

# LEARNING FROM THE PAST

*von Katharina Marchal (Text)*

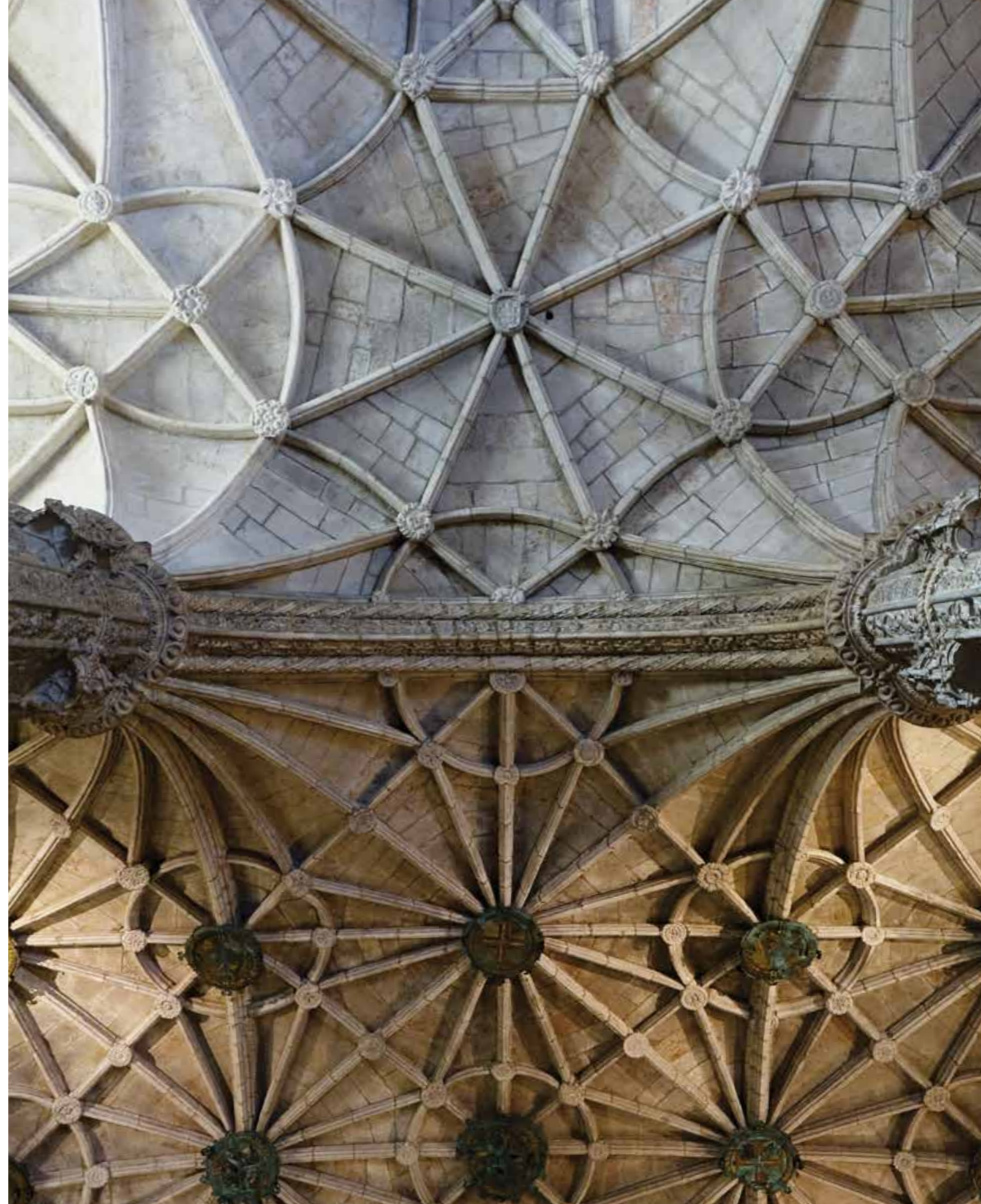
Die Komplexität von Steingewölben oder wie wir Material sparen können.

