

Das Turmkreuz der Basilika Sagrada Família in Barcelona

B. Sagmeister, M. Cortés, J. Weißenburger, T. Fildhuth, S. McKechnie

ZUSAMMENFASSUNG Die Basílica i Temple Expiatori de la Sagrada Família ist eine der bedeutendsten katholischen Kirchen. Zum 100-jährigen Todestages des Architekten Antoni Gaudí wurde am 10. Juni 2026 unter Leitung von Papst Leo XIV der Jesus-Christus-Turm eingeweiht. Er wird gekrönt von einem 16,9 m hohen und 13,5 m breiten, begehbaren Kreuz (**Bild 1**), sodass Barcelona nun den höchsten Kirchturm der Welt mit einer Höhe von 172,5 m besitzt. Das Gesamtgewicht des Kreuzes beträgt 110 Tonnen. Nachfolgend wird sowohl über das Konzept, die Architektur und das Tragwerk als auch über die Ausführung des Kreuzes aus Duplex-Stahl und einer außenseitig mit Keramik bekleideten UHPC-Schale berichtet.

STICHWÖRTER

Sagrada Família, Duplex-Stahl, UHPC, Glaspysramiden

The Cross of the Basilica Sagrada Família in Barcelona

ABSTRACT The Basílica i Temple Expiatori de la Sagrada Família is one of the most important Catholic churches. Just in time for the 100th anniversary of the death of architect Antoni Gaudí, the Jesus-Christ-Tower was inaugurated on June 10th, 2026, under the authority of Pope Leo XIV. It is crowned by a cross (Fig 1) 16.9 m high and 13.5 m wide, with a total weight of 110 metric tons, making Barcelona the home of the world's tallest church tower with 172.5 m. The following article describes the concept, design and construction of the cross, which is made of duplex steel and an UHPC shell, which is covered by embedded ceramic tiles.

1 Entstehungsgeschichte und Hintergrund

1.1 Geschichte des Entwurfs

Antoni Gaudí (25. Juni 1852-10. Juni 1926) war bereits zu Lebzeiten ein weltberühmter Architekt des katalanischen Modernisme. Er arbeitete 43 Jahre an der Sagrada Família, die letzten 10 Jahre ausschließlich an der Kirche (**Bild 2**). Er ist verantwortlich für die außergewöhnliche prachtvolle Gestaltung der Außenfassade und dem warmen, lichterfüllten, Geborgenheit vermittelnden Innenraum. Er verstarb 1926, sodass sein 100-jähriger Todestag zum Anlass genommen wurde, den mit 172,5 m höchsten der insgesamt 18 Türme der Kirche, -den Jesusturm- fertigzustellen und mit einem begehbaren Kreuz mit den Abmessungen $h = 16,9$ m Höhe und einer Breite und Tiefe von 13,5 m zu krönen.

Während des Spanischen Bürgerkriegs wurden die meisten Zeichnungen und Architekturmodelle zerstört. Maßstabsmodelle und Formen eines Kreuzes und in der Form des griechischen Buchstabens „τ“ blieben jedoch erhalten. Beide Zeichen umfassen im Christentum die Bedeutungen von Schmerz, Erlösung, Schutz Gottes und ewigem Leben. In diesen Modellen verwendete Gaudí zur Formfindung die spiralförmige Oberfläche mit derselben doppelt gedrehten Geometrie, welche er für die Säulen des Kirchenschiffs entwickelt hatte. Neben diesen Modellen nutzten die Architekten die Beschreibungen des Kreuzes, die zu Gaudís Lebzeiten in den Schriften der finanzierenden Stiftung veröffentlicht wurden, sowie alle schriftlichen Aufzeichnungen seiner Mitarbeiter, wie zum Beispiel die folgende Schriftstelle:

“Der bis zu 170 m hohe Lichtmast wird ein Kreuz sein, ein Kardinalkreuz mit vier Armen, sodass die Form des Kreuzes von überall her zu sehen ist; ein Kreuz aus weißem Glas (Mosaik),



Bild 1. Kreuz der Sagrada Família auf dem zentralen Jesus-Turm

Foto: iStock, Eloi Omella

Fig. 1. Cross de la Sagrada Família on central Jesus Tower

Source: iStock, Eloi Omella



Bild 2. Basílica i Temple Expiatori de la Sagrada Família
 Foto: iStock, Eloi Omella
 Fig. 2. Basílica i Temple Expiatori de la Sagrada Família
 Source: iStock, Eloi Omella

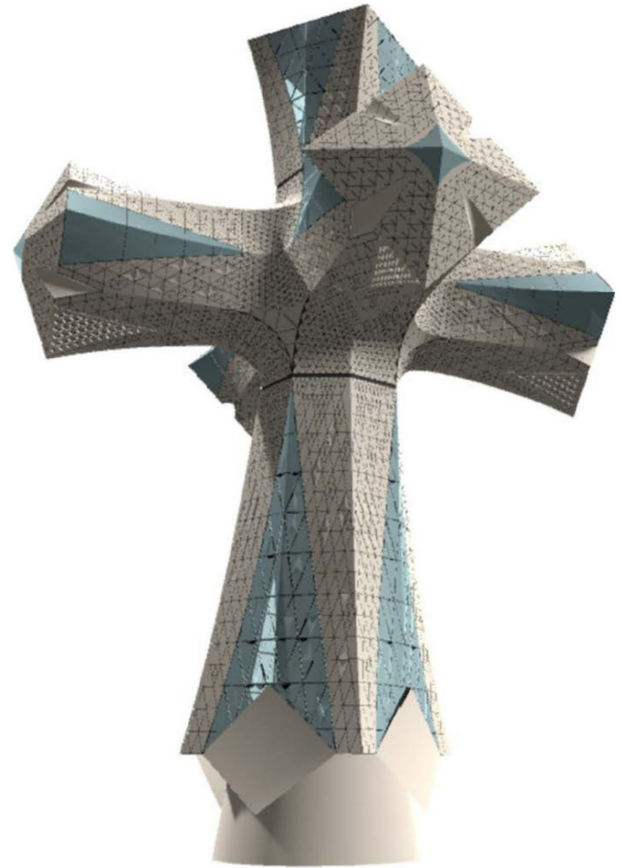


Bild 3. Konstruktion des Kreuzes gemäß den Ausschreibungsunterlagen
 Foto: Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família
 Fig. 3. Construction Overview of the Cross in the Tender Package
 Source: Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família

um tagsüber die Sonnenstrahlen zu reflektieren; ein durch Elektrizität beleuchtetes Kreuz, damit das Symbol der Erlösung nachts erstrahlt”

J. Martí Matlleu (Sekretär des Beirats und persönlicher Sekretär von Antoni Gaudí) in 'Vida Olotina', Olot 1915 [1]

Das Fehlen von detaillierten Vorgaben verlangt von den planenden Architekten des Bauherrn, der „Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família“ großes Einfühlungsvermögen in die architektonische Vision; sie sind sich der Größe und Verantwortung der Aufgabe jederzeit bewusst. Auf der anderen Seite sind die verantwortlichen Fachleute bei diesem Ausnahmegebäude frei von Zwängen wie Denkmalschutz und können pragmatisch, sicherheitsbewusst, sachgerecht und zielorientiert vorgehen. Dies gilt insbesondere für die Baustoffauswahl, wo neben der funktionalen Tauglichkeit vor allem die Langlebigkeit der Materialien im Vordergrund steht. Hier ist der Maßstab nicht 50 oder 100 Jahre, sondern die Lebenszeit in dem maritimen Seeklima sollte so lange wie technisch möglich sein.

1.2 Entwurfskonzept des Kreuzes

Für das statische Konzept und die Ausschreibung arbeitete der Bauherr mit dem Ingenieurbüro Ove Arup & Partners Ltd. in London zusammen. Ausschlaggebend für diese Wahl war die große Erfahrung des Büros mit Materialien jeglicher Art, von Beton über Stahl zu Natursteinverkleidungen und Glaskonstruktionen.

Nach sorgfältiger Abwägung entschied man sich für eine tragende Verbundkonstruktion, bei der Stahl und Beton die Last gemeinsam abtragen. Das Hauptargument gegen eine reine Stahlkonstruktion war die konstruktive Schwierigkeit, eine wasserdichte und langlebige Keramikverkleidung auf dem Stahltragwerk anzuordnen. Eine reine Betonkonstruktion wäre nicht nur für das Tragwerk, sondern auch für die Baukräne und die Montage zu schwer gewesen. Die Ingenieure von Arup schlugen eine Rippenkonstruktion aus geschweißtem Duplexstahl vor. Dieser nichtrostende Stahl Typ 1.4462 mit einem zweiphasigen Gefüge aus austenitischer und ferritischer Phase hat eine hohe Festigkeit, eine gute Korrosionsbeständigkeit bei wirtschaftlichen Legierungskosten und ist schweißbar. Diese Rippenkonstruktion sollte durch eine UHPFRC-Schale („Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete“) versteift werden, einen Faserbeton ohne ergänzende Bewehrungsstäbe, der im gerissenen Zustand erhebliche Zugspannungen aufnimmt [2]. Das Material wird im Folgenden mit dem weniger spezifischen, aber besser bekannten Begriff UHPC für „Ultra-High Performance Concrete“ bezeichnet, der auch in der bei diesem Projekt verwendeten österreichischen Richtlinie verwendet wird. In Deutschland wird das Material als UHFB („Ultrahochfester Beton“) bezeichnet, genauso wie in der Schweiz, dort jedoch als Abkürzung für den Begriff „Ultra-Hochleistungs-Faserbeton“. Die Last zwischen den Stahlrippen und der Betonschale sollte durch spezielle Kopfbolzen übertragen werden, deren

Tragfähigkeit durch Vorversuche an kleinen Prüfkörpern ermittelt wurde.

