prominent und öffentlichkeitswirksam verdeutlicht. Dieses ungewöhnliche Projekt gibt Anlass für einige Innovationen im Ingenieurholzbau:

Die neuartige, tragende Verwendung von Furnierschichtholzplatten in weitgespannten und freigeformten Konstruktionen, die erstmalige planmäßige Verwendung der Temperierung von Epoxid-Klebstoffen für Verbindungen im Holzbau und die großmaßstäbliche, gestalterische und konstruktive Ausnutzung der Möglichkeiten einer 2-3 mm dicken Polyurethan-Spritzbeschichtungen auf Holztragwerken. Im Projekt Metropol Parasol entsteht daraus eine neue architektonische Formensprache und Art des ingenieures Konstruierens mit Holz.

Am Bau Beteiligte

Bauherr:	Stadt Sevilla
Generalunternehmer:	Sacyr Vallehermoso
Architekt:	Jürgen Mayer H., Berlin
Ingenieur:	Arup, Berlin, Madrid
Holzbau:	Finnforest Merk, Aichach