Der Blick in das hoch aufragende Kreuzrippengewölbe einer gotischen Kathedrale wirft immer wieder die Frage auf: Wie konnten Menschen jener Zeit solche hochkomplizierten, gigantischen und zugleich grazilen Konstruktionen mit primitivsten Hilfsmitteln umsetzen? Das alles ohne unser heutiges Handwerkszeug der Mathematik und Statik, ohne Berechnungsmöglichkeiten und 3D-Darstellung mithilfe von Computern? Eine Antwort auf diese Frage gibt uns der Ingenieur und Architekt Philippe Block von der Block Research Group (BRG), Professor am Institute of Technology in Architecture (ITA) an der ETH Zürich: «Die gotischen

Baumeister und Kirchenbauer erstellten kleine Modelle der Bauwerke zur Analyse, um dann ihre Erfahrungen in den grösseren Massstab zu übersetzen.»

Neben dem Prinzip «Trial und Error» sammelten die gotischen Baumeister als Parliere und Steinmetze praktische Erfahrungen, die sie mündlich oder in Form von Zeichnungen ihren Schülern und Kollegen in den Steinmetzverbänden offen weitergaben. Da Steinmetze an vielen Kathedralen in ganz Europa arbeiteten, konnte das Wissen rasch verbreitet werden. Philippe Block hat sich bereits in seiner Dissertation am MIT (Massachusetts Institute of Technology) mit der Statik der gotischen Kreuzrippengewölbe auseinandergesetzt und sie eingehend studiert. In einer Studie präsentierte er eine praktische Methode für dreidimensionale statische Gleichge

Detail des Kreuzgewölbes im spätgotischen Hieronymitenkloster in Lissabon, Portugal.





Konstruktion des Mapungubwe National Park Interpretation Centre in Limpopo, Südafrika, 2008.

wichtsanalysen für Mauerwerksgewölbe. Dabei wurden verschiedene Annahmen über die Kräfteverläufe von gotischen Gewölben gemacht und eine Stabilitätsanalyse komplexer Gewölbe wie das der Sherborne Abbey in Dorset, England, um 1490 vollendet, durchgeführt. Block hebt in diesem Zusammenhang hervor: «Mauerwerk ist ein grossartiger Baustoff, doch es gibt ein grosses Problem: die Stabilität. Gute Proportionen und die richtige Geometrie sind die wichtigsten Parameter.» Um dieses Problem zu veranschaulichen, entwickelten Philippe Block und sein Team eine dreidimensionale grafische Statik. Die grafische Statik ist ein Verfahren zur Ermittlung des statischen Gleichgewichts von Tragwerken mittels geometrischer Zeichenmethoden bzw. Abbildungen. Sie basiert auf dem Zusammenhang zwischen der geometrischen Form und dem inneren Kräftefluss eines Tragwerks, der durch reziproke Diagramme, den Lageplan und den Kräfteplan, dargestellt wird. Die Block

Research Group entwickelte an der ETH Zürich seit 2010 eine internetbasierte Lehr- und Lernplattform für den Tragwerksentwurf namens eQuilibrium. Sie dient nicht nur zur Veranschaulichung der Methoden der grafischen Statik, sondern erläutert zugleich, wie komplexe Tragwerke mithilfe einfacher geometrischer Methoden entworfen und analysiert werden können.