Als Material war ein Produkt nach französischer Norm [3, 4] vorgesehen. Der UHPC hat nicht nur die Funktion der Aussteifung der Rippenstruktur, er ist auch Trägerschicht für die an der Außenseite angebrachte keramische Verkleidung und überträgt Wind- und Erdbebenlasten der Felder auf die Rippen (**Bild 3**).

Das Kreuz ist für kleine Besuchergruppen über eine Treppe von innen begehbar. Daher wurden an der Innenseite eine Wärmedämmung und eine Natursteinverkleidung angebracht. Im Inneren befindet sich zudem die technische Ausrüstung für Spotlight-Scheinwerfer, die nachts durch die Fenster an den Kreuzspitzen ihre Strahlen in den Himmel richten. Die zeitweise Nutzung der Räume durch Menschen erforderte bereits in der Entwurfsphase die Einbindung des in Barcelona ansässigen Spezialunternehmens „PGI engineering“, um zu ermitteln, wie durch natürliche Belüftung ein verträgliches Raumklima für die Besucher geschaffen werden kann. Das Beleuchtungskonzept wurde von „LKL Design Hub“, Barcelona, erstellt und visualisiert. Auch die Abdichtung der Glaselemente an den Stahl- und Betonbauteilen sowie die Auswahl geeigneter Fliesenkleber wurden im Entwurfsprozess sorgfältig betrachtet.

1.3 Ausschreibungsphase

Im Frühjahr 2020 erhielt die Josef Gartner GmbH aus Gundelfingen die Ausschreibungsunterlagen (**Bild 3**) und stellte ein interdisziplinäres Team zusammen, um die Aufgabe in Angriff zu nehmen. Gartner, eine Tochtergesellschaft der Permasteelisa-Gruppe, ist ein international aufgestellter Fassadenhersteller, sodass Planung, Berechnung, Bauteilprüfung, das Schweißen von Edelstahl, der Einbau der Verglasung und Montage vor Ort zu den Kernkompetenzen des Unternehmens zählen. Für die UHPC-Arbeiten wurde externe Unterstützung hinzugezogen. Da die Module für das Bauteil vollständig in Deutschland vorgefertigt werden sollten, wurde kein französisches oder spanisches Unternehmen gewählt. Stattdessen wurde eine Zusammenarbeit mit dem deutschen Consultingbüro durcrete GmbH vereinbart, um sich bei der Materialauswahl und der Dimensionierung des UHPC beraten zu lassen. Als Fertigteilwerk für die Ausführung fiel die Wahl auf die Sudholt-Wasemann GmbH, ein auf Maschinenbauteile aus UHPC spezialisiertes Fertigteilwerk in Ostwestfalen.

Das Projekt nahm an Fahrt auf, mit dem Bauherren und Arup fanden die ersten Videokonferenzen mit Ausführungsskizzen (**Bild 4**) statt. Dann kam Corona und die Welt stand still. Der Begriff „Stillstand“ ist hier wörtlich als Baustopp zu verstehen, da die Lockdown-Maßnahmen die Fortsetzung jeglicher Arbeiten verhinderten. Hinzu kam ein Rückgang der Einnahmen für das Bauvorhaben, das mehrere hundert Millionen Euro kosten wird und noch nicht fertiggestellt ist. Ein ansehnlicher Teil der Baukosten wird durch die Eintrittsgelder von fast 5 Millionen Besuchern pro Jahr gedeckt. Der Fertigstellungstermin für die gesamte Kirche wurde um Jahre nach hinten verschoben. Auch die Planung für das Kreuz wurde erst im Herbst 2022 wieder aufgenommen. Aber wie schon Gaudi bei Fragen nach der Bauzeit antwortete, gilt auch heute: „Mein Kunde hat keine Eile.“

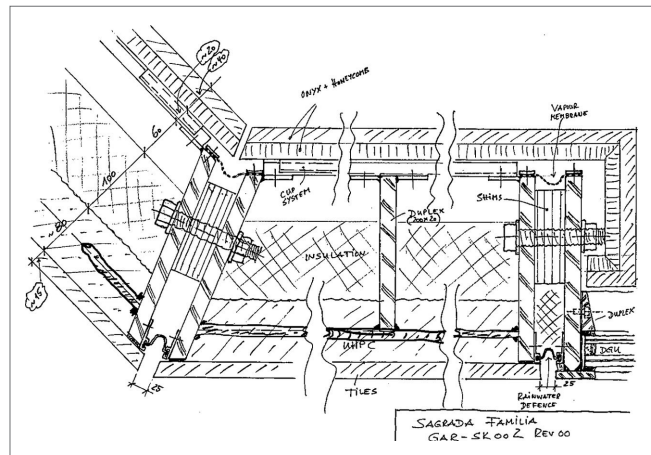


Bild 4. Ausführungsskizze zur Detailausbildung während der Ausschreibungsphase Grafik: Josef Gartner GmbH

Fig. 4. Designsketch Regarding Detailing in Tender Phase
Source: Josef Gartner GmbH

2 Ausführungsplanung für das Kreuz

2.1 Standsicherheitsnachweis

Die statische Berechnung und Nachweise während der Ausführungsplanung wurden von der knippershelbig GmbH, Stuttgart, durchgeführt. Für die Bemessung wurden die englischen Fassungen der Eurocodes BS EN 1992-1-1 [5], BS EN 1993-1 [6] mit BS EN 1993-1-4 [10] und BS EN 1994-1-1 [7] sowie die Norm BS 8298 [8] für die Natursteinverkleidungen verwendet. Für die Bemessung des UHPC wurden die österreichische Richtlinie „UHPC“ des ÖBV [9] in Verbindung mit Prüfergebnissen und BS EN 1992-1-1 [5] herangezogen. Zu den Aufgaben der Tragwerksplanung gehörten die Ausführungsstatik (global und im Detail) der Verbundkonstruktion aus nichtrostendem Stahl und UHPC, die Berücksichtigung der Bau- und Montagezustände, die Lastabtragung der Innentreppe sowie die Berücksichtigung der Verglasung inkl. Rahmen und Befestigung.

Die Verifizierung und Bemessung basieren auf einem eigens neu angefertigten, globalen FE-Modell des gesamten Kreuzes (**Bild 5 links**) sowie auf hochdetaillierten Teilmodellen des Fust (Beine), des zentralen Knotens (Nucleus, **Bild 5 rechts**), der vier seitlichen Auslegerarme und des oberen Arms. Detailnachweise wurden sowohl anhand der detaillierten FE-Modelle als auch anhand von analytischen Berechnungsblättern durchgeführt, die für die zahlreichen Details der Kreuzkonstruktion entwickelt wurden. Aufgrund der asymmetrischen Lasten wurde die Berechnung am Gesamtsystem durchgeführt und es konnte keine Symmetrie ausgenutzt werden. Für das globale Modell wurde die Rahmenkonstruktion aus nichtrostendem Stahl aus einer Kombination von Balken- und Schalenelementen modelliert; die UHPC-Schale wurde vollständig mit Schalenelementen (Typ QUAD) simuliert. Die detaillierten Teilmodelle wurden vollständig mit Schalenelementen erstellt, um Stabilitätseffekte (z.B. lokales Knicken / Beulen von Flachstahlbauteilen) und die Lastverteilung zwischen Betonhülle und dem Edelstahlrost noch präziser als im Globalmodell zu berücksichtigen. Besonders komplexe Details, wie beispielsweise die Verbindungsringe zwischen den verschiedenen Teilen des Kreuzes, wurden unter Verwendung von Volumenelementen in FE-Submodellen analysiert. Als 3D-Modellierungsssoftware wurde

Bild 5. Links: Globales FE-Modell, Rechts: Rippenstruktur des Nucleus modelliert mit Schalenelementen Grafik: knippershelbig GmbH Fig. 5. Left: Global FE-model, Right: Shell Elements of Steel Ribs of the Nucleus Source: knippershelbig GmbH

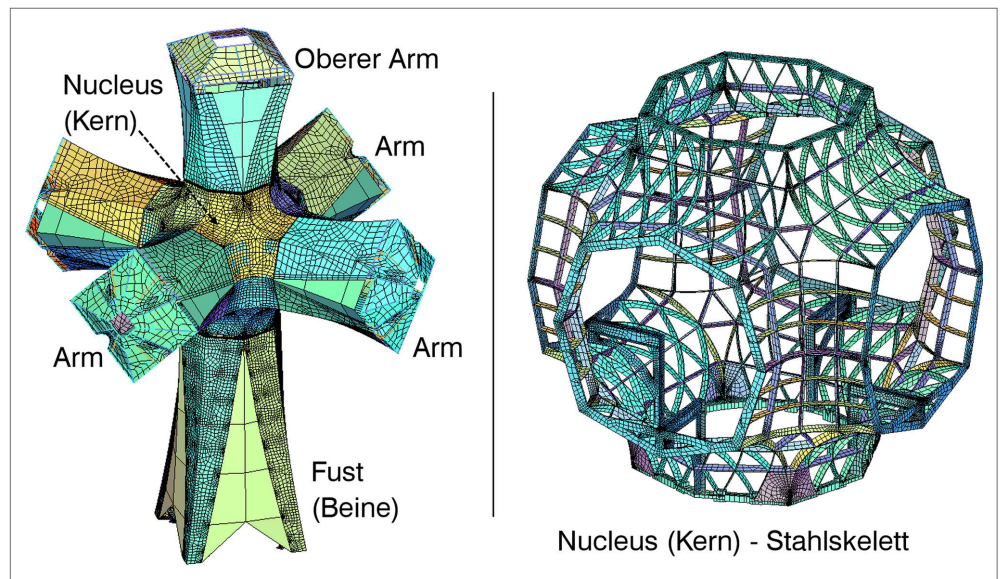


Tabelle 1. Nachweischema
Table 1. Verification Concept

Nachweis	FE-Analysetyp	Annahmen Betonmodell	Stahlmodell (Skelett)
GZG	geometrisch linear	gerissener Beton keine Betonzugfestigkeit	bi-lineares Werkstoffmodell
GZT	geometrisch linear	gerissener Beton keine Betonzugfestigkeit	bi-lineares Werkstoffmodell
GZT Beulen / Stabilität	lineare Beulanalyse Imperfektionen aufgebracht	Betonsteifigkeit gegenüber dem Ausgangswert reduziert	Stahlsteifigkeit reduziert
GZT Erdbeben	geometrisch nichtlinear TH-II	gerissener Beton keine Betonzugfestigkeit	bi-lineares Werkstoffmodell
Brand	geometrisch nichtlinear TH-II	gerissener Beton keine Betonzugfestigkeit	Reduzierter E-Modul

Rhinoceros 3D mit Grasshopper verwendet, als FEA-Paket kam Sofistik zum Einsatz.

Die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) und im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) erfolgten gemäß **Tabelle 1**. Aufgrund des hohen Rechenaufwandes in den sehr großen und komplexen FE-Modellen wurden zunächst geometrisch nichtlineare Analysen nach Theorie 3. Ordnung an spezifisch ausgewählten Lastfallkombinationen mit gerissenem Beton durchgeführt. Diese zeigten im Vergleich zu geometrisch linearen Analysen nahezu keine Unterschiede, sodass für die große Menge der Analysen die geometrisch lineare Theorie verwendet werden konnte. Die Annahme gerissenen Betons ohne Ansatz der Zugfestigkeit des UHPC ist konservativ.

Für den nichtrostenden Duplexstahl wurde ein bilineares Spannungs-Dehnungs-Materialmodell angewendet, nachdem zunächst ein sorgfältiger Vergleich mit dem nichtlinearen Ramberg-Osgood-Ansatz gemäß BS EN 1993-1-4 Anhang C [10] (Spannungs-Dehnungs-Kurven mit Verfestigung) durchgeführt worden war; es wurde somit überprüft, dass der Stahl innerhalb der quasi-elastischen f_y -Grenzen bleibt. Lineare Beulnachweise wurden global für die Konstruktion berechnet und lokale Knicknachweise wurden für Einzelbauteile durchgeführt. Für Stabilitätsnachweise wurde die Steifigkeit des UHPCs reduziert und die Vorverformung wurden aus den Stabilitäts-Eigenmoden abgeleitet. Flache, beul- beziehungsweise knickgefährdete Stahlelemente wurden nach Bedarf mit Versteifungen, Stegen oder Flanschen ertüchtigt. Während der Analysen wurden dem Stahlgitterrost bei Bedarf zur

Optimierung und Versteifung zusätzliche diagonale Aussteifungselemente hinzugefügt. Die Schraubverbindungen, mit denen die Einzelteile des Kreuzes verbunden wurden, wurden mithilfe von Federn simuliert.

Das Antwortspektrum für Erdbebenlasten in Barcelona gemäß der spanischen Norm [11] war aufgrund der Lage des Kreuzes auf der Spitze des Hauptturms der Kathedrale nicht anwendbar. Daher wurde von ARUP ein spezifisches Antwortspektrum für die Turmspitze erstellt, um die an dieser Stelle deutlich höheren Beschleunigungen zu berücksichtigen.

Die spanischen Normen [12, 13] und BS EN 1990 [14] bildeten die Grundlage für die GZG und GZT-Lastkombinationen. Die seismische Last war häufig ausschlaggebend für die Bemessung; die Windlasten, wenngleich durchaus hoch, spielten nur in wenigen Fällen eine Rolle. **Bild 6** zeigt ein Beispiel für die Verteilung horizontaler Windlasten mit einem Maximalwert von 3,74 kN/m².

Während der Ausschreibungsphase wurde noch davon ausgegangen, dass die horizontalen Wind- und Erdbebenlasten von ähnlicher Größenordnung sein würden. Die abschließende statische Berechnung, bei der die Eigenfrequenzen unter Berücksichtigung einer durch Rissbildung bedingten Verringerung der Steifigkeit ermittelt wurden, zeigte, dass diese Annahme zu optimistisch war und dass die Erdbebenlasten in einer Reihe von Fällen die Windlasten deutlich übersteigen. Die erste Eigenform ist eine Torsionsfigur, während die zweite und dritte Eigenform laterale Biegeverformungen des an seinem Fußpunkt eingespannten Kreuzes

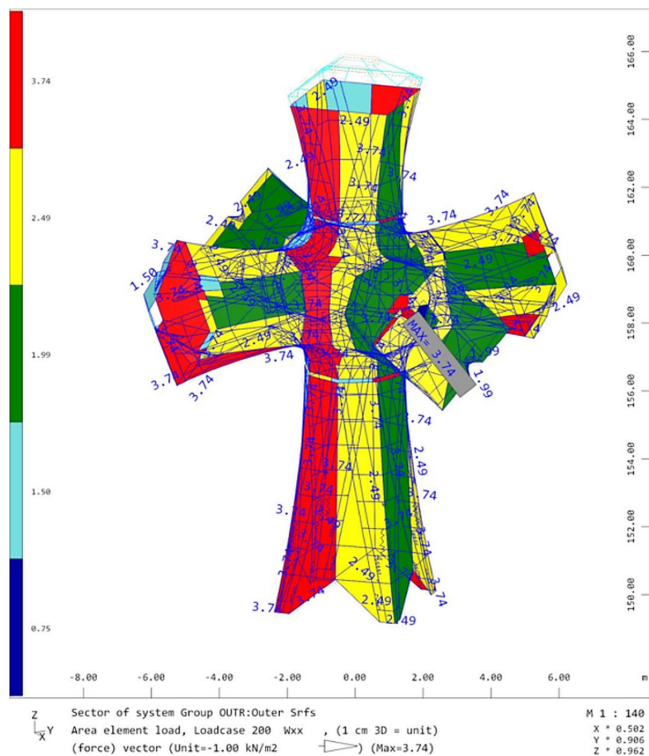


Bild 6. Annahme zur Windlastverteilung in der Tragwerksberechnung
 Grafik: knippershelbig GmbH
 Fig. 6. Load Assumptions Regarding Wind Loads in Structural Analysis
 Source: knippershelbig GmbH

zes darstellen. Die Torsions- und Biegebeanspruchungen führen zu hohen Scherspannungen, insbesondere am Auflager des Kreuzes zum Sockel und an der Verbindung zwischen dem Fust und dem Nucleus. Diese konnten nur durch zusätzliche Maßnahmen wie eine doppelte Stabbewehrung im UHPC und spezifische Kombinationen aus Schubstiften und Verschraubungen aufgenommen werden und erforderten umfassende Nachweise.

Das in Barcelona ansässige Ingenieurbüro „ARcBCN Consulting Engineers“ führte eine Simulation des Gebäudes unter Ver-

wendung der tatsächlichen Brandlasten durch und ermittelte eine Höchsttemperatur von 332 °C. Bei der Überprüfung des Lastfalls „Brand“ wurden anschließend die für diese Temperatur gültigen Materialparameter wie zum Beispiel die Zugfestigkeit unter Verwendung der Reduktionsfaktoren aus BS EN 1993-1-2 C [15] angepasst und die Tragfähigkeit entsprechend überprüft.

2.2 Verbundtragwerk Stahlkonstruktion und UHPC-Schale

Die Tragkonstruktion des Kreuzes besteht aus einem Edelstahlgitterrost, der aus Flachstahlelementen verschweißt wurde. Wo immer erforderlich, wurden Versteifungen und Winkelprofile eingesetzt, um ein lokales Stabilitätsversagen zu verhindern. Für das Gitter wurde ausschließlich Duplex-Edelstahl 1.4462 (gemäß EN 10088 / BS EN 1993-1-4 [10]) verwendet. Die Dicke der Bleche reicht typischerweise von 6 mm bis 12 mm, wobei einzelne Elemente bis zu 20 mm stark sind. Die zwischen die Flachstahlgitterelemente eingeschweißten Bewehrungsstäbe B500A NR nach allgemein bauaufsichtlicher Zulassung Z-1.4-228 [22] bestehen aus nichtrostendem Stahl des Werkstoffes 1.4362 und haben einen Nenndurchmesser von 8 mm. Das grundlegende axiale orthogonale Gitter der Bewehrungsstäbe beträgt 100 x 100 mm und wird reduziert bis zu 70 x 70 mm für besonders belastete Bereiche. Im Falle einer Doppelstabbewehrung, die bei hoher Schub- und Axialzugbeanspruchung erforderlich ist, wurde die Maschenöffnungen auf 65 x 65 mm reduziert, was das experimentell ermittelte erforderliche Minimum an freien Querschnitt für das einwandfreie Durchfließen des UHPC darstellt. Die Ausrichtung des Bewehrungsgitters beträgt typischerweise 90° zum umgebenden Stahlrahmen. Dieser Winkel wird bei hohen Scherbeanspruchungen auf 45° geändert. Zusammen mit der Bewehrung wird der äußerste Teil des Edelstahl-Flachstahlgitters in den UHPC eingebettet. In den Analysen wird keine Kohäsion zwischen dem eingebetteten Teil des Stahlgitters und dem UHPC angenommen; es wird jedoch eine Grenzflächenreibung zwischen Beton und Stahl berücksichtigt. Die Betonschale ist 55 mm dick und an der Außenseite mit Fliesen verkleidet. Die Einbettung der Flachstahlrippen beträgt 40 mm.

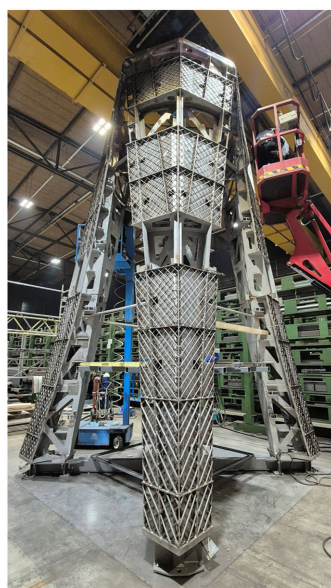
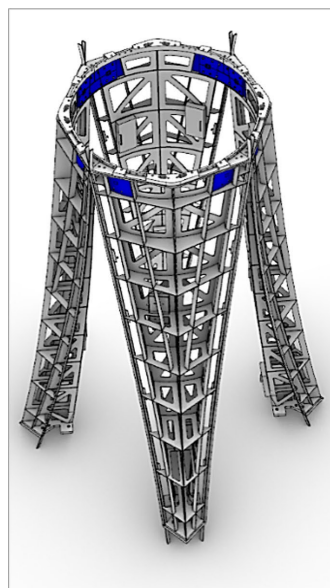


Bild 7. Links: 3D-Modell der Stahlkonstruktion; Mitte: Stahlstruktur des Fußes; Rechts: Bewehrungsnetz und rückseitige Gegenschalung Grafik: knippershelbig GmbH/ Josef Gartner GmbH
 Fig. 7. Left: Stainless steel grid 3D model; Center: Steel structure of the Fust; Right: Reinforcement and Counterformwork on the back
 Source: knippershelbig GmbH/Josef Gartner GmbH

Tabelle 2. UHPC-Rezeptur
Table 2. UHPC-Formulation

Nanodur Compound 5941, grau Dyckerhoff, Deutschland	1 050 kg/m ³
Runde Quarzkörnung 1 bis 3 mm	880 kg/m ³
Grubensand 0/2	430 kg/m ³
PCE Fließmittel	16 kg/m ³
Schwindreduzierer	6 kg/m ³
Edelstahl Microstahlfasern l = 16 mm, Ø 0,2 mm Hersteller: Krampe Harex, Deutschland	80 kg/m ³

Tabelle 3. Materialeigenschaften des verwendeten UHPC
Table 3. Material Characteristics of UHPC

Druckfestigkeit an 100 mm Würfeln $f_{c, cube}$	131,9 MPa
E-Modul E_c an Zylindern Ø 100 mm	46 100 MPa
Biegezugfestigkeit der Betonsteinmatrix vor dem Erstriss (LOP) Biegezugprüfung an 50 mm dicken Platten $f_{ct,fl}$	18,4 MPa
Max. Biegezugfestigkeit im gerissenen Zustand (MOR), Biegezugprüfung an 50 mm dicken Platten $f'_{ct,fl}$	12,1 MPa
Haftzugfestigkeit von einbetonierten Fliesen mit Schwalbenschwanzbildung der Rückseite	2,5 MPa
Haftzugfestigkeit von verklebten Fliesen mit glatter Rückseite	3,1 MPa

Bild 7 zeigt den Herstellungsprozess des Flachstahlgitters an der Fußkonstruktion (Fust) und die zu Passungszwecken durchgeführte Probemontage in den Hallen von Gartner. Der linke Teil von Bild 7 zeigt das für die Entwicklung verwendete 3D-Modell, wobei die bläulich gekrümmten Platten die Verbindungselemente zwischen dem Fust selbst und dem oberen Verbindungsring darstellen. Im Bild 7 Mitte sind die Bewehrungsdoppelstäbe am stark belasteten unteren Rand, dem Verbindungsbereich zum Gebäudesockel zu erkennen. Im Bild 7 rechts ist die Gegenschalung aus Blech mit Einfüllöffnungen zu sehen.

2.3 UHPC

Der ursprüngliche Entwurf ging von einem hoch faserbewehrten UHPC aus, bei dem ausschließlich die integrierten Stahlfasern nach einem Riss Zugspannungen von $f_{ck} \geq 8 \text{ N/mm}^2$ übertragen. Der Verbund zur Stahlkonstruktion sollte über speziell geschweißte Kopfbolzen erfolgen. Die bei dieser Lösung zu erwartenden Microfasergerhalte von circa 275 kg/m^3 bedingen zum einen schwer zu verarbeitende Betonrezepturen, selbst wenn alle betontechnologischen Möglichkeiten bezüglich Abstufung der Partikeldurchmesser, Optimierung des Fließmittels, Kühlung der Mischung, Verwendung von Vakuummischern usw. ausgeschöpft werden. Zum anderen müssen die Fasern auch an der richtigen Stelle in der richtigen Richtung liegen, um voll wirksam zu sein. Der diesen Umstand berücksichtigende Faserorientierungsfaktor k ist aber keine Materialeigenschaft, sondern eine Produktionseigenschaft, welche zum Beispiel vom Eingießort, Fließstrecke und Einbauteilen abhängt. Zum Zeitpunkt der Konstruktionsfestlegung war noch nicht klar, mit welchem Produktionsverfahren,

welcher Schalung und welcher Feldgröße die Elemente produziert werden. Keiner der Beteiligten hätte es zum damaligen Zeitpunkt für möglich gehalten, dass am Schluss eine zweiseitige, in großen Teilen vertikale Schalung mit 55 mm breiter Eingießöffnung, Feldgrößen von etwa 4 m^2 und Mischchargen von maximal 50 kg zum Einsatz kamen.

Während der Ausführungsplanung stellte sich heraus, dass der ursprüngliche Ansatz einer reinen Faserbewehrung in der Tat nicht anwendbar war, so dass das oben beschriebene zusätzliche Bewehrungsnetz (Bild 7) aus statischen Gründen erforderlich wurde. Der begrenzte Abstand zwischen den Edelstahlstäben mit einem Durchmesser von 8 mm erforderte eine UHPC-Mischung mit verbesserten Fließeigenschaften, um jede Lücke ausfüllen zu können. Umfangreiche Optimierungstests, wie der in **Bild 8** gezeigte Fließtest mit Sichtfenster, wurden im Fertigteilwerk durchgeführt, um die ursprünglich vom deutschen Bindemittelhersteller Dyckerhoff GmbH entwickelte Mischung anzupassen und den erforderlichen Fasergehalt als Kompromiss zwischen statisch erforderlich, produktionstechnisch machbar und wirtschaftlich vernünftig festzulegen. Die an die Flachstahlrippen kraftschlüssig angeschweißten Bewehrungsstäbe dienen im UHPC als Zugbewehrung in Schalenebene. Die Anschweißpunkte der Bewehrungsstäbe dienen als Schubdorne zur Schubübertragung zwischen dem Beton und den Flachstahlrippen sowohl in der UHPC-Ebene als auch senkrecht zur UHPC-Ebene. Auf diese Weise waren keine Schubdübel erforderlich.

Sowohl die Bewehrungsstäbe als auch die Edelstahl-Mikrofasern in der Mischung dienten dazu, die Duktilität zu erhöhen und die Rissbreite im SLS zu verringern, um derart die Keramikfliesen vor Rissbildung zu schützen. Die Überprüfung der Rissbreite im UHPC gemäß der österreichischen ÖBV-Richtlinie [9] ergab einen maximalen Berechnungswert von 0,03 mm bei einer zulässigen Grenze von 0,05 mm. Bei transienten Belastungen, wie zum Beispiel Wind, werden geringfügige, extrem dünne Risse im Nukleusanschluss akzeptiert. Für seismische Belastungen gab es keine Rissbreitenlimitierung. Sollte es jemals zu Rissen kommen, werden diese generell an den Stellen erwartet und akzeptiert, an denen die zu 40 mm eingebetteten Flachstahlrippen die UHPC-Dicke von 55 mm auf eine Restdicke von 15 mm reduzieren. Dieser Bereich entspricht geometrisch den Fugen der Keramikfliesen.

Die Ausgangsstoffe und Rezeptur sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Informationen zu den verwendeten Rohstoffen, zum Kriechen und Schwinden und zu weiteren charakteristischen Materialeigenschaften der seit langem bewährten Rezeptur finden sich in [16]. **Tabelle 3** zeigt eine Auswahl der projektspezifischen Materialeigenschaften, die vom imabs, dem Institut für Materialprüfung & Baustoffforschung GmbH, An-Institut der Hochschule München, ermittelt wurden.

Die Biegezugprüfungen erfolgten nach den Vorgaben der ÖBV-Richtlinie [9] als Vierpunktbiegezugversuch. Die zentrische Zugfestigkeit kann aus den Versuchsergebnissen rechnerisch ermittelt werden und ergibt je nach Auswerteverfahren/Norm zwischen 30 % und 45 % der oben ermittelten Werte.

Die Haftzugfestigkeit der Fliesen erfolgte nach unterschiedlichen Vorlagerungen sowohl in der Klimakammer bei 70 °C, bei Lagerung unter Wasser als auch nach 25 Frost-Tau-Zyklen. Der niedrigere Wert der einbetonierten Fliesen mit Schwalbenschwanz im Gegensatz zu den vollflächig verklebten Fliesen erklärt sich dadurch, dass hier kein flächiger Lastabtrag stattfindet.



Bild 8. Gießversuch in bewehrter, geschlossener, geneigter Schalungsbox mit Plexiglasscheibe, um die ausreichende Fließfähigkeit zu überprüfen
Foto: durcrete GmbH
Fig. 8. Pouring Test in Closed Formwork with PMMA Backside to Demonstrate Sufficient Flowability Source: durcrete GmbH

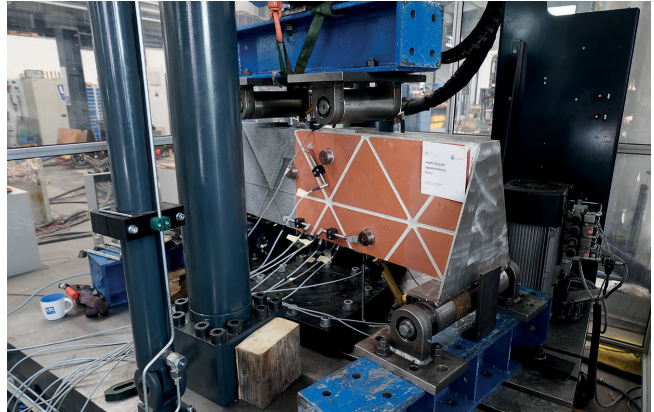


Bild 9. Versuche zur Verbundfestigkeit und Fliesenverhalten
Grafik: imabs GmbH
Fig. 9. Tests on bond strength and tile behavior Source: imabs GmbH

Der Bruch trat häufig innerhalb der Fliese, an der eingeschnürten Verbindung Schwalbenschwanz zu Fliesenplatte auf.

Bild 9 zeigt Versuche an von Arup entwickelten Probekörpern, mittels derer die Verbundfestigkeit zwischen UHPC und Stahltragwerk unter Verwendung des eingeschweißten Bewehrungsnetzes ermittelt wurde. Bei diesen Versuchen wurden nicht nur die Kräfte und Verformungen mittels Sensoren gemessen. Zusätzlich wurden sowohl an dem UHPC als auch an einbetonierten/ aufgeklebten Fliesen mittels optischer Verfahren (Digitale Image Correlation DIC) das Rissbild und die Rissbreiten erfasst und ausgewertet. Nach Erreichen der Maximallast wurden Haftzugfestigkeiten an den Fliesen geprüft, um eine eventuelle Ablösung vom Untergrund auszuschließen.

2.4 Stahlkonstruktion Fuß (Fust)

Als Beispiel für die Stahlkonstruktion werden im Folgenden Teile der „Fust“ oder Fuß-Konstruktion erläutert. Der Stamm des Kreuzes besteht aus vier vorgefertigten Teilstützen mit einer Höhe von jeweils 7,2 m. Bei der Herstellung wurde die Stahlkonstruktion aus vorgeschnittenen Elementen in der Werkstatt ver-

schweißt und vormontiert, um Toleranzen auszugleichen (Bild 7). Anschließend, nach der Demontage und dem Transport zum Fertigteilhersteller, wurde der UHPC gegossen und die Fliesen angebracht. Die vorgefertigten Elemente werden durch Verschraubung an einem achteckigen Ring mit 3 m Durchmesser (**Bild 10**), der sich an der Spitze des Fusts befindet, miteinander kraftschlüssig verbunden. Aufgrund der Komplexität der auf den Ring einwirkenden Lasten und seiner Form erfolgte die Konstruktionsüberprüfung unter Verwendung eines Volumenelement-Submodells in Sofistik.

Soweit möglich, wurden die Verbindungen mit Bolzenverbindungen gemäß geltenden Vorschriften ausgeführt. Viele der Verbindungen zwischen den vorgefertigten Hauptbauteilen des Kreuzes waren jedoch für das Anbringen von Muttern nicht zugänglich, sodass sowohl für Schub- als auch für Axialzugverbindungen Gewindesacklochverbindungen erforderlich waren. Die meisten Zugbolzen A2-70 und A4-70 für diese Verbindungen wurden teilweise vorgespannt, um die Gebrauchstauglichkeit (Zielebene II gemäß DAST-Richtlinie 024 [17]) zu erhöhen. Für diese Verbindungen wurden Verfahrensprüfungen durch das Ingenieurbüro Stranghöner Ingenieure GmbH durchgeführt. Die betreffenden

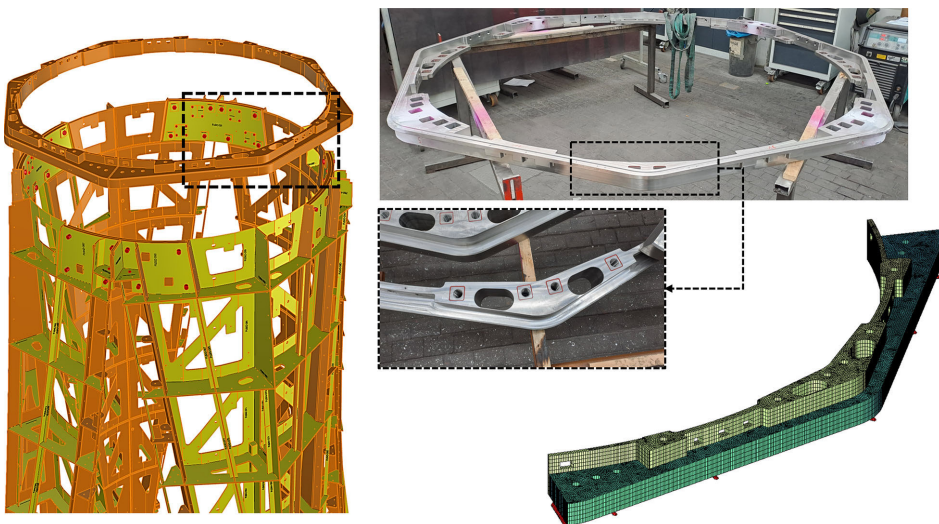


Bild 10. Links: Modell der Oberseite des Fust mit Verbindungsring; Rechts: Oktogonaler Verbindungsring und das dazugehörige Volumenmodell
Grafik: knippershelbig GmbH/Josef Gartner GmbH
Fig. 10. Left: Top steelwork of the fust with connection ring; Right: Octagonal connection ring and respective FE-model of the ring
Source: knippershelbig GmbH/Josef Gartner GmbH

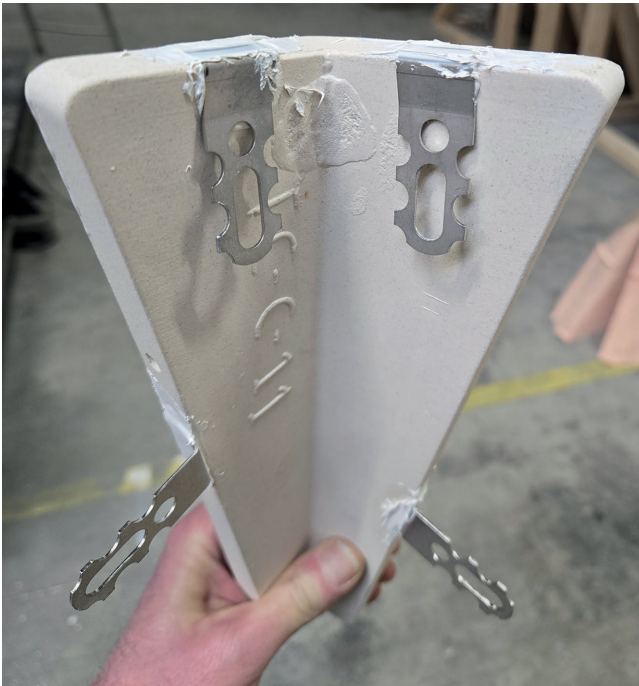


Bild 11. Stahlklammern für Fliesen mit glatter Rückseite
 Foto: durcrete GmbH
 Fig. 11. Steel Clamps for Embedding Tiles with Smooth Backside
 Source: durcrete GmbH

Bolzen wurden ohne Vorspannung als Zugverbindungen der Kategorie D verifiziert.

Die Schraubverbindungen zwischen den Hauptkomponenten des Kreuzes erforderten ausreichende Toleranzen, um die Montage vor Ort am Turm zu ermöglichen. Daher waren die Schraubenlöcher in der Regel als Nut oder in Übergröße ausgelegt. Wo immer möglich, erfolgte die Lastübertragung ausschließlich über Axialkraft- und Schubkraftschrauben oder Schubdorne/Schubkeile. Schubverbindungen erforderten nach der Montage ein sorgfältiges Verfüllen der in Übergröße hergestellten Bohrungen, um eine schubwirksame Lastübertragung sicherzustellen. Zusätzliche Komplexität bei den Verbindungsringen zwischen den Komponenten ergab sich aus der Tatsache, dass nicht nur Schrauben, sondern auch elektrische Kabel und Leitungsrohre durch einzelne Löcher in den Stahlverbindungsringen geführt werden mussten.

2.5 Keramische Fliesen

Als Hersteller der zum Großteil handgefertigten Keramikverkleidung war das katalonische Traditionsunternehmen Cerámica Cumella SL beauftragt. Das Projekt umfasste über 13 000 Fliesen in sieben verschiedenen Weißtönen. Davon waren mehr als 1 800 handgefertigte, individuell geformte Unikate, die aus 94 verschiedenen Formen hergestellt wurden. Die übrigen Fliesen umfassten über 3 100 große Dreiecke – jedes mit einer Kantenlänge von mehr als 300 mm und in 52 zugeschnittenen Varianten – sowie mehr als 8 000 kleine Dreiecke mit Kantenlängen von bis zu 150 mm, die in 18 zugeschnittenen Varianten verwendet wurden.

Um eine möglichst langlebige und dauerhafte Konstruktion zu schaffen war es ein wichtiges Entwurfsziel, dass unter dauerhaften Lasten sowohl der UHPC-Untergrund als auch die Fliesen rissfrei bleiben. Kleine Risse waren lediglich in eng begrenzten

Bereichen unter Windlast zulässig. Die einfachste Möglichkeit dies zu erreichen, wäre eine elastische Entkoppelung der Fliesen von der UHPC-Trägerschicht. Die hierfür erforderlichen elastischen Fliesenkleber sind jedoch zwangsläufig kunststoffmodifiziert und somit in Ihrer Lebensdauer begrenzt. Aus diesem Grund wurden folgende drei Ausführungsvarianten festgelegt:

- So viele Fliesen wie möglich wurden mit schwalbenschwanzförmigen Aussparungen auf der Rückseite gefertigt. Sie wurden in die Schalung eingelegt und in den UHPC einbetoniert, um einen dauerhaften festen Verbund zu haben. Für diese überwiegende Anzahl an Fliesen war es erforderlich, die Risse im UHPC zu minimieren und zu begrenzen.
- Handgefertigte Spezialformate standen produktionstechnisch nur mit glatter Rückseite zur Verfügung. Hier wurden metallische Edelstahlhalteklammern mit einer Dicke von 1 mm in seitlich in die Fliese eingefräste Schlitzlöcher eingesetzt und im UHPC einbetoniert (**Bild 11**). Auf der Rückseite des Steinzeugs wurde eine Folie angebracht, um eine ungehinderte Verformung der Fliesen infolge Schwindens und Kriechens des UHPCs als auch infolge der von außen einwirkenden Temperatureinflüsse zu ermöglichen.
- Ledig für die Reparatur beschädigter oder fehlender Fliesen kam nach intensiven Materialtests ein 2-K Kunststofffliesenkleber auf Polyurethanbasis der Fa. Mapei [18] zum Einsatz.

Der starre Verbund zwischen Fliesen mit rauer Rückseite (Schwalbenschwanzausbildung) und Beton wird anfangs durch das Schwinden des jungen Betons, aber auch später am Bauwerk durch unterschiedliche Temperaturen von Fliese und Untergrund maßgeblich auf Zwang beansprucht. Um diese Beanspruchung zu minimieren, wurden folgende zwei Maßnahmen ergriffen. Zum einen wurde gemäß der Norm DIN 18515-1 für „angemörtelte Außenwandbekleidungen“ [19] die maximale Fläche der Fliese auf 0,12 m² und die maximale Seitenlänge auf 0,49 m begrenzt. Des Weiteren waren in der Schalung die Fugen der eingelegten Fliesen mit weichem Schaumstoff verfüllt. Erst nach Abschluss des wesentlichen Betonschwindens wurden die offenen Fliesenfugen mit steifer, mineralischer Fugenmasse ausgefüllt.

2.6 Verglasung und Innenausbau

Das in diesem Projekt verwendete Spezialglas ist ebenso wie die geschwungene Form der Glas- und Tragrahmen eine Seltenheit. Daher wurden die Glasrahmen für einen seitlichen Kreuzarm noch vor Beginn des Hauptauftrags einem „Proof-of-Concept“-Test unterzogen. Diese Bewertungen wurden im Frühjahr 2024 als PMU (Performance Mock-Up) auf dem Gelände von Gartner durchgeführt, noch vor dem VMU (Visual Mock-Up). Das Testprogramm umfasste Luft-/Wasserdichtheitstests sowie Aufpralltests (mit harten und weichen Körpern), siehe auch **Bild 12**. Ähnliche Prüfungen wurden für die Spitzen der seitlichen Arme durchgeführt, die speziell entwickelt wurden, um die Belüftung innerhalb der Armstruktur zu erleichtern. Das verwendete Sicherheitsglas besteht aus 2 x 6 mm doppelt gekrümmten Floatglas sowie einer dritten Schicht aus Glaspyramiden, sowohl strukturierte als auch transparente Gläser, die eine Collage bilden. Die innere Schicht besteht aus beschichtetem Sonnenschutzglas und das Laminat zwischen den Scheiben ist eine Kombination aus PVB-Folien und SG-Zwischenschichten.

Um Gaudís architektonische Vision zu verwirklichen, wurde gemäß dem Archiv der Sagrada Familia folgende Vorgabe umge-

setzt: „Wie aus den Tempelarchiven hervorgeht, wollte Gaudi, dass das Kreuz bei Tag strahlt und bei Nacht leuchtet. Aus diesem Grund wurde weiß glasierte Keramik und Glas verwendet – zwei Materialien, die leuchtend sind und gleichzeitig den Witterungseinflüssen standhalten.“ [1]

Als Ergebnis umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurde zu diesem Zweck eine dritte Glasschicht mit pyramidenförmigen Collagen in das Verbundsicherheitsglas integriert. **Bild 13** zeigt dies am Fuß (links) und am Arm (rechts) der Montageplattform in 54 m Höhe. Zu den Techniken, die bei der Herstellung dieser Collagen zum Einsatz kommen, gehören das Fräsen, Gießen und Schleifen von Glaspyramiden. Die Pyramiden an der Seitenverglasung sind gefräst, während die Pyramiden an der Basis- und Kreuzspitzenverglasung aus gegossenem Glas bestehen (Bild 13, rechts), das teilweise poliert wurde, um ein transparentes Erscheinungsbild zu erzielen. Alle Glasarten sind 3D-gewölbt, um der komplexen Geometrie des Kreuzes zu folgen. Das in Barcelona ansässige Spezialunternehmen Cricursa fertigte die gesamte Außenverglasung für das Projekt.

Für die Innenwandverkleidung wurden weißer Onyx und Alabaster ausgewählt, während die Bodenflächen mit Platten in schwarzer Schiefer gestaltet sind (**Bild 14**). Die Geometrie der 40 mm dicken Natursteinverkleidung ist auf die Edelstahlrippen der einzelnen Bauteile abgestimmt. Das komplexe dreidimensionale Befestigungssystem für die Verkleidung besteht aus sechssachsig verstellbaren Halterungen, die von Gartner entwickelt wurden. Die Steinbearbeitung wurde von lokalen Steinmetzen in Katalonien (Spanien), unter Verwendung unter Verwendung spezieller, von Gartner gelieferter Werkzeuge und Komponenten durchgeführt.

3 Fertigung und Montage

3.1 Mock-Up

Im Sommer 2024 wurde ein Modell des Kreuzes angefertigt, um zu prüfen, ob die geplanten Fertigungsmethoden funktionieren. Dieses Musterteil, das die Hälfte eines Arms (Längsschnitt) einschließlich der Innenausstattung umfasste, wurde im Herbst 2024 in Barcelona auf dem Vorplatz der Basilika der Öffentlichkeit präsentiert.

Schnell zeigte sich, dass die Toleranzen bei der dreidimensionalen und doppelt gekrümmten Schalenkonstruktion das bestimmende Thema in der Fertigung sein würden. Infolge des Wärme-



Bild 12. Test zu weichem Aufprall der Glaskonstruktion von Innen

Foto: Josef Gartner GmbH

Fig. 12. PMU Softbody-Test from Inside Position

Source: Josef Gartner GmbH

verzugs beim Schweißen sind die Maßabweichungen der Stahlkonstruktion beträchtlich, selbst wenn erfahrene Fachkräfte zum Einsatz kommen. Das Einschweißen des Bewehrungsnetzes und die Innenbleche für die Konterschaltung war handwerklich anspruchsvoll. Die keramischen Fliesen verkürzen und verwinden sich je nach Lage im Brennofen unterschiedlich und werden auch bei einem einheitlichen Typus mit unterschiedlichen Toleranzen angeliefert. Wegen der Sonderanfertigung für dieses Projekt war



Bild 13. Pyramidenförmige Erhöhungen auf den Fliesen und Glasseiben am Fust (links) und am Arm (rechts).

Foto: Josef Gartner GmbH

Fig. 13. Pyramid-shaped Elevations on the Ceramic Tiles and on the Curved Glass Panes of the Fust (left) and arm (right)

Source: Josef Gartner GmbH



Bild 14. Ansicht des Kreuzes von Innen Foto: Josef Gartner GmbH
Fig. 14. View into the inside of the cross Source: Josef Gartner GmbH

eine einheitliche Kalibrierung durch Vorsortierung der Fliesen nicht möglich. Im Gegensatz dazu ist die mittels Schalungsroboter aus Schaum gefräste Schaloberfläche wie die Zeichnung präzise und exakt, passt aber genau deshalb nicht zum Stahlgrundgestell und den einzelnen Fliesen. In intensiven Gesprächen wurden Passungen und Toleranzen besprochen sowie zulässige Ausgleichsmaßnahmen wie Aufweitung der Fugenbreiten zwischen den Fliesen festgelegt.

3.2 Umsetzung des Stahlbaus

Die Materialeigenschaften und Schweißanforderungen von Duplexstahl, einem magnetischen nichtrostenden Stahl, stellen besondere Herausforderungen bei der Verarbeitung dar. Obwohl alle für das Schweißen von nichtrostendem Stahl zertifizierten Schweißer technisch für Duplexstahl qualifiziert sind, ist die Verarbeitung im Vergleich zu anderen Typen nichtrostenden Stahls komplexer. Daher wurde das Schweißteam gezielt auf der Grundlage von Arbeitsproben ausgewählt, die vor Beginn der Serienfertigung für das Projekt aus Duplexstahl geschweißt worden waren. Für das Schweißen der Bewehrung aus NiCr 1.4362 waren zusätzliche Schweißprüfungen und Arbeitsproben erforderlich. Zu Beginn des Projekts wurden die Kennlinien der Schweißmaschinen erfolgreich für Duplexstahl optimiert. Darüber hinaus wurde ein spezieller Schweißdraht eines bestimmten Herstellers als besonders gut für das Projekt geeignet identifiziert.

Die festgelegte Ausführungsklasse ist EXC2 in Verbindung mit WIC2 gemäß EN 1090-2:2018 „Technische Regel für Stahltragwerke“ [20]. Die Einhaltung der geometrischen Toleranzen der



Bild 15. Stahlbau eines horizontalen Armes mit Duplex Stahl und Chromstahlbewehrungsnetz inklusive des drehbaren Transportgestells
Foto: Josef Gartner GmbH
Fig. 15. Steel Works of a Horizontal Arm made of Duplex-Steel and Stainless Steel Reinforcement incl. rotating transport frame
Source: Josef Gartner GmbH

Stahlkonstruktion, die durch das Verschweißen vorgeschchnittener Flachstahlplatten teilweise mit Durchschweißnähten verbunden wurden, war aufgrund der Verformungen und Verwindungen des Materials durch den Schweißprozess äußerst komplex. Durch intensiven Einsatz und viel Arbeit konnten die Seitenarmkomponenten (mit einer Länge von 3 700 mm) innerhalb eines Toleranzbereichs von 9-11 mm gefertigt werden. Die Schweißnähte wurden einer Farbeindringprüfung (PT), einer Sichtprüfung (VT) und einer Ultraschallprüfung (UT) unterzogen.

Die Reinigung der Stahlkonstruktion vor dem Gießen des UHPC erwies sich als komplexes Unterfangen. Aufgrund der dichten Bewehrung und Rippenstruktur mussten Schweißspritzer manuell entfernt werden. Über 44 000 Schweißverbindungen zwischen dem Bewehrungsstahl und den Duplexrippen wurden gereinigt. Anschließend wurden die gesamten Stahlkonstruktionen mit einer Breite von bis zu 5 000 mm (**Bild 15**) glasperlgestrahlt, um Glühfarben zu entfernen und eine langfristige Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten. Nichttragende Elemente wie Fensterrahmen bestehen aus nichtrostendem Stahl 316 (V4A).

Die Schraubverbindungen zwischen den Hauptkomponenten des Kreuzes erforderten Toleranzen, um eine Montage vor Ort am Turm zu ermöglichen. Daher waren die Schraubenlöcher in der Regel geschlitzt oder überdimensioniert (**Bild 10**). Wo immer möglich, erfolgte die Lastübertragung über reine Axialkraft- und reine Schubschrauben oder Schubkeile, wie zum Beispiel an den Verbindungsplatten der Fust-Säulen, die in **Bild 16** dargestellt

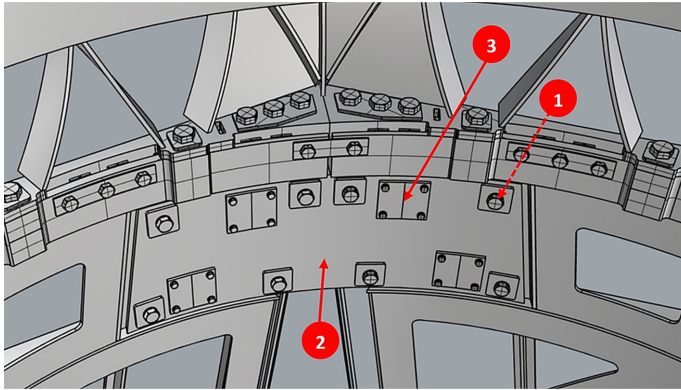


Bild 16. Gekrümmte Verbindungsplatte (2) und den Säulen des Fusts mit Zugbolzen (1) und Schubknaggen (3)

Foto: knippershelbig GmbH/Josef Gartner GmbH

Fig. 16. Curved connection plate (2) of the legs of the Fust with tension bolts (1) and shear keys (3) Source: knippershelbig GmbH/Josef Gartner GmbH



sind. Bei Schubverbindungen mussten die überdimensionierten Bohrungen nach der Montage sorgfältig nachfeilt werden, um eine schubtragende Lastübertragung zu ermöglichen.

3.3 UHPC

Nach den Erfahrungen aus dem Mockup wurde festgelegt, dass die auf Holzkonstruktion aufgelegte Schalhaut (Bild 17) möglichst großformatig ausgeführt wird. In die Schaumstoffkonstruktion werden in die vorgefrästen Aussparungen die Fliesen eingelegt, die hervorstehenden Schaumbrücken waren die Platzhalter für die späteren Fugen. Da es mehrere 100 Typen an Fliesen gibt, die sich in Geometrie oder Farbe unterscheiden war es wichtig, dass die werkseitige Nummerierung auf der Rückseite der Fliesen korrekt ist und die Lagerverwaltung gut organisiert war. Anschließend wurde die Stahlkonstruktion mit dem integrierten Bewehrungsnetz auf die Schalhaut gehoben und der korrekte Abstand eingestellt. Danach wurde bei den flachen Feldern der Beton feldweise direkt auf die vorgesehene Dicke von 55 mm eingefüllt. Bei den steileren Betonierabschnitten ist eine rückseitige Verblechung angeordnet, welche als zweite Schalhaut oder Konterschaltung dient. Hier wurde der Beton über kleinere Öffnungen (Bild 7 rechts) stufenweise aufgefüllt, wobei sowohl die korrekte Entlüftung als auch der vollflächige Verguss kontrolliert wurden. Nach Abschluss aller Betonagen, was für ein Bauteil etwa 3 Wochen Zeit benötigte, wurden die Bauteile abgehoben, restliche Fliesen in den Eckbereichen aufgeklebt und die Fliesen im Fertigteilwerk verfugt. Anschließend wurden die Bauteile mittels Schwertransporter direkt zur Baustelle nach Barcelona gebracht und dort der Zusammenbau sowie der restliche Ausbau der Teilmodule durchgeführt.

3.4 Transport und Montage

Die Gewichtsreduzierung war grundsätzlich ein Thema, zum einen, um den Vorgaben der statischen Berechnung gerecht zu werden, und zum anderen, um sicherzustellen, dass die genehmigten Transportgewichte und die Kranhakenlast nicht überschritten werden.

Die Hauptkomponenten bestehen aus 3D-Schalenkonstruktionen. Da diese aufgrund der empfindlichen Keramikfliesen und Glasstrukturen nicht an ihren Außenflächen abgestützt werden können, mussten für alle Komponenten des Kreuzes maßge-

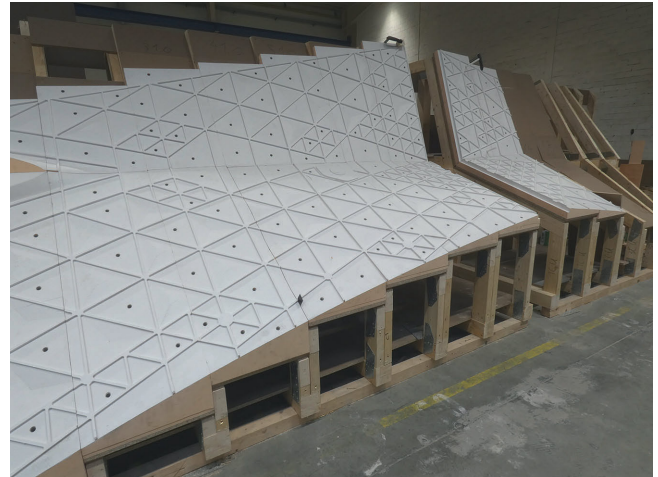


Bild 17. Schalhaut auf hölzerner Rüstung, vorbereitet für das Einlegen der Fliesen. Foto: durcrete

Fig. 17. Formwork Skin on a Wooden Scaffolding, Prepared for the Positioning of Tiles. Source: durcrete GmbH

schneiderte Stützkonstruktionen entwickelt und gebaut werden. Die seitlichen Arme stellten in dieser Hinsicht eine der größten Herausforderungen dar, da sie vollständig mit Glas oder Fliesen verkleidet sind. Um dies zu lösen, wurde ein radiales Verstrebungssystem in Form einer „Wagenrad“-Aufhängung mit einem Gewicht von über 3 600 kg entwickelt (Bild 15). Eine zentrale Welle wurde entlang der Längsachse des Seitenarms eingesetzt und mittels Zug- und Druckelementen an den inneren Stahlrippen abgestützt. Diese Konstruktion ermöglichte den Transport der Seitenarme mit maximalen Transportabmessungen von 3 500 x 3 500 x 7 500 mm auf einem Tieflader, ohne die Integrität der empfindlichen Außenflächen zu beeinträchtigen. Darüber hinaus musste der Transportrahmen gewährleisten, dass der Arm um 360° Grad entlang seiner Längsachse gedreht werden konnte, um die Montage der UHPC-Bauteile zu erleichtern. Zudem wurde die Transportausrichtung des Arms um 45° Grad gegenüber seiner endgültigen Einbaulage gedreht; diese Anpassung war notwendig, um die vorgeschriebenen maximalen Transportabmessungen einzuhalten.

Um die Maßtoleranzen und die strukturelle Umsetzung zu verbessern, wurde der Innenkern (Nucleus) in lediglich zwei separaten Halbschalen hergestellt und anschließend transportiert



Bild 18. Ankunft des Nukleus um 7:00 Uhr morgens vor der Sagrada Família (Carrer de Mallorca) Foto: Josef Gartner GmbH
 Fig. 18. Nucleus arriving at 07:00 a.m. at the Sagrada de Família (Carrer de Mallorca) Source: Josef Gartner GmbH



Bild 19. Montage des Nukleus-Unterteils an die Fußkonstruktion
 Foto: Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família
 Fig. 19. Installation of the Lower Nucleus Element to the Fust
 Source: Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família

(Bild 18). Unter Berücksichtigung dieser Spezifikationen erreichte der Nucleus – einschließlich seines Transportrahmens – eine Gesamtbreite von bis zu 5 200 mm. Dies erforderte eine sorgfältige und proaktive logistische Planung. Die Genehmigungen mussten bis zu drei Monate im Voraus für feste Zeitfenster eingeholt werden und wurden letztendlich nur für dreispurige Autobahnen und Transportaktivitäten zwischen 22:00 und 6:00 Uhr erteilt. Nach Abschluss der UHPC-Arbeiten zwangen die Transportbeschränkungen in Frankreich dazu, den Nucleus über Belgien und mittels Fähre an die Nordküste Spaniens zu transportieren. Von dort aus wurde die letzte Etappe der Reise nach Barcelona in Katalonien auf der Straße zurückgelegt. Die Transportwege wurden in enger Zusammenarbeit mit den Spediteuren ausgewählt, wobei auch die Idee entstand, den Nucleus auf dem Seeweg zu transportieren und Frankreich zu umgehen. Insgesamt dauerte dieser spezielle Transport 18 Tage, wodurch die sechs Tage Transportzeit per Lkw für die seitlichen und oberen Arme im Vergleich dazu geringfügig erscheinen.

Es ist anzumerken, dass in Barcelona aufgrund der belebten Innenstadt der Kirche keine Zwischenlagerstätte vorgesehen

war. Daher mussten die Ankunftszeiten mit absoluter Präzision geplant werden und durften keinesfalls auf Wochenenden fallen. Um mögliche Wartezeiten vor der Einfahrt in die Stadt unter Polizeibegleitung zur Basilika zu berücksichtigen, wurde ein überwachter Parkplatz außerhalb der Stadtgrenzen genutzt. Bei der Ankunft wurden die seitlichen Armkomponenten mit einem Mobilkran von den Anhängern entladen und in Reichweite des Turmdrehkrans positioniert, da die Lkw nicht in den Aufnahmebereich des Krans gelangen konnten. Dieses Verfahren musste für den Kern weiter angepasst werden, da diese Bauteile viel zu breit für das Tor der Baustelle waren. Sie wurden mit dem Mobilkran direkt über den Baustellenzaun zum Aufnahmegebiet des Turmdrehkrans gehoben und von dort auf die Montageebene in 54 m Höhe gehoben (Bild 19).

Der große Turmkran wird noch eine Weile Teil der Skyline von Barcelona bleiben. Er wird zwar teilweise abgebaut, wird aber weiterhin benötigt, um das Gerüst am Jesus-Turm abzubauen und die „Glory“-Fassade zu errichten.

4 Anerkennung

Zurecht hat El Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE) den Bauherren für seine Tätigkeit an der Basilika mit dem spanischen nationalen Baupreis 2025 ausgezeichnet. Mit dieser Auszeichnung werden Projekte gewürdigt, die einen wesentlichen Beitrag zur Qualität, Nachhaltigkeit und sozialer Nachhaltigkeit leisten. Weitere Bilder der Baustelle sowie Beschreibung der Bauweise sind in der lesenswerten Broschüre [21] enthalten. Die an diesem Projekt beteiligten Unternehmen bedanken sich bei der Stiftung für die zielorientierte Zusammenarbeit und angeregten Diskussionen auf hohem fachlichem Niveau, in deren Zentrum nie Formalien, sondern immer ein bestmögliches Bauwerk für die Menschheit stand. Die Autoren bedanken sich bei allen Projektbeteiligten für die Unterstützung mit Bildern, Daten, Diskussionen und Angaben für diese Publikation.

L I T E R A T U R

- [1] *Marti Matlleu, J. (Secretary to Antoni Gaudí):* In Vida olotina : revista quinzenal nacionalista, 1915-1919, Olot.
- [2] *Hegger, J.; Glock, Ch.; Curbach, M. et al.:* Innovative Concrete Structures – Tradition and Future. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 07-08, S. 181-195. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-15.
- [3] NF P 18-70 -07/2016: Concrete – Ultra-high performance fibre-reinforced concrete – Specifications, performance, production and conformity, AFNOR.
- [4] NF P 18-710 -04/2016: National addition to Eurocode 2 – Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC), AFNOR.
- [5] BS EN 1992-1-1:2004+A1:2014, Eurocode 2. Design of concrete structures. General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures + Nationaler Annex Spanien UNE-EN 1992-1-1:2004/AN:2015-10.
- [6] BS EN 1993-1-1: 2005+A1:2014: Eurocode 3 – Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [7] BS EN 1994-1-1:2004: Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – General rules and rules for buildings + Nationaler Annex Spanien AN/UNE-EN 1994-1-1:2013.
- [8] BS 8298-5:2023: Design and installation of natural stone cladding and lining – Internal cladding and lining. Code of practice, BSI.
- [9] Richtlinie „UHPC“, Österreichische Bautechnik Vereinigung – ÖBV, 2023.
- [10] BS EN 1993-1-4: 2006+A2:2020: Eurocode 3 – Design of steel structures – Stainless steel structures.
- [11] NCSE-02: 2022 – Norma de construcción sismorresistente.
- [12] Código Estructural 2021.

- [13] EH 88: 1988: Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado.
- [14] BS EN 1990: 2002+A1:2005: Eurocode 0 – Basis of structural and geotechnical design.
- [15] BS EN 1993-1-2:2005: Eurocode 3: Design of steel structures – Structural fire design.
- [16] *Sagmeister, B.*: Maschinenbauteile aus zementgebundenem Beton. DIN, Beuth Verlag, Berlin 2017.
- [17] DAST-Richtlinie 024: 2024-09: Anziehen von geschraubten Verbindungen mit Verbindungsmitteln der Abmessungen M8 bis M39.
- [18] MAPEI: Ultrabond ECO PU 2K.
- [19] DIN 18515-1:2023-06: Außenwandbekleidungen – Grundsätze für Planung und Ausführung – Teil 1: Angemörtelte Fliesen und Platten.
- [20] EN 1090-2:2018: Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures.
- [21] TEMPLE The Magazine of the Sagrada Família, 2026 Edition, 160 Year, <https://blog.sagradafamilia.org/en/temple-magazine/>.
- [22] Nichtrostender, kaltverformter, gerippter Betonstahl in Ringen B500A NR, Werkstoff 1.4362, Nenndurchmesser: 6 bis 12 mm. AbZ Nr. Z-1.4-228 vom 24.05.2022, DiBt.

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

P D Dr.-Ing. habil Bernhard Sagmeister

info@durcrete.de
Durcrete GmbH
Am Huttig 4, 65549 Limburg

Dr. Arch. Mauricio Cortés Sierra

mcortes@sagradaFamilia.org
Fundació Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família
C/Mallorca, 401, 08013 Barcelona, Spanien

Jonas Weissenburger

j.weissenburger@permasteelisagroup.com
Josef Gartner GmbH
Gartnerstr. 20, 89423 Gundelfingen

Dr.-Ing. Thiemo Fildhuth

T.Fildhuth@knippershelbig.com
knippershelbig GmbH
Tübinger Straße 12-16, 70178 Stuttgart

Steve McKechnie

Steve.McKechnie@arup.com
Ove Arup & Partners Ltd.
8 Fitzroy Street, London, W1T 4BJ, United Kingdom