Leuchtendes Vorbild

Das neue Stadion von Nizza, die «Allianz Riviera», ist in vielerlei Hinsicht einzigartig. Es gilt als das Bauwerk mit der grössten Holz-Stahl-Gitterkonstruktion, die je in einer solchen Geometrie gebaut wurde. Das darin verbaute Holz brachte ein Plus in Sachen Nachhaltigkeit und ein Minus an Gewicht.

Das neue Multifunktionsstadion in Nizza präsentiert sich als transparentes Bauwerk. Der hochgezogene Rand der umhüllenden Konstruktion im Süd- und Nordbereich des Stadions wirkt wie der Saum eines Rocks, den der Wind anhebt. Er überdacht die Eingangsbereiche.

Foto: «Allianz Riviera» – Milène Servelle

Seit September 2013 hat die Stadt Nizza eine Attraktion mehr: Das neue Multifunktionsstadion «Allianz Riviera». Es liegt rund zehn Kilometer vom Stadtzentrum und etwa fünf Kilometer vom internationalen Flughafen entfernt. Hauptnutzer ist der Fussballverein OGC Nizza. 2016 wird das Stadion einer der Austragungsorte der Fussball-Europameisterschaft sein. Es gehört zu einer Familie von neun Stadien, die 2016 in Frankreich für die EM gebraucht werden.

Zwischen Entwurf und baubarer Konstruktion liegt ein Jahr Arbeit

Die Arena ist für 35 000 Zuschauer ausgelegt. Sie ist das erste Objekt des Raum- und Stadterschliessungsprojekts «Éco-Vallée Plaine du Var». Das Plusenergie-Stadion gilt als Vorzeigeobjekt in Sachen Nachhaltigkeit. Umweltbelange standen von Anfang an im Mittelpunkt der Planung. Nach einem eingeladenen Wettbewerb unter drei Generalunternehmen, die jeweils mit einem Architektur- und einem Ingenieurbüro im Team angetreten sind, beauftragte die Stadt Nizza 2009 das Siegerteam Vinci Concessions zusammen mit dem Pariser Architekturbüro Wilmotte & Associés und dem Ingenieurbüro «Iosis et Egis Bâtiment» mit dem Bau. Hierfür erhielten sie als Entwurfs- und Planungsvorgabe ein Pflichtenheft zu Nachhaltigkeitsaspekten. Das Stadion musste ausserdem innerhalb von zwei Jahren fertiggestellt sein. Die Idee einer organisch geschwungenen Konstruktion, die einerseits das Spielfeld luftig umschliesst, andererseits die Hügelketten beidseits vom Var-Tal in seiner Form aufnimmt – die Dachfläche sollte korrespondierende Wölbungen erhalten – war bald geboren. Doch es dauerte noch fast ein Jahr, bis sie in eine baufähige Konstruktion

Die Visualisierung kommt der Wirklichkeit sehr nahe: Kreativer Wagemut kennzeichnet die netzartige Struktur des Entwurfs aus der Feder des Architekten Jean-Michel Wilmotte.

Foto: Wilmotte & Associés

übersetzt war. Dank 3-D-CAD-Programmen liess sich die umschliessende Konstruktion, bei der die Architekten von Anfang an an eine netzartige Hülle dachten, relativ einfach generieren. Doch die eigentliche Arbeit begann erst danach: In den verschiedenen Schritten der Entwurfsplanung waren die konstruktiven Überlegungen mit den geometrischen Anforderungen nach und nach so in Einklang zu bringen, dass nach mathematischen Grundsätzen eine Reihe gleicher Bauelemente in einer geordneten Gesamtstruktur entwickelt werden konnten. Die enge Zusammenarbeit der Architekten, der Tragwerksplaner und des Bauunternehmens sowie der ständige Austausch untereinander führten Schritt für Schritt zur baubaren Lösung.

