

## Das katalanische Gewölbe – Ein Konstruktionsprinzip mit Geschichte und Zukunft

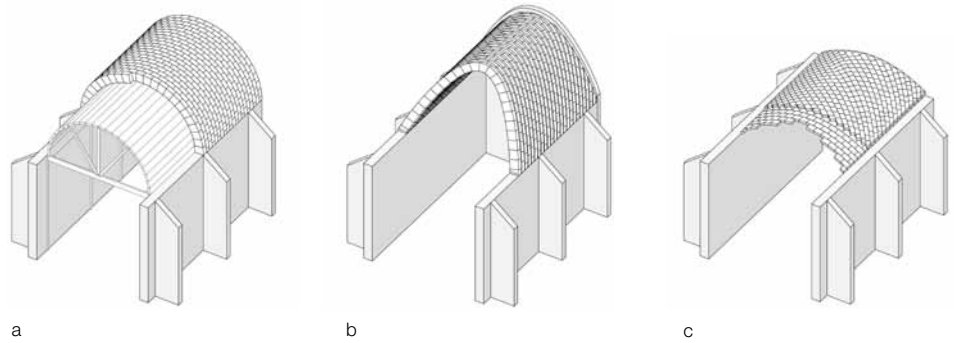
### The Catalan Vault – A Historical Structural Principle with a Bright Future

Philippe Block, Matthias Rippmann

Fotos:  
Iwan Baan, Frank Kaltenbach, Joseph Dahmen,  
Michael Freeman, Michael Ramage,  
Klemen Breiffuss, Michael Ford

#### *Gewölbe mauern ohne Schalung*

Die Technik des Ziegelgewölbes wurde bereits von den Römern eingesetzt und über die Gotik bis ins 20. Jahrhundert kontinuierlich weiterentwickelt. Insbesondere die katalanische Gewölbetechnik ermöglichte den Bau einiger spektakulärer Werke von Baumeistern wie Antoni Gaudí oder Rafael Guastavino und wurde bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts für verschiedenste Anwendungen eingesetzt, ehe sie von neuen Bauformen und modernen Baustoffen wie Beton und Stahl aus dem Bauschaffen verdrängt wurde. Heute zeichnet sich wieder ein wachsendes Interesse an dieser Technik für zeitgenössische Architekturaufgaben ab, das durch neue Anwendungen in Praxis und Forschung in Erscheinung tritt. Die Technik ist tragstrukturell sehr effizient, basiert auf natürlichen Materialien und kann ohne Verwendung aufwändiger Schalungskonstruktionen umgesetzt werden. Diese Eigenschaften in Kombination mit der geometrischen Flexibilität des Bausystems bieten großes Potenzial für Schalenbauten, die bisher fast ausschließlich unter Verwendung von Beton und Stahl realisiert werden konnten. Die katalanische Gewölbetechnik ist in vielerlei Hinsicht eine Weiterentwicklung gewöhnlicher Ziegelgewölbe aus römischer Zeit (Abb. 1a). Eine Neuerung war damals, dass Ziegel nicht wie üblich hochkant gestellt, sondern flach in meist drei Schichten ver-



a

b

c

1

baut wurden. Durch diesen sukzessiven Aufbau leichter Ziegelschichten und dem Einsatz von schnell härtendem Gipsmörtel konnte die erste Schicht meist ohne den Gebrauch von Lehrgerüsten erstellt werden. Diese erste Flachziegellage diente als Trägerschicht für die gegenseitig jeweils um 45° gedrehte zweite und meist dritte Ziegellage. Größere Bogen- bzw. Gewölbeformen wurden lediglich durch leichte Holzkonstruktionen als Formgeber räumlich definiert und lieferten während des Aufmauerns wichtige Orientierungspunkte. Einfache, extrudierte und rotationssymmetrische Gewölbeformen konnten meist ohne diese hölzernen Hilfskonstruktionen errichtet werden. Dieser weitgehende Verzicht auf Lehrgerüste für den Aufbau stellte einen entscheidenden Vorteil gegenüber den meisten Gewölbetechniken dar, der sonst nur bei den schräg verlaufenden Ziegelbögen der nubischen bzw. mexikanischen Gewölbe zu finden ist, die in ihrer Formvielfalt jedoch stark eingeschränkt sind (Abb. 1b). Neben der Materialeinsparung bleibt die Konstruktion im Bauprozess von unten zugänglich und ermöglicht ein sauberes Verfugen der Flachziegel, die üblicherweise in den Dimensionen 12 × 24 × 2 cm verbaut wurden (Abb. 1c, 5). Diese gerüstlose Aufbautechnik bedingte eine statische Stabilität der Konstruktion in jeder Bauabschnittsphase. So ließen sich beispielsweise Tonnengewölbe in einzelnen Bögen und

Kuppeln durch in sich geschlossene Ziegelringe schrittweise stabil aufmauern. Das statische Prinzip einer rein druckbeanspruchten Form stellte von jeher eine Grundvoraussetzung für die Errichtung katalanischer Gewölbe dar. Diese wurden mittels sorgfältiger Formbestimmung mit Hilfe experimenteller und grafischer Formfindungsmethoden (z. B. durch Hängemodelle bzw. Techniken der grafischen Statik) erfüllt. In Kombination mit der Stärke bzw. dem Gewicht der Ziegelschichten konnten so mögliche Biegemomente aus asymmetrischen Lastfällen auf ein Minimum reduziert werden.

*Die Entwicklung des katalanischen Gewölbes*  
Das katalanische Gewölbe wurde insbesondere in Katalonien kontinuierlich weiterentwickelt. Der Mangel an Bauholz in Spanien erschwerte die Konstruktion von Balkendecken oder aufwändigen Schalungsbauten für gewöhnliche Gewölbe und verlangte nach Alternativen. So entstanden schon 1382 in Valencia ersten Anwendungen dieser materialsparenden Gewölbetechnik. Zu Beginn wurde sie vorwiegend für die Herstellung flacher Geschossdeckengewölbe angewendet, jedoch erfolgte gegen Ende des 19. Jahrhunderts, vor allem durch die Arbeit Antoni Gaudís (1852–1926), eine Überleitung der katalanischen Gotik zu neuen Anwendungen der katalanischen Gewölbetechnik. Sein Entwurf der Sagrada Família (Abb. 6) steht beispiel-



2



3



4

haft für Innovationen im Bereich der tragstrukturellen Formfindung und der Weiterentwicklung der katalanischen Gewölbetechnik, die beispielsweise in den mit bunten Keramikziegeln errichteten Gewölbendecken zum Einsatz kam. Auch im Bereich großer Industriebauten fand die katalanische Gewölbetechnik Verwendung. So kombinierte Lluís Muncunill (1868–1931) schlanke Eisenkonstruktionen mit einer Aneinanderreihung gewölbter Ziegeldächer zu Industriehallen der im Jahr 1908 errichteten Textilfabrik Vapor Aymerich (Abb. 2–4). Diese Entwicklungen gründeten auf der Pionierarbeit des spanischen Industriearchitekten Rafael Guastavino (1842–1908), der 1881 in die USA immigrierte, und die katalanische Wölbungstechnik in Nordamerika verbreitete und weiterentwickelte. Nach anfänglichen Schwierigkeiten gelang ihm und später seinem Sohn der Aufbau einer Baufirma, die für die Konstruktion von katalanischen Gewölben in nahezu 1000 Gebäuden in 30 Staaten der USA zuständig war. Allein in New York und Boston wurden zahlreiche Gewölbe errichtet, die noch heute Banken, Bibliotheken, Kirchenräume, U-Bahnstationen und Wartesäle von Bahnhöfen überdecken (Abb. 8). Diese Gewölbe zeichneten sich durch beeindruckende Spannweiten von bis zu 30 Metern aus, deren nach innen gerichtete Ziegellagen durch verschiedenfarbige, keramikbeschichtete Ziegel zu aufwändigen Mustern angeordnet wurden. Die Guastavinos industrialisierten die katalanische Gewölbetechnik und passten sie den Bedürfnissen der vorherrschenden Bauindustrie an. So entstanden neben Kuppeln und Gewölben auch zahlreiche Treppenkonstruktionen (Abb. 9). Die Guastavinos erkannten den Marktvorteil der feuersicheren Konstruktion gegenüber Holz- und Eisenkonstruktionen, testeten ihre Gewölbe ausgiebig als Nachweis ihrer Leistungsfähigkeit und entwickelten bzw. adaptierten Neuerungen wie Akustikziegel oder Portlandzement für die oberen Ziegellagen.

*Verdrängung durch Stahl und Beton*

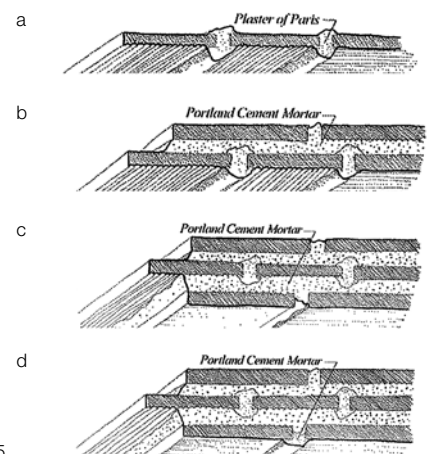
Steigende Lohnkosten und neue Techniken der Baukonstruktion unter Verwendung von

Stahl und Beton führten schließlich zur immer selteneren Anwendung der Guastavino-Gewölbetechnik für größere Bauwerke. Gegenüber neuen Baumaterialien wie Eisen- bzw. Stahlbeton galt Ziegel zunehmend als altmodisch und ungeeignet in Bezug auf die industrielle Verarbeitung. Die lineare Formensprache der Moderne zeigte vielmehr die neuen Möglichkeiten einer schlanken Bauweise aus Stahl, Glas und Beton auf. Mies van der Rohes Ikone der Moderne, der Barcelona-Pavillon (1929), steht für die Transparenz, Schlichtheit und Präzision der neuen Bauweise und dennoch gibt es einen interessanten Zusammenhang zwischen diesem Bauwerk und der katalanischen Gewölbetechnik. Vermutlich aus Zeit- und Kostengründen wurde anstelle eines Betonfundaments für den Pavillonbau eine Flachgewölbekonstruktion mittels katalanischer Ziegeltechnik errichtet. Es ist ironischer Weise bezeichnend, dass diese historische, regional bewährte und effiziente Bautechnik zwar als Fundament für den Ausstellungspavillon diente und dennoch, mit dem vorherrschenden Zeitgeist der Moderne, zunehmend an Bedeutung verlor. So trat das Flachziegelgewölbe mehr und mehr in den Hintergrund. Der Ziegel an sich jedoch fand in der Moderne durchaus Vertreter. Le Corbusier unternahm mit den Maisons Jaoul (1956) den Versuch, die katalanische Gewölbetechnik für moderne Bauwerke zu nutzen, doch ergab sich daraus kein Impuls für weitere Anwendungen dieses effizienten und eleganten Trag- bzw. Konstruktionssystems in der modernen Architektursprache.

*Wiederentdeckung als nachhaltige Bauweise*  
Gegenwärtig zeichnet sich ein Wendepunkt ab: Das Interesse an der katalanischen Gewölbetechnik und ihren unterschiedlichen Anwendungen sowie an ihrer wissenschaftlichen Erforschung ist in den vergangenen Jahren stark gewachsen. Die einstmal vorherrschende Ablehnung des Ziegels zugunsten neuer Baumaterialien hat sich aus heutiger Sicht unter Aspekten der Nachhaltigkeit und Haltbarkeit gewandelt, insbesondere im Hinblick auf die lokale Verfügbarkeit

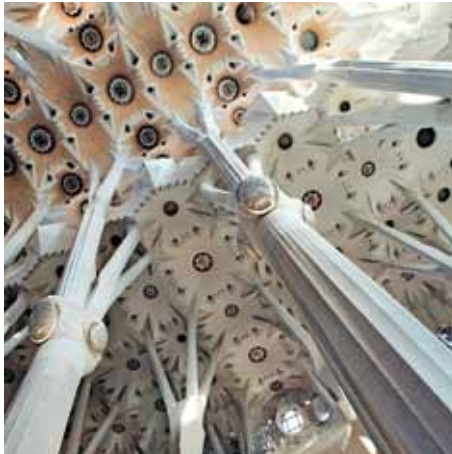
- 1 unterschiedliche Konstruktionstechniken von Ziegelgewölben:
  - a klassisch-römisches Gewölbe mit Schalung
  - b nubisches Gewölbe bereits im Bau selbsttragend
  - c katalanisches Gewölbe bereits im Bau selbsttragend
- 2–4 zweischaliges katalanisches Gewölbe auf Eisenstützen über 15000 m<sup>2</sup> Grundfläche: ehemalige Textilfabrik Vapor Aymerich, Amat i Jover in Terrassa, 1908; Architekt: Lluís Muncunill
- 5 Herstellungsprozess des katalanischen Gewölbes nach Rafael Guastavino:
  - a Mörteln der ersten Ziegelschicht mit schnell abbindendem »Pariser« Mörtel ohne Gerüst
  - b die zweite Ziegelschicht wird mit Portlandzement oben auf die erste Schale aufgemauert
  - c die raumseitige Ziegelschicht mit Zierfliesen und sorgfältiger Verfugung wird mit Portlandzement von unten an die erste Schicht gemauert
  - d Verfügen der sichtbaren Ziegelschicht. Je nach statischer Erfordernis können oben weitere Ziegelschichten aufgebracht werden.

- 1 *Different construction techniques for brick vaults:*
  - a *Classic Roman vault with falsework*
  - b *The Nubian vault is already self-supporting during construction*
  - c *The Catalan vault is already self-supporting during construction*
- 2–4 *Double-wythe Catalan vault on iron columns enclosing a surface area of 15000 m<sup>2</sup>; Aymerich, Amat i Jover, former textile factory in Terrassa, 1908; architect: Lluís Muncunill*
- 5 *Rafael Guastavino's procedure for erection of the Catalan vault:*
  - a *Mortaring the first layer of brick with quick-setting plaster of Paris, without scaffolding.*
  - b *The second layer of bricks is laid atop the first using Portland cement.*
  - c *The lowermost brick layer with ornamental tiles and painstaking pointing is bedded to the first layer from below with Portland cement.*
  - d *Pointing of the visible layer of brick; depending on structural requirements, additional upper layers of bricks can be laid.*



5





6

- 6 Sagrada Família in Barcelona, im Bau seit 1882, Aufnahme 2012; Architekt: Antoni Gaudí  
 7 Casa Milà, Dachstuhl mit Treppenschacht, Barcelona 1906–1910; Architekt: Antoni Gaudí  
 8 Grand Central Terminal, New York City, untere Zugangsebene 1903–1913; Arch.: Warren & Wetmore und Reed & Stern, Gewölbetechnik: Guastavino  
 9 Treppe in Gewölbetechnik: Baker Hall, Carnegie Mellon University, Pittsburgh 1914; Arch.: Henry Hornbostel, Gewölbetechnik: Guastavino

- 6 *Sagrada Família has been under construction since 1882; photo taken in 2012; architect: Antoni Gaudí*  
 7 *Casa Milà, roof structure with stairwell, Barcelona 1906–1910; architect: Antoni Gaudí*  
 8 *Grand Central Terminal, New York City, lower access level; 1903–1913; architects: Warren & Wetmore and Reed & Stern; vault technique: Guastavino*  
 9 *Stair constructed in the vault technique: Baker Hall, Carnegie Mellon University, Pittsburgh 1914; arch.: Henry Hornbostel; vault technique: Guastavino*

von Baumaterialien und deren Ökobilanz. Hinzu kommt eine erhebliche Materialeinsparung durch die Einfachheit einer schalungsfreien Konstruktion und effizienten Tragkonstruktion. Das im Jahr 2006 erbaute Pines Calyx-Kongresszentrum in Dover zeigt eindrücklich, wie lokale Materialien und katalanische Ziegelgewölbe in effizienter Weise in einem außergewöhnlichen Bauwerk zum Einsatz gebracht wurden, dessen graue Energie gegenüber einer vergleichbaren Betonkonstruktion um 30% gesenkt werden konnte (Abb. 11).

#### *Kostengünstig durch lokale Ressourcen*

Der arbeitsintensive Herstellungsprozess katalanischer Gewölbe stellte schon zur Zeit der Guastavinos ein wirtschaftliches Problem dar, das sich mit zunehmender Industrialisierung weiter verschärft hat. Dieses scheinbare Hindernis kann sich in weniger industrialisierten Regionen allerdings auch zu einem Vorteil entwickeln. Das menschliche Bauteilmaß des Ziegels und die simple Konstruktion schaffen ideale Grundvoraussetzungen für eine Partizipation am Bauprozess durch lokale Arbeitskräfte; ein entscheidender Vorteil der katalanischen Ziegelgewölbetechnik, die auch im Entstehungsprozess des Mampungubwe National Park Interpretation Centre in Südafrika genutzt werden konnte (Abb. 12). Das Gebäudeensemble umfasst eine Ausstellungsfläche von 3000 m<sup>2</sup>, die

durch eine Reihung von Kuppeln und Gewölben unterschiedlicher Spannweite überdacht wird. Mit großem Erfolg konnten lokale Arbeiter für die Errichtung der Gewölbe und die örtliche Herstellung der luftgetrockneten Erdziegel in das Projekt integriert werden, was gleichzeitig einen aktiven Wissenstransfer förderte und lokale Arbeitsplätze in der strukturschwachen Region generierte. Die ungebrannten Erdziegel wurden unter Beimischung von ca. 8% Zement mittels manueller Pressen vor Ort produziert und ermöglichten so eine äußerst energieeffiziente Herstellung. Das Forschungsprojekt zur SUDU (Sustainable Urban Dwelling Unit), das als Kooperationsprojekt der BLOCK Research Group an der ETH Zürich mit dem Ethiopian Institute of Architecture, Building Construction and City Development gemeinsam durchgeführt wurde, befasst sich ebenfalls mit der Entwicklung wirtschaftlich und ökologisch nachhaltiger Konstruktionssysteme in äußerst ressourcenarmen Regionen (Abb. 10). Das Konzept der prototypischen Mauerwerksbauten basiert auf der Ressourcenverfügbarkeit lokaler Materialien (Flachziegel, Stampflehm) und Arbeitskräfte und verringert zugleich den Verbrauch importierter Materialien wie Stahl, Beton und Bauholz. Mit Gesamtbaukosten von weniger als 60 €/m<sup>2</sup> eignet sich die Baukonstruktion in idealer Weise für arme Regionen mit Bedarf an verdichtetem Wohnraum.

#### Literatur:

J. Ochsendorf, M. Freeman, Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile, 2012; s.S. 482  
 L. Davis, M. Rippmann, T. Pawlofsky, P. Block, Innovative Funicular Tile Vaulting: A prototype in Switzerland, The Structural Engineer, 2012, Vol. 90, Nr. 11, s.S. 46–56

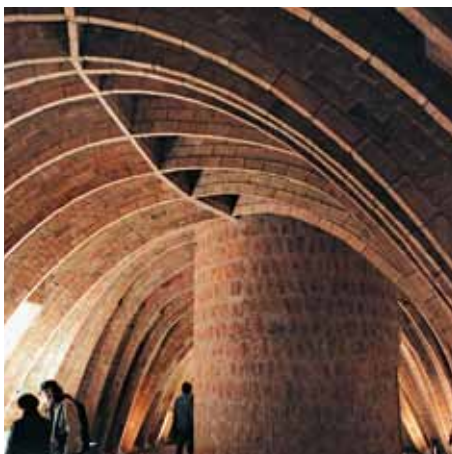
#### Videolinks:

BLOCK Research Group, ETH Zürich – Katalanisches Freiformgewölbe, 2011; Zeitraffer Aufbau: <https://vimeo.com/25703577>  
 BLOCK Research Group, ETH Zürich – Katalanisches Freiformgewölbe, 2011; Abriss: <https://vimeo.com/60064510>  
 Video Biennale, Block Research Group, ETH Zürich – MLK Jr. Park Stone Vault, Austin, TX, USA: <http://vimeo.com/46222727>

#### *Formgebung mit 3D-Computermodellen*

Ungeachtet der vorteilhaften technischen Eigenschaften des katalanischen Gewölbes für die Anwendung in strukturschwachen Regionen der Welt üben sie eine bleibende Faszination aus, die auf ihre Eleganz und Ästhetik zurückzuführen ist und bereits in den Bauwerken Gaudís und Kuppeln der Guastavinos zutage trat. Nicht zuletzt diese Faszination muss jüngst die Architekten Herzog & de Meuron dazu bewegt haben, eine arkadenartige Deckenkonstruktion in katalanischer Gewölbetechnik für den Entwurf des Lord's Cricket Ground in London vorzuschlagen.

Die Ästhetik der katalanischen Gewölbe ist einerseits abhängig von dem eingesetzten Material bzw. dem Verlegemuster, andererseits von der räumlichen Qualität des Bauwerks und der Gewölbeform, die aufgrund ihrer Druckbeanspruchung tragstrukturell definiert ist. Die bisher bekannten, teils aufwändigen Techniken zur Formfindung druckbeanspruchter Strukturen lassen Formvariationen nur in begrenztem Umfang zu. Um dieses eingegrenzte Entwurfsspektrum zu erweitern, hat die BLOCK Research Group an der ETH Zürich einen ihrer Forschungsschwerpunkte auf die Entwicklung neuartiger, dreidimensionaler Formfindungsverfahren auf Basis der grafischen Statik gelegt. Hierzu wurde eine Software (RHINOVAULT) entwickelt, die dem Entwerfer eine



7



8



9

- 10 SUDU (Sustainable Urban Dwelling Unit) Addis Abeba, Äthiopien; Tragwerk: BLOCK Research Group
- 11 Pines Calyx-Kongresszentrum in Dover, 2006; Architekten: John Ochsendorf, Michael Ramage, Wanda Lau
- 12 Mapungubwe Interpretation Center in Südafrika, 2010; Architekt: Peter Rich, Gewölbetechnik: John Ochsendorf, Michael Ramage
- 10 SUDU (Sustainable Urban Dwelling Unit), Addis Abeba, Ethiopia; structural engineering: BLOCK Research Group
- 11 Pines Calyx, conference centre in Dover, 2006; architects: John Ochsendorf, Michael Ramage, Wanda Lau
- 12 Mapungubwe Interpretation Centre in South Africa, 2010; architect: Peter Rich; vaulting technique: John Ochsendorf, Michael Ramage



10



11

interaktive Umgebung für Formfindungsstudien druckbeanspruchter Konstruktionen bereitstellt. Dieses digitale Entwurfswerkzeug fügt sich in den frühen Entwurfsprozess ein und erlaubt dem entwerfenden Architekten ein interaktives und gezieltes Entwickeln druckbeanspruchter Formen. Mittels dieser Software wurde ein katalanisches Freiformgewölbe entworfen, bemessen und als 7,5 x 5,5 m großer Prototyp an der ETH Zürich umgesetzt (Abb. 13–18). Entgegen der ersten intuitiven Annahme hat das Ergebnis dieser Prototypstudie gezeigt, dass die komplex gekrümmte Gewölbeform die tragstrukturellen Kriterien einer rein druckbeanspruchten Form, respektive jene eines katalanischen Ziegelverbands, erfüllt.

#### Unsichtbare und sichtbare Rippen

Durch die asymmetrische Formgebung ist der zweischichtige Aufbau jedoch auf ein dreidimensionales Lehrgerüst angewiesen, das hauptsächlich der räumlichen Vorgabe zur Bestimmung der Form während des Auf-

mauerns dient. Teile des Gewölbes mit starker Druckbeanspruchung wurden durch die lokale Einbettung einer innenliegenden dritten Ziegellage als »unsichtbare« Rippenkonstruktion verstärkt (Abb. 14). Einfache Lastversuche mittels Aufbringen einer Dreitonnen-Last an kritischen Stellen ergaben keinerlei messbare Verformung oder Rissbildung und bestätigten die enorme Stabilität der Konstruktionsart. Auf Basis dieser Erkenntnisse erforscht die BLOCK Research Group weiterführende Ansätze im Bereich der virtuellen Formbestimmung im Bauprozess und der exakten Definition in sich stabiler Bauabschnittsbereiche, um Strukturen ähnlicher Art ohne jegliche Verwendung von Lehrgerüsten zu errichten. Neben »unsichtbaren« Rippenkonstruktionen in der Ziegelzwischenwand lassen sich freigeformte katalanische Gewölbe auch explizit in Rippenstrukturen auflösen. Die ersten Ansätze dieser Technik wurden jüngst in Form eines Prototyps an der University of Technology in Sydney in Kooperation mit der BLOCK

Research Group erkundet und experimentell überprüft (Abb. 19).

#### Dünne Ziegelgewölbe als verlorene Schalung

Darüber hinaus erfolgt die Entwicklung neuartiger Schalen, die sowohl in tragstruktureller als auch materialtechnischer Hinsicht als Hybridstrukturen bezeichnet werden können. Mit Hilfe der erwähnten Neuentwicklungen in der Formfindung können neben den wirkenden Druckkräften gezielt Zugkräfte in ein zusammenhängendes Zugband integriert werden, um Formen zu generieren, die bislang primär als Betonschalungskonstruktionen ausgeführt wurden. Eine Hybridkonstruktion aus einer Ziegellage im Verbund mit einer dünnen Schicht aus speziellem Faserbeton wird den hohen statischen Anforderungen dieser Formen gerecht. Die Konstruktion verbindet die Vorteile katalanischer Ziegelgewölbe, beispielsweise den minimalen Einsatz von Lehrgerüsten, mit der tragstrukturellen Leistungsfähigkeit moderner Baustoffe. Die architektonisch hochwertige Untersicht aus

Philippe Block ist Assistenzprofessor für Tragkonstruktionen am Institut für Technologie in der Architektur an der ETH Zürich. Er ist Leiter der BLOCK Research Group. Als Gründungspartner von ODB (Ochsendorf, DeJong & Block LLC) erstellt er international Gutachten im Baubestand und entwickelt neue unbeherrte Stein- und Ziegelkonstruktionen.

Matthias Rippmann forscht als Doktorand im Team der BLOCK Research Group, ETH Zürich, an konstruktions- und tragwerksinformierten Entwurfswerkzeugen im Bereich der Gewölbearchitektur. Er ist seit 2010 Gründungspartner der Firma ROK – Rippmann Oesterle Knauss GmbH, die international Projekte an der Schnittstelle zwischen Architektur und Ingenieurwesen ausführt.

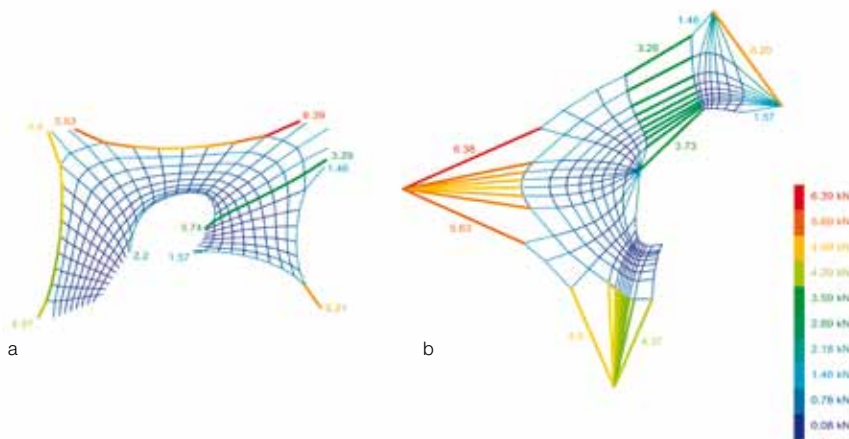
*Philippe Block is assistant chair of Building Structures at the Institute of Technology in Architecture at the ETH Zürich. He heads the BLOCK Research Group. He is a founding partner of ODB (Ochsendorf, DeJong & Block LLC), where he prepares international expert's reports on the building stock and develops new, non-reinforced stone and brick structures.*

*Matthias Rippmann researches as doctoral candidate in the BLOCK Research Group at the ETH Zurich; his work focuses on tectonically and structurally informed design tools in vault architecture. He is a founding partner of the firm ROK – Rippmann Oesterle Knauss GmbH (established 2010), which realises international projects at the interface of architecture and engineering.*

12







13

Ziegeln ist statisch wirksam und muss nicht weiter behandelt werden. Dieses Verfahren wird erstmalig 2014 für einen Pavillon auf dem Campus der ETH Zürich angewandt und erprobt.

#### Gewölbe aus Naturstein-Formsteinen

Neben diesen Ziegelkonstruktionen untersucht die BLOCK Research Group auch Gewölbe aus Stein. Dies erfolgt einerseits im Bereich der Tragwerksuntersuchung bzw. Stabilitätsprüfung bestehender Steingewölbe wie beispielsweise gotischer Kathedralen. Andererseits werden erwähnte Formfindungstechniken sowie innovative Entwicklungen in der Steinverarbeitung und -fügung für neuartige, frei geformte Steingewölbe eingesetzt. Die auf der Architekturbiennale 2012 in Venedig ausgestellte Projektstudie zum MLK Jr. Park Stone Vault in Austin zeigt dies auf anschauliche und beeindruckende Weise (Abb. 21). Das in der Planung befindliche Gewölbe ist in eine neue Parklandschaft integriert und überdacht eine Freilichtbühne sowie multifunktionale Nutzungsbereiche mit einer Gesamtfläche von 650 m<sup>2</sup> und einer maximalen Spannweite von 26 m. Im Gegensatz zu den einheitlichen Ziegeln ist jedoch jeder der Natursteine individuell geformt, um ausschließlich Druckkräfte zu übertragen. Um den Steinschnitt der jeweiligen Schalengeometrie entsprechend optimal anzupassen, wurde eigens ein Computerprogramm entwickelt und an Modellversuchen überprüft.

#### Ausblick

Diese Forschungsanstrengungen und die neuesten Beispiele katalanischer Gewölbe-technik – von einfachen Wohnbauten in strukturschwachen Regionen bis hin zu komplexen Schalentragwerken im Kontext moderner Bauwerke – lassen das Potenzial dieser traditionellen Technik für zeitgenössische Architektur erahnen. Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen und ökologischen Bauweise erhoffen sich die Autoren die Wiederentdeckung und Weiterentwicklung dieser faszinierenden Bautechnik – eine Renaissance katalanischer Gewölbe.

Constructing vaults in brick was mastered by the Romans, but it evolved as time passed. The Catalan vaulting technique in particular made it possible to build spectacular structures, with designs by, for example, Antoni Gaudí or Rafael Guastavino, and was employed in a wide range of applications during the first half of the twentieth century, at which time it was replaced by new methods of construction and modern building materials such as concrete and steel. Now there are signs that interest in this technique for contemporary architecture is growing, and through new applications it is making a comeback in practice and research. The technique is structurally highly efficient, based on materials from natural sources, and does not require elaborate falsework. These characteristics, in combination with the geometric flexibility of the construction system, have great potential for shell structures, which typically have been realised in concrete and steel. In many respects, Catalan vaulting is in the lineage of the common brick vault of Roman times (ill. 1a), but the bricks are not laid, as they had typically been, in an upright position, but employed flat, usually in three layers. Through this successive assembly of lightweight layers of bricks, and by using fast-setting gypsum mortar, the first layer can be erected without a falsework structure. This first layer of bricks serves as the lost falsework for the second, which has the bricks rotated 45 degrees, on top of which, most of the time, a third layer is laid. Larger arches or vault forms were defined spatially simply by introducing lightweight wooden or string guides, providing important points of reference while the bricks were being laid. Simple, extruded and rotationally symmetrical vault forms could usually be erected without these auxiliary structures. The fact that false- and guidework were not necessary constituted a decisive advantage in comparison to most vaulting techniques – the only other vault type with this advantage is the Nubian vault, and its modern version, the Mexican vault, which has oblique courses and a severely limited palette with respect to the vault form (ill. 1b). When the Catalan technique is employed, in addition to reducing



14

material use, the vault remains accessible from below and allows for precise pointing of the bricks, whose dimensions are normally 12 × 24 × 2 cm (ill. 1c, 5). Because no falsework is employed, the brickwork must thus be structurally stable during every stage of construction. A barrel vault, for example, can be constructed one arch at a time. The brickwork of a dome is also easily laid in stable steps: each ring is completed (and stable because of its geometry) before work on the next ring begins. Finding a structural form that is only subject to compression forces has always been a prerequisite for the construction of the Catalan vault. This requirement was met by seeking out a form through experimental and graphical form finding methods. In this manner, and taking into consideration the thickness and weight of the layers of bricks, bending moments induced by asymmetrical loads could be kept to a minimum. The scarcity of wood for construction in Spain all but ruled out construction of beam ceilings or falsework for conventional vaults, and



15



16



17

made it necessary to find alternatives. First applications of the material-saving vaulting technique appeared in Valencia in 1382, but the continued development of the Catalan vault took place primarily in Catalonia. Initially, they were predominantly employed to erect shallow vaults as ceiling decks; however, toward the end of the nineteenth century, particularly in the work of Antoni Gaudí (1852–1926), and his further development of the Catalan Gothic, new applications were introduced. His design for the Sagrada Família (ill. 6) exemplifies the innovations in structural form finding and the evolution of the Catalan vaulting techniques. He employed the structural system, for example, in the colourful, ceramic-clad vaulted ceilings. In large industrial buildings, as for example in the Vapor Aymerich textile factory, erected in 1908, Lluís Munçunill (1868–1931) combined slender iron structures with multiple bays of vaulted brick roofs (ills. 2–4) lined up one next to the other. Further important developments and pioneering work was done by the Spanish architect

Rafael Guastavino (1842–1908). In 1881, the specialist in industrial architecture emigrated to the United States, where he continued to develop and build the Catalan vault. After initial difficulties, he established a construction firm (later continued by his son) that realised nearly 1000 buildings in thirty states using Catalan vaulting. In New York and Boston alone, hundreds of banks, libraries, churches, and metro stations were covered with these roofs (ills. 5, 8). These vaults distinguished themselves through their impressive spans of up to 30 metres, and their brick surfaces visible from inside the building through their colourful ceramic-coated layer of bricks – often including ornate patterns. The Guastavinos made the Catalan vaulting technique amenable to mass production, and adapted it to the needs of the construction industry. In this manner, in addition to domes and vaults, numerous stairs were built (ill. 9). They recognized the competitive advantage of the fire-resistant structural system, tested their vaults extensively to prove their structural integrity, and developed or

- 13–18 temporärer Pavillon auf dem Campus der ETH Zürich, 2011; Architekten: BLOCK Research Group
- 13 a Lageplan zur Bestimmung der Krafrichtung während der Formfindung
- 13 b Kräfteplan zur Ermittlung des Kräftegleichgewichts und der wirkenden Druckkräfte mittels RhinoVAULT
- 14 Formgebung der Geometrie mit Wellpappegerüst
- 15 Belastungstests

- 13–18 Temporary pavilion at the ETH Zurich campus, 2011; architects: BLOCK Research Group
- 13 a Form diagram to determine the direction of forces during the form finding
- 13 b Force diagram to determine the equilibrium of forces and the compression forces acting on the vault using RhinoVAULT
- 14 Corrugated cardboard falsework replicates the geometry
- 15 Loading tests

adapted innovations such as acoustic bricks or the use of Portland cement for the upper layers of bricks. Due to rising wages and the advent of new construction techniques that use steel and concrete, Guastavino vaulting was employed less and less for larger buildings. In comparison to new building materials such as reinforced concrete, brick was increasingly considered outdated and not suited to use in industrial structures. Modernism’s formal, rectilinear vocabulary drew attention to new possibilities for lean construction with steel, glass, and concrete. Nonetheless, there were some modernist proponents of brick. Le Corbusier’s design for Maison Jaoul (1956) was an attempt to use the Catalan vault in a modern building, but the application of this efficient and elegant structural system did not spark further realisations in the modernist vocabulary. In recent years, interest in the Catalan vaulting technique and its different applications has grown considerably, as well as scholarly research of it. The rejection of brick in favour of new building materials that took



18





19

place years ago has now yielded to an awareness of issues revolving around sustainability and durability, particularly with respect to local availability of building materials and their eco-balance. The Pines Calyx conference centre in Dover convincingly demonstrates how local materials and Catalan brick vaults can be combined in an out-of-the-ordinary building whose embodied energy is 30% less than that of a comparable concrete structure (ill. 11). Even back in Guastavino's days, the labour-intensive construction process to build Catalan vaults constituted an economical problem, and it has been exacerbated by the increasing mechanisation of the construction methods. But in less industrial regions this apparent impediment can turn out to be advantageous. The brick, whose dimensions are related to the human body, and the simple form of construction provide the ideal parameters for the participation of local workers in the building process – a decisive advantage of the Catalan brick vaulting that was put to use in the Mapungubwe National Park Interpretation Centre in South Africa. One element of the building ensemble is a 3000 m<sup>2</sup> exhibition space whose varying roofs have been realized with a series of domes and vaults (ill. 12). Local workers were included in the project, with great success, for the on-site production of the soil-pressed bricks and the construction of the vaults; this fostered an active knowledge transfer, and, at the same time, generated lo-

19 Rippenfreiformgewölbe, Architekt: BLOCK Research Group, ETH Zürich & University of Technology Sydney

20 Formfindung einer druckbeanspruchten Form mit der Integration eines umlaufenden Zugbands, Architekten: BLOCK Research Group, ETH Zürich