#### VON DER VERGANGENHEIT LERNEN

Die Block Research Group stellt sich immer wieder die Frage: «Was können wir von der Vergangenheit lernen, und wie können wir dieses Wissen nutzen oder weiterentwickeln, um heutigen und künftigen Bedürfnissen gerecht zu werden?» Diese Frage bot auch die Grundlage für die Teilnahme an der Architekturbienale in Venedig 2016. In der dazugehörigen Ausstellung «Beyond Bending», die in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Ochsendorf, DeJong & Block (ODB Engineering) und der Escobedo Group entstand, wurden anhand vier Arten von gewölbten Deckensystemen, einer Reihe von Kräftediagrammen und des Armadillo-Gewölbes gezeigt, wie dank eines besseren Verständnisses der dreidimensionalen Verteilung von Kompressionskräften natürliche Ressourcen geschont und einfache Materialien wie Erde und Gestein neu eingesetzt werden können. Das Projekt zum Armadillo-Gewölbe stellte den Höhepunkt der Ausstellung dar und ging auf jahrelange Forschung durch die Teammitglieder in allen Bereichen des Konstruierens mit Steinen zurück. Es ist eine Art Resümee der eigenen Projekte, gleichzeitig entstand es auch aus den Erkenntnissen von historischen Beispielen. Nicht nur die Wahl des Materials hat das Gewölbe aus 399 dünnen Kalksteinplatten mit einigen der bedeutendsten Kathedralen und Bauwer-



#### PHILIPPE BLOCK

ist ausserordentlicher Professor für Architektur und Tragwerk am Institut für Technologie in der Architektur an der ETH Zürich. Er ist Leiter der Block Research Group (BRG). Als Gründungspartner vom Ingenieurbüro Ochsendorf DeJong & Block (ODB Engineering) erstellt er international Gutachten zum Baubestand und entwickelt neue unbewehrte Stein- und Ziegelkonstruktionen.

[www.block.arch.ethz.ch](http://www.block.arch.ethz.ch)

ken der Welt gemein. Philippe Block begründet die Wahl dieses Materials beim Armadillo-Gewölbe damit: «Ein grosser Vorteil des relativ weichen Kalksteins ist, dass er von Maurern in Handarbeit angepasst werden kann. Im Stein gibt es kaum natürliche Schwachstellen, kaum Risslinien. Obwohl die Schale des Gewölbes nur wenige Zentimeter dick ist, betrug die Belastung überall lediglich 1:100 von der Druckfestigkeit des Steins, somit konnte ein Versagen des natürlichen Materials unter Last ausgeschlossen werden.» Eine wesentliche Voraussetzung zum Gelingen der Arbeit bildete die nahe Zusammenarbeit von Ingenieuren, Architekten und erfahrenen Steinmetzen während des gesamten Prozesses.

#### VON DER GOTIK IN DIE ZUKUNFT

Das katalanische Gewölbe bildete den Ausgangspunkt der Forschung und der Weiterentwicklung vieler Projekte von der Block Research Group. Aus Mangel an Bauholz und zur Vermeidung von aufwendigen Schalungskonstruktionen wurde diese materialsparende Gewölbertechnik aus rein druckbeanspruchenden Ziegeln in Spanien vor mehr als sechshundert Jahren entwickelt. In der katalanischen Gotik wurde das katalanische Gewölbe vorwiegend für die Herstellung flacher Geschossdeckengewölbe angewendet, gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte vor allem Antoni Gaudí etwa bei der Sagrada Familia, seit 1882 im Bau, neue Anwendungen der katalanischen Gewölbetechnik. Der spanische Industriearchitekt Rafael Guastavino, der 1881 in die USA emigrierte, verbreitete die katalanische Wölbungstechnik in Nordamerika und entwickelte sie weiter. Seine Gewölbe zeichneten sich durch beeindruckende Spannweiten von bis zu 30m aus – siehe Grand Central Terminal, Warren and Wetmore, NYC, 1912 bis 1913. Guastavino erkannte den Marktvorteil der feuersicheren Konstruktion gegenüber Holz- und Eisenkonstruktionen.

Beim Mapungubwe National Park Interpretation Centre in Limpopo, Südafrika (2008), das der Ingenieur John Ochsendorf unter Mithilfe von Philippe Block in Zusammenarbeit mit Peter Rich Ar-



In Bearbeitung: Sicht auf die Konstruktion des Sudu (Sustainable Urban Dwelling Unit) in Addis Abeba, Äthiopien. Tragwerk von der Block Research Group, 2010.

chitect erstellte, stand das katalanische System Modell. «Wir verwendeten anstatt Flachziegeln einen aus komprimierter Erde hergestellten Ziegel mit einem geringen Zementzusatz, der Ziegel wurde an der Luft getrocknet», erklärt Block. Das menschliche Bauteilmass des Ziegels und die simple Konstruktion schaffen ideale Grundvoraussetzungen für eine Partizipation am Bauprozess durch lokale Arbeitskräfte. «Die Ziegel wurden in Handarbeit durch die Dorfgemeinschaft gefertigt und vor allem von Frauen zur Baustelle getragen», erzählt Philippe Block stolz. Bei diesem System sind die Ziegel nur auf Druck beanspruchbar. Das heisst, zuerst werden die Bögen erstellt, danach kann das zentrale Mittelstück des Gewölbes gebaut werden. Jeder Abschnitt muss für sich stabil sein. Das Gebäudeensemble umfasst eine Ausstellungsfläche von 3000 m<sup>2</sup>, die durch eine Reihung von Kuppeln und Gewölben mit Spannweiten bis 18m überdacht wird. «Dieses Projekt war die günstigste Vari-



ante, trotzdem war es zu teuer, um beispielsweise für Wohnbauten eingesetzt zu werden, da es keinen Zement und Stahl vor Ort gibt», erklärt uns Philippe Block und setzt fort: «Deshalb suchten wir nach einer besseren Lösung, wie wir mit der lokalen Bevölkerung kostengünstig bauen können.» Das Team wendete sich wieder dem Guastavino-System zu, bei dem Böden aus Ziegeln zusammengesetzt werden. «Da bei gewissen Lastfällen eine Bogenform durch Rippen ausgesteift werden muss, erzeugt man eine leichte Version eines Trägers», beschreibt Philippe Block dieses Deckensystem. Es wurde beim Forschungsprojekte zur Sudu (Sustainable Urban Dwelling Unit) angewendet und 2010 als Kooperationsprojekt der Block Research Group an der ETH Zürich mit Professor Dirk Habel am Ethiopian Institute of Architecture, Building Construction and City Development durchgeführt. Das kubische Gebäude ist 5 mal 8 m gross und bietet je nach Stockwerkshöhe Wohnraum für ein bis sechs Familien. Die Rohbaukosten betragen 3500 Euro, das heisst weniger als 45 Franken pro m<sup>2</sup>. Dieses Low-Cost-Projekt eignet sich besonders für äusserst ressourcenarme

Regionen mit Bedarf an verdichtetem Wohnraum. Als Konzept der prototypischen Mauerwerksbauten basiert es auf der Ressourcenverfügbarkeit lokaler Materialien (Flachziegel, Stampflehm) und Arbeitskräfte und verringert zugleich den Verbrauch importierter Materialien wie Stahl, Beton und Bauholz.

**«AS HANGS THE FLEXIBLE LINE, SO BUT INVERTED WILL STAND THE RIGID ARCH»** Hooke (1676)

«Wenn eine hängende Konstruktion, die auf Zug beansprucht wird, invertiert wird, steht sie ohne Problem auch als druckbeanspruchte Konstruktion», erklärt Philippe Block. Grundsätzlich kollabieren druckbeanspruchte Konstruktionen leichter als auf zugbeanspruchte Konstruktionen, die in sich keine Steifigkeit brauchen. Das Steingewölbe ist deshalb eine viel grössere statische Herausforderung als eine Hängebrücke oder

Mit der Filigranität einer Eierschale und frei von jeglicher Stahlbewehrung präsentiert sich das expressive Armadillo Vault als Höhepunkt an der Architekturbieniale 2016 in Venedig.

etwa eine Zeltdachkonstruktion. Das für die Architekturbieniale in Venedig 2016 konzipierte Armadillo Vault ist ein Beweis, wie mit wenig Material und in kürzester Zeit ein kompliziertes Steingewölbe errichtet werden kann. Philippe Block fasst die Konstruktion stichwortartig zusammen: «Bis zu 16 m Spannweite auf 75 m<sup>2</sup> Grundfläche, in der Mitte nur 5 cm dick, 24 t Stein wurden in 399 Teile zugeschnitten, kein Klebstoff, kein Mörtel, keine Bewehrung, lediglich trockener Stein. Nur für die Montage brauchte es eine Schalung als Lehrgerüst.» Das Team wurde bei der Umsetzung vor zwei grosse Herausforderungen gestellt. Da das Arsenal als historisches Gebäude unter Schutz steht, konnten keine Verankerungen am Boden angebracht werden, sondern es mussten solide Fundamente unabhängig vom Grund aufgebaut werden. Zur weiteren Herausforderung wurden die lediglich fünf Monate Zeit für Entwurf, technische Planung, Überzeugungsarbeit bei den italienischen Ingenieuren, Herstellung und Aufbau. Um diese kurze Zeit einzuhalten, mussten sein Team und die Struktur sehr effizient sein. Hilfe boten dafür speziell entwickelte Computerprogramme. Nach dem Skizzieren von Hand wurde mit «RhinoVAULT» (selbst entwickelte und frei verfügbare Formfindungssoftware) der Kräfteverlauf bestimmt, und es wurden die Geometrie und auch der Arbeitsprozess bei der Herstellung und Montage vor Ort optimiert. «Wir machten Hunderte Wiederholungen, um schlussendlich die Geometrie zu optimieren, die Konstruktionstechnik zu entwickeln und die Materialien zu verstehen. Es war ein besonders spannendes Projekt, weil wir gleichzeitig unser eigener Kunde und Entwerfer waren», erzählt Block begeistert. Um ein so komplexes Projekt in einer sehr kurzen Zeit durchzuführen, braucht man hundertprozentiges Vertrauen zu und Verständnis für einen Hersteller, der auf den Millimeter genau arbeitet. Andererseits musste der Hersteller volles Vertrauen haben, dass die Konstruk-

tion wirklich stehen würde. Aus diesem Grund wählte Philippe Block ein texanisches Unternehmen, die Escobedo Group, welche er durch die Zusammenarbeit von mehreren Projekten bereits gut kannte.

Um die Standsicherheit des unbewehrten, mörtellosen Steingewölbes zu analysieren, verwendete das Team die Diskrete Element-Modelle-Methode (DEM): «Keine übliche Methode», beschreibt Block diese spezielle Art und Weise, auf Mauerwerkskonstruktionen zu blicken. «Für das Design stützten wir uns auf meine Doktorarbeit, für die Optimierung der Herstellung und für die Geometrie brauchten wir das gebündelte Know-how des gesamten Teams, und für die Analyse der Struktur nutzten wir die Doktorarbeit von DeJong», fasst Block zusammen. Schlussendlich blieb ein Monat für die Herstellung. Um Zeit zu sparen, beschloss man, die Rohlinge beim Zuschneiden in der Maschine nicht neu zu referenzieren, heisst nicht umzudrehen. «Doch dafür mussten wir den Stein dementsprechend entwerfen», erklärt Block. Die Oberseite jedes Gewölbesteins ist eben und resultiert aus der flachen Unterseite des ursprünglichen Steinquaders. Die Gewölbeunterseite ist durch eng nebeneinanderliegende Kreissägeblasschnitte geformt. Die entstehenden kammartigen Steinfinnen wurden nachträglich manuell abgeschlagen, um eine rau strukturierte, doppelt gekrümmte Oberfläche zu erzeugen. Da zum Aufbau auf der Biennale lediglich 2,5 Wochen blieben, musste die Montage vorab geübt und die Platzierung der Steine genau gemessen und festgelegt werden. Die Einschränkungen vor Ort verunmöglichten die Benutzung von grösseren Kränen, das heisst, nahezu jeder Stein musste von Hand und mit einfachen Hilfsmitteln platziert werden. «Diese Konstruktion des Armadillo Vault» resümiert Philippe Block, «zeigt uns, wie durch eine pure Form an Materialstärke gespart werden kann.»



Nahaufnahme des Gewölbesteins des Armadillo Vault, dessen kammartige Steinfinnen nachträglich von Hand abgeschlagen wurden.