Finanziert durch öffentlich-private Partnerschaft

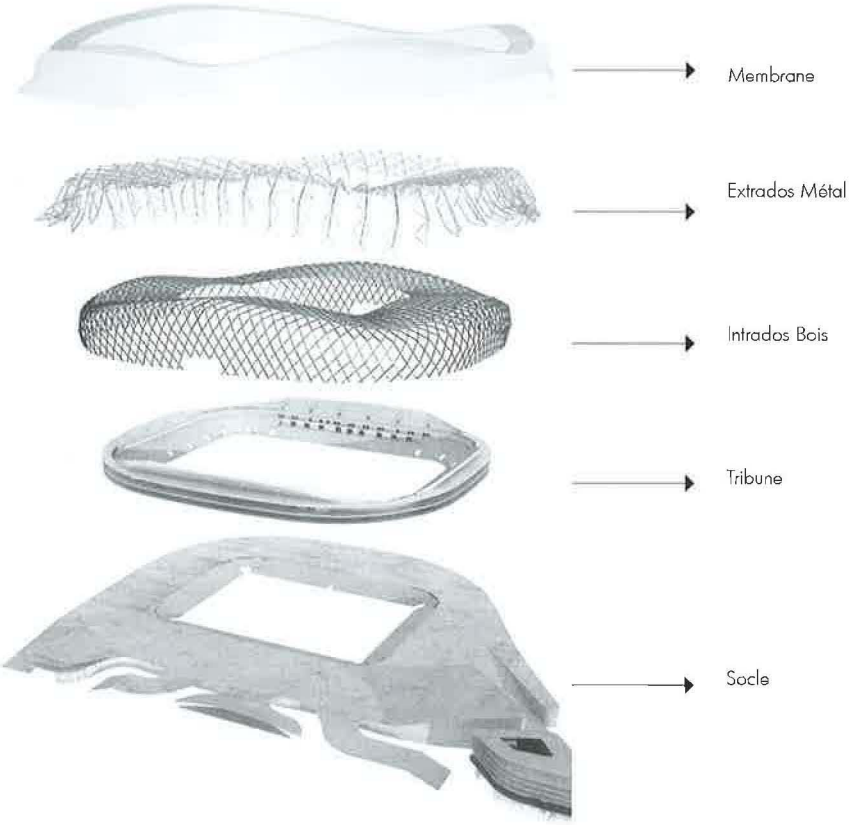
Im Oktober 2010 präsentierte Nizzas Bürgermeister Christian Estrosi der Öffentlichkeit erstmals die Pläne für das Stadion. Finanziert von einer öffentlich-privaten Partnerschaft (Private-Public-Partnership, PPP-Modell) kostete die «Allianz Riviera» die private Investorengruppe Nice Éco Stadium (NES) sowie Errichter und Betreiber 243,5 Millionen Euro. 69 Millionen Euro stammen von Zuschüssen für die Kommunen.

Holz für mehr Leichtigkeit und Nachhaltigkeit

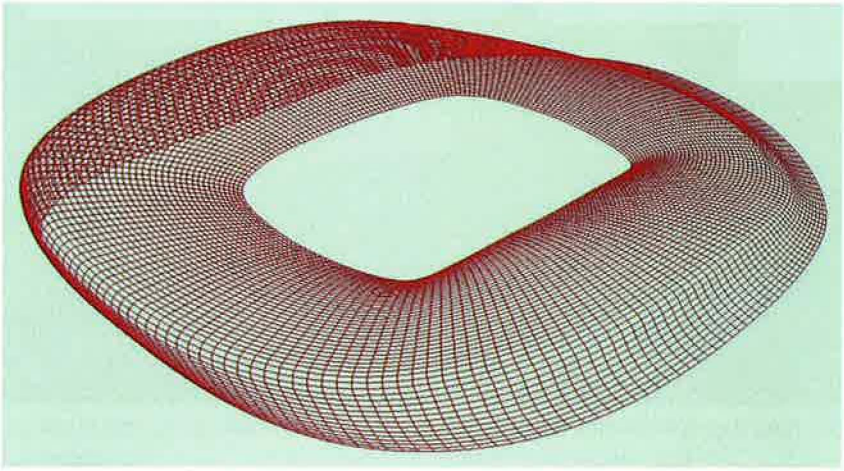
Der Vorschlag aus dem Planungsteam, für das Tragwerk auch Holz zu verwenden, erschien den Architekten nicht gleich als die beste Wahl, überzeugte sie schliesslich aber doch. Denn der nachwachsende Baustoff bot drei entscheidende Vorteile: Seine Nachhaltigkeit, Stichwort «Reduzierung des CO_2-Fussabdrucks», die hohe Druckfestigkeit im Verhältnis zum Eigengewicht und die Verringerung des Eigengewichts des Gesamttragwerks, was sich positiv auf die zu berücksichtigende Erdbebensicherheit des Bauwerks auswirkt – denn Nizza liegt in einer Erdbebenzone.

Klarer Aufbau mit Transparenz und Energieerzeugung

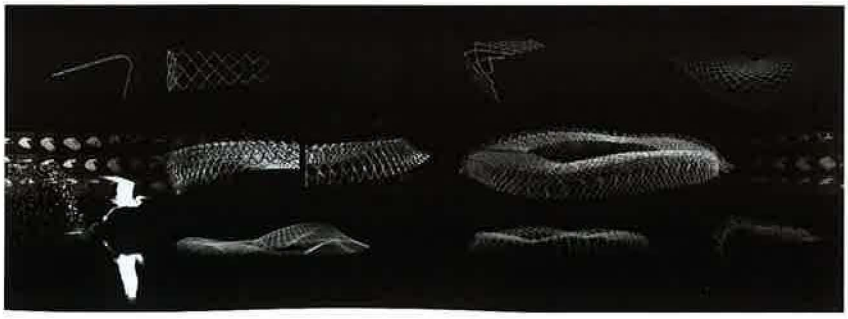
Die Planer entwickelten ein Konzept aus Sockelbau, Tribüne und einer netzartigen Dachkonstruktion aus zwei Ebenen – einem Holzgitter und einem räumlichen Stahlfachwerk –, überspannt mit einer Membran.



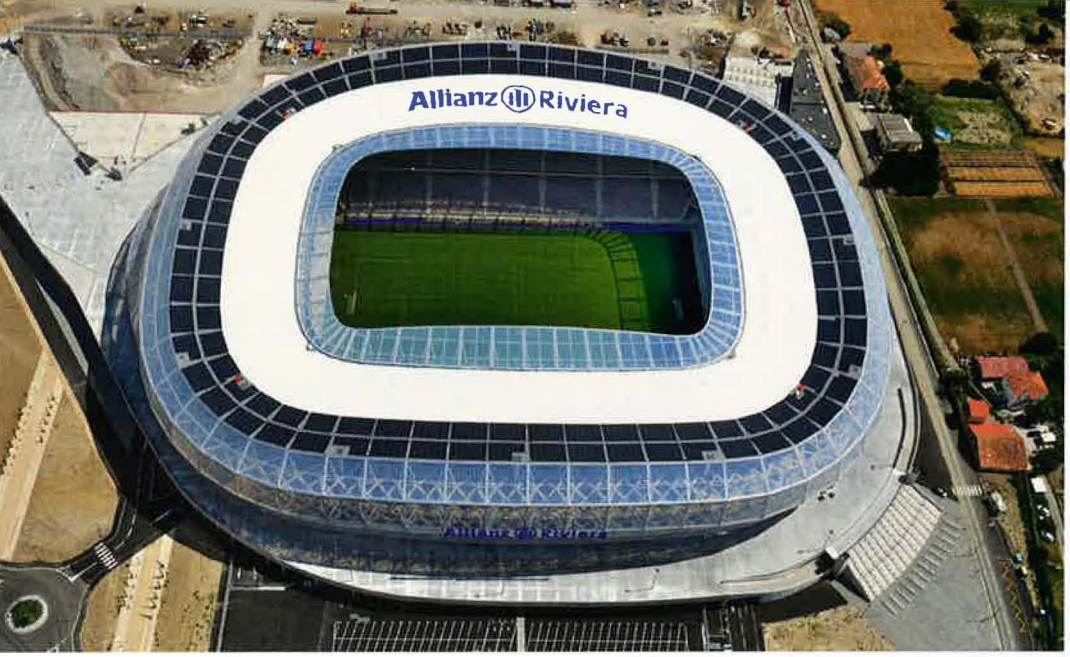
Explosionszeichnung der baulichen Ebenen. *Foto: Wilmotte & Associés*



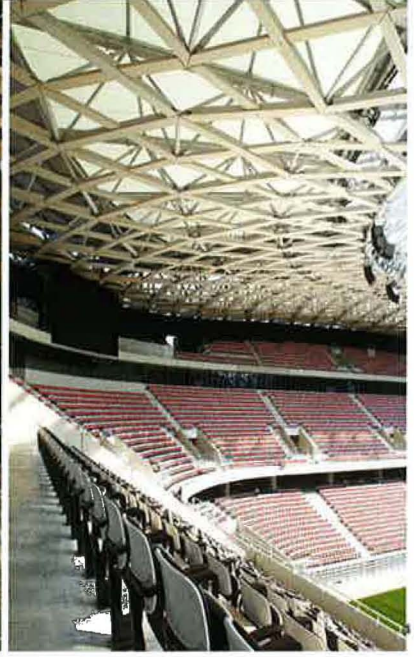
Dass die Stadionumhüllung eine leichte, netzartige Struktur werden sollte, war den Architekten früh klar. *Foto: Wilmotte & Associés*



Entwurfsstudien mit Analogien zur Natur wie Vogelschwingen, da das Emblem des Fussballclubs der Adler ist. *Foto: Wilmotte & Associés*



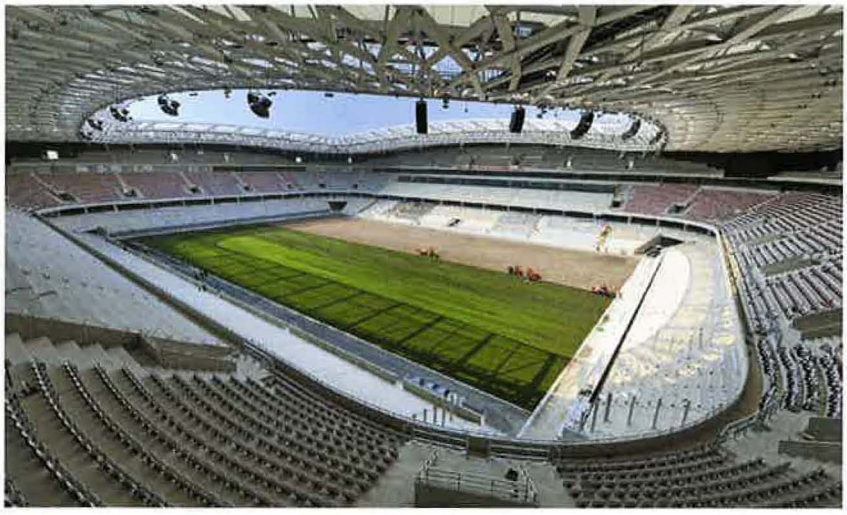
Photovoltaik, PVC- und ETFE-Folien bieten gezielt Stromerzeugung, Schatten und Durchblick. Fotos: «Allianz Riviera»



Die PVC-Folie auf dem über die Tribünen auskragende Holz-Stahl-«Gewölbe» spendet den Zuschauern Schatten.

In den Sockelbau aus Stahlbeton ist die dreirangige Tribüne eingebettet, und das Ganze mit dem auskragenden Holz-Stahl-«Gewölbe» überdacht. Als Abdeckung fungiert eine Membran.

Im senkrechten Bereich kam eine transparente ETFE-Folie (Ethylen-Tetrafluorethylen) zum Einsatz, die den Charakter des Dachtragwerks durchscheinen lässt, aber auch den Einfall von (Sonnen-) Licht erlaubt. Im waagrechten auskragenden Dachbereich dagegen wählten die Planer eine weisse PVC-Folie als Aussenhaut. Bei Sonne spendet sie den Zuschauern darunter Schatten. Rundherum verlegte 8500 Quadratmeter Photovoltaikpaneele sorgen für einen Teil des benötigten Stroms. Technik und Material des ökologisches Architekturprojekts erfüllen die Anforderungen des Performance-Standards Haute Qualité Environnementale (HQE).



Das Dachtragwerk nimmt die Wellenbewegung der Tribüne auf. Foto: VINCI – F. Vigouroux

Die blockverklebten Balken mit «Aussparung» setzen sich aus vier BS-Holz-Lamellen zusammen. Die parallel zur Balkenbreite eingeschlitzten Bleche für die Gelenkanschlüsse sind über Stabdübel in den mittleren beiden Lamellen verankert. Die ober- und unterseitigen Lamellen decken sie ab. Die Kernlamellen enden vor der «Aussparung». Foto: Fargeot LC

Die baubare Lösung

Weil das Stadion in einer Erdbebenzone der Kategorie 4 liegt, zielte der Entwurf auf ein leichtes und weiches Tragwerk ab, das im Erdbebenfall horizontale Kräfte abfangen kann. Heraus kam ein geschwungenes Dach aus 60 gewölbten Halbrahmen mit einem Innenbogen aus gekreuzten BS-Holz-Balken zur Aufnahme von Druckkräften und einem gekrümmten Bogenrücken aus Stahlrundrohr zur Aufnahme von Zugkräften. Kombiniert wurde die Konstruktion mit Stahlrohren, die in ihrer Anordnung Pyramiden umschreiben und den Bogenrücken mit den gekreuzten Holzbalken als räumliches Fachwerk zusammenspannen. In Ebene des Holzgitters bilden je zwei Stahlrohre die Basis der Pyramiden und verbinden die Endpunkte der Kreuze.

Die Lücken der auf Abstand nebeneinander gesetzten Halbrahmen werden mit einzelnen BS-Holz-Kreuzen – hier ohne «Stahlüberbau»– geschlossen, sodass in der Gesamtschau eine Gitterstruktur aus Holz mit aufgeständerter Membran entsteht.

Zwei «Stahlgürtel» als Auflager

In einer Höhe von 30 Metern über der Rasenfläche kragen die Holz-Stahl-Rahmen 46 Meter weit über die Tribünen aus. Sie stützen sich lediglich auf zwei Punkten ab:

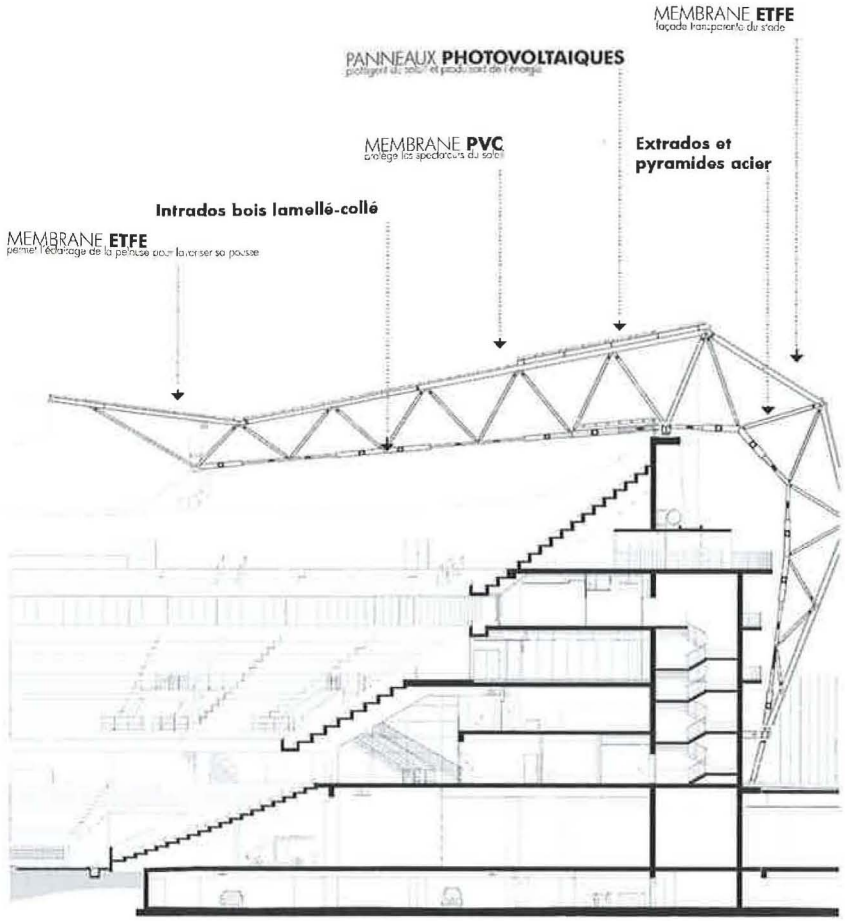
Die Vormontage der Rahmenkonstruktionen erfolgte vor Ort am Boden.

Foto: Fargeot LC

Die BS-Holz-Kreuze bestehen aus einem schlanken Vollquerschnitt und einem Balken mit «Aussparung». Ersterer wird durch die Aussparung hindurchgeführt. Foto: VINCI – F. Vigouroux

Nach der Montage: Optisch entstand eine Gitterstruktur aus Holz mit aufgeständerter Membran. Ein umlaufender Stahlgurt auf V-Stützen dient der Konstruktion als unteres Auflager.

Foto: «Allianz Riviera» – Milène Servelle



Die Halbrahmen kragen 46 Meter weit aus und liegen nur in zwei Punkten auf. Die Auflager bestehen aus Stahlträgern, die das Stadion umgürten. Der untere ist über V-Stützen und horizontale Stahlträger an die Betonstruktur angeschlossen. Plandarstellung: Wilmotte & Associés

oben auf der Tribünenkrone und unten vor den Tribünenwänden, rund 2,5 Meter über dem Vorplatzniveau.

Als Auflager dienen zwei das Stadion umgürtende Stahlträger. Der untere, 800 Meter lange «Stahlgürtel», auch Atlas-Träger genannt, ruht auf V-Stützen, die im Sockelbau verankert sind und die auskragenden Halbrahmen dorthin zurückspannen. Horizontale Stahlträger, die in den Betonwänden verankert sind, halten den Gurt zusätzlich. «Atlas» nimmt Zug- und Druckkräfte infolge Wind, Schnee oder Erdbeben auf.

Betonbau in 14 Blöcke unterteilt

Zur Aufnahme von seismischen Kräften im Falle eines Erdbebens wurde der Betonsockel mit den Tribünen in 14 Blöcke unterteilt. Diese schwingen separat und schwächen dadurch die Erdbebenlasten für das Dachtragwerk ab, das am oberen Auflager ausserdem auf einem Gleitlager ruht.

Auch diese Massnahme machte das Bauwerk zu einem Ausnahmeprojekt, denn nun galt es, die vielen Einzelelemente der Betonstruktur mit der umlaufend geschwungenen Dachkonstruktion in Einklang zu bringen. Hierfür mussten in jedem Kurvenbereich zusätzliche statische Berechnungen durchgeführt werden, die aufgrund der Komplexität der Geometrie und der unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften der Baustoffe trotz Computer aufwendig zu berechnen waren – «das dauerte regelmässig ganze Nächte», erinnert sich der projektverantwortliche Tragwerksplaner Yohann Jacquier vom Ingenieurbüro Egis Bâtiment.

Tribünenkrone folgt geschwungener Linie

Die Tribünen wurden an allen vier Stadienseiten überhöht ausgeführt, damit hier möglichst viele Sitzplätze untergebracht werden können. In den Eckbereichen, wo man weniger gut sieht und weniger gerne sitzt, wurde die Tribünenhöhe zurückgenommen.

Das führt zu einer geschwungenen Linie der Tribünenkrone, die mit der des Daches korrespondiert. Diese veränderliche Höhe verläuft zwar in den gegenüberliegenden Stadienhälften der beiden Hauptachsen ebenfalls symmetrisch, schlug sich aber auch in der Geometrie jedes Dachrahmens nieder.

Äussere Einflüsse berücksichtigen

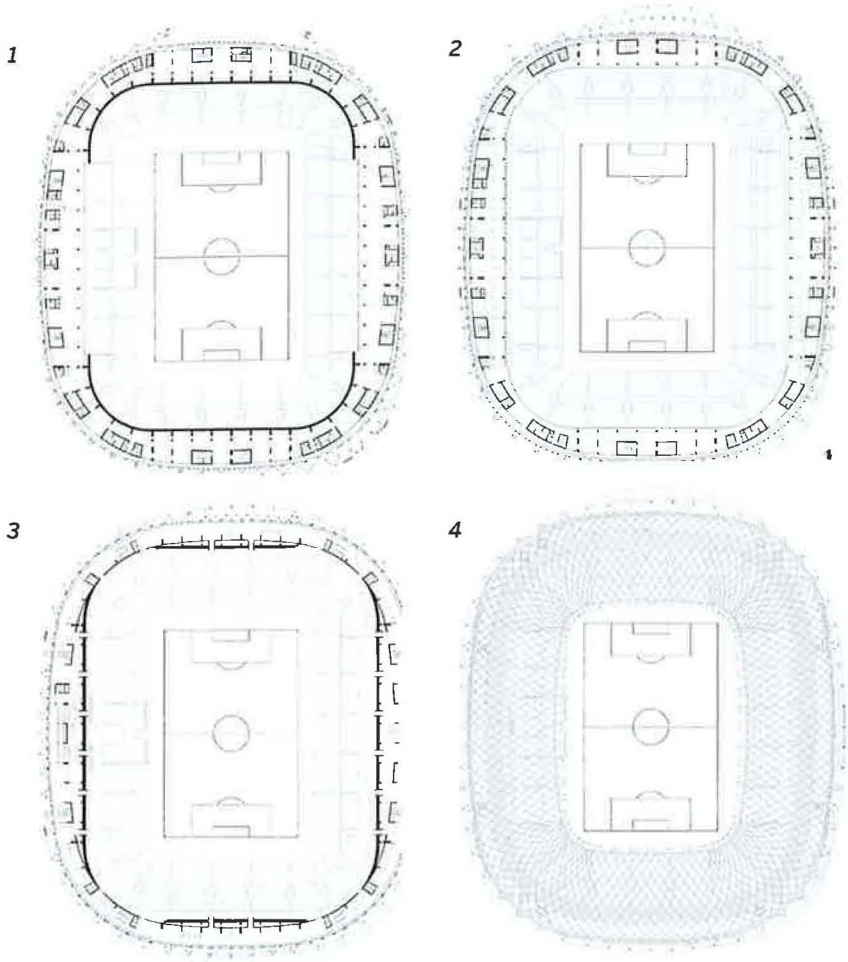
In die Berechnungen flossen ausser der Geometrie und den anzusetzenden Lasten auch Werkstoffparameter ein wie Festigkeit und Steifigkeit, aber auch äussere Einflüsse wie Feuchtigkeit und Temperatur, unter denen sich Holz, Stahl und Beton (Kriechen und Schwinden) jeweils anders verhalten. Um überhaupt zu einem berechenbaren statischen Modell zu kommen, haben Tragwerksplaner, Architekten und (Holz-) Bauunternehmen vom Entwurf an kontinuierlich zusammengearbeitet, wie Projektleiter Ralf Levedag vom Architekturbüro Wilmotte & Associés ebenso betont wie Yohann Jacquier.

Entwurf mit Software umgesetzt

«Wir waren damit beauftragt, die Konstruktion und die Geometrie des innenliegenden Gewölbebogens aus Holz respektive des äusseren Gewölberückens aus Stahl zu konzipieren.

Sobald uns die Architekten einen Entwurf lieferten – und derer gab es viele bis zur Lösung –, übersetzten wir ihn sofort mit Hilfe von speziellen Softwareprogrammen in ein geometrisch realisierbares Modell. So haben wir uns nach und nach an das architektonische Endergebnis herangearbeitet», erzählt Jacquier.

Anschliessend konnten die Tragwerksplaner auch das statische Modell generieren, in das die zuvor genannten Parameter Eingang fanden.

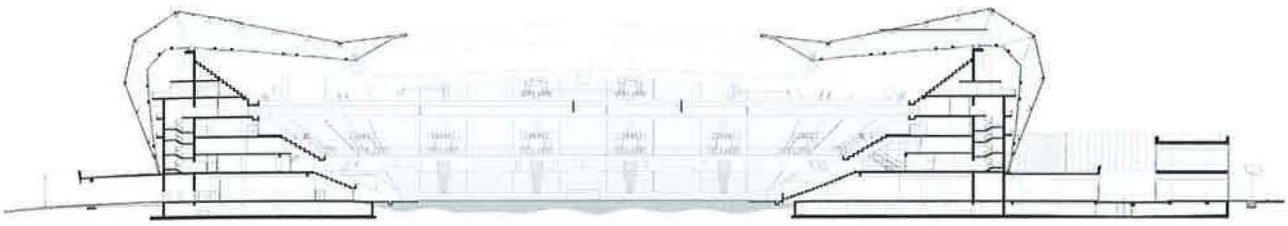


Die Grundrisse der Fussballarena von Level 1 bis Level 4. *Plandarstellung: Wilmotte & Associés*

Das Dachtragwerk als digitales Neuronennetz simulieren

Für die genaue Untersuchung und Verifizierung des Tragwerksmodells haben die Ingenieure drei Programme benutzt: eines zur Berechnung der Kräfte an den Auflagern und Knotenpunkten respektive der Beanspruchung der Querschnitte und Bauteile, eines zur 3-D-Modellierung für die Visualisierungen sowie das Programm,

Teil 1: Der Halbrahmen wird per Kran eingehoben und mit einer Positionierungshilfe so lange fixiert, bis auch Teil 2 (Bild rechts) angeschlossen war. Danach musste alles millimetergenau geometrisch justiert werden. *Fotos: Fargeot LC, VINCI - F. Vigouroux*



Die Struktur der Fussballarena im Querschnitt. *Plandarstellung: Wilmotte & Associés*

in das alle Parameter der Tragstruktur eingegeben werden konnten.

Mit der parametrischen Software liess sich das Tragwerk als ein zusammenwirkendes Ganzes simulieren, ähnlich einem neuronalen Netz. Das heisst, bei Änderung eines Parameters passte das Programm automatisch alle anderen Parameter an.

232 Windlastszenarien berechnet

Als äussere Last war vor allem Wind massgebend. Insgesamt haben die Ingenieure dazu 18 Millionen Lastfälle am Computer durchgerechnet und davon 232 der pessimistischsten Windszenarien ausgewählt, um die Extremfälle durchzuspielen. Hinzu kam eine weitere Schwierigkeit, die die Berechnungen verkomplizierte: Die Verbindungsknoten des Holzgitters sind nicht starr, sie lassen Spiel zu.

Zur Aufnahme der Axialkräfte wählte das Holzbauunternehmen blockverklebte BS-Holz-Balken unterschiedlicher Dicke, die sich durchkreuzen.

Sich durchkreuzende Holzbalken senken Knotenzahl

Dabei erhielt der höhere Querschnitt eine «Aussparung» in Balkenmitte, durch die der andere, schlankere Querschnitt «hindurchgefädelt» werden konnte. Ein Bolzen verbindet sie im Kreuzungspunkt. Die einzelnen Balken mit einer variablen Länge zwischen 7 und 10 Metern stabilisieren sich gegenseitig und halbieren so ihre Knicklänge.

Bereits durch den Auflagerdruck der Holzkreuze ergeben sich Druckkräfte auf die Balken und damit Scherkräfte zwischen den äusseren und inneren Bereichen. Sie liessen sich manuell, empirisch oder mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnen. Entscheidend war hier vor allem, die Scherkräfte richtig zu dosieren, indem man die Balkenquerschnitte entsprechen dimensionierte.

So sind die 58 Zentimeter breiten «Durchfädel-Balken» zwischen 16 und 23 Zentimeter dick. Die Abmessungen der dazugehörigen Balken mit Aussparung variieren bei gleicher Breite in der Dicke zwischen 34 und 50 Zentimeter.

Stahlanschlussknoten verbinden sechs Bauteile

Das Holzbauunternehmen hat für die Netzstruktur zur Verbindung der Stahl- und Holzbauteile ein schmetterlingsförmiges Stahlanschlussblech in Kombination mit einer Stahlrohr-«Pfette» entwickelt. Daran können je vier Holzbalken über eingeschlitzte Bleche sowie die Stahlpyramiden in einem Knotenpunkt verbunden werden. Um die einzelnen Teile der Dachkonstruktion industriell herstellbar zu machen und in Serie fertigen zu können, musste eine Geometrie gefunden werden, die bis zu einem gewissen Grad eine Wiederholung ermöglicht. Vor allem aber galt es, eine präzise Geometrie für das Holzgitter zu entwickeln, da es die Geometrie der kompletten Überdachung vorgibt.

So haben die Ingenieure das Stadion in vier Viertel und diese Viertel wiederum in drei Teile geteilt, wobei jedes dieser Teile

Achse für Achse wurden die Teile 1 und 2 montiert. Mit dem Einbau der Füllkreuze nimmt die 35 Meter hohe Gitterstruktur Gestalt an. Der Halbrahmen – quasi das Dach (links) liegt auf der Tribünenkrone auf (rechts). *Fotos: Fargeot LC, F. Vigouroux, VINCI*

Das Stadion zeigt sich mit transluzenter Silhouette, die den Einfall von Licht gestattet. *Fotos: «Allianz Riviera» – Milène Servelle*

eine eigene Drehachse hat. Die sich daraus ergebenden Radien und Achsen dienten dann zur Positionierung und Ausrichtung der Holzbalken und Verbindungen.

Puzzle eines Gesamtkunstwerks

Mit der Montage hat der Generalunternehmer Vinci das in solchen Grossprojekten erfahrene italienische Unternehmen General Montaggi beauftragt. Für die Vormontage vor Ort standen 3 Hektar Baustellenfläche zur Verfügung. Hier wurden die Halbrahmen in drei Teilen vorgefertigt: der vertikale Teil, der oben aufliegende Teil – quasi das Dach – und der Überstand. Die Montage der drei räumlichen Fachwerke erfolgte am Boden. Per LKW zur Einbaustelle gefahren, hob sie ein 800-Tonnen-Kran mit Hilfe eines Positionierungsgeräts an die richtige Stelle. Dies war zum einen notwendig, um die ersten Rahmenteile vorläufig in Stellung zu halten, bis die anderen Elemente angeschlossen waren. Zum andern auch zur exakten geometrischen Justierung der Elemente, von denen jedes in einem anderen Neigungswinkel anzuordnen war.

Halbrahmen auf Abstand montiert und mit Kreuzen gefüllt

Aufgrund der Symmetrie des Bauwerks über die beiden Hauptachsen kommen alle Holz- und Stahlbauteile des Dachtragwerks viermal vor. Ein minutiöser Bauablauf und detaillierte Positionspläne halfen, alles perfekt einzubauen.

Nach der Montage der Teile 1 und 2 wurden diese vom Vermesser überprüft und Masstoleranzen durch Feinjustierung millimetergenau ausgeglichen.

Danach schloss man die Lücken mit den Verbindungskreuzen ohne «Stahlüberbau». Die Holzkreuze lassen sich aufgrund des Spiels im Kreuzungspunkt bis zu einem gewissen Grad wie ein Fächer um diesen Drehpunkt «zusammenklappen». Das hatte den Vorteil, dass die Füllkreuze problemlos zwischen den Halbrahmen platziert werden konnten und sich die Anschlussbleche durch «Aufklappen» der Schenkel einfach in die der Rahmen hineindrehen und verbinden liessen.

Möglichst unsichtbare Verbindungen

Die Planer wünschten sich eine Verbindung, bei der man die Anschlussbleche möglichst nicht sieht. Hierfür wurden die Decklamellen der BS-Holz-Balken einseitig verlängert und die Enden unter einem Winkel abgelängt. Im Anschlusspunkt fügen sich diese Brettverlängerungen dann wie Puzzleteile zusammen und verdecken in der Untersicht die Verbindungsknoten. Zur Lösungsfindung hatten die Planer zuvor ein 1:1-Modell gefertigt.

Nicht nur gibt es (60 : 4 =) 15 verschiedene Halbrahmen mit einer Vielzahl unterschiedlicher Bauteile, die alle nur an einer bestimmten Stelle passen, sondern auch die Stahlteile mit ihren Anschlussblechen sind immer verschieden, denn die Winkel

Die Arena ist für 35 000 Zuschauer ausgelegt. Sie ist das erste Objekt des Raum- und Stadterschliessungsprojekts «Éco-Vallée Plaine du Var». *Zeichnung: «Allianz Riviera» – Milène Servelle*

Die 5000 m² grosse Arena für Sportereignisse und Konzerte leuchtet in der Nacht wie eine Laterne. Sie bildet das Zentrum des zukünftigen Eco-Quartiers, das im Zuge des gross angelegten Stadterschliessungsprojekts «Eco-Vallée Plaine du Var» entsteht.

der anzuschliessenden Bauteile, ob Holzkreuze oder die Stahlrohre der Pyramiden, ändern sich kontinuierlich und damit auch die Winkel der Anschlussbleche.

Am Ende steht eine Meisterleistung

Dass es überhaupt möglich ist, eine derart komplexe Geometrie dieser Grössenordnung mit so vielen Bauteilen und Anschlussknoten zu errichten, kann als Meisterleistung bezeichnet werden. Sie ist das Ergebnis optimaler Zusammenarbeit zwischen allen Planungsbeteiligten in Kombination mit modernsten Softwareprogrammen und dem Ingenieurverstand, der sie sowohl richtig einzusetzen weiss, als auch die jeweiligen Ergebnisse des iterativen Annäherungsprozesses zu deuten versteht. Dank Holz und den tausenden Gelenkverbindungen erreichten die Planer ein leichtes und weiches Tragwerk.

Susanne Jacob-Freitag

Linktipp: Kurzfilme zum Bauablauf des Projekts:
www.tinyurl.com/ka43epo
www.tinyurl.com/ml4jf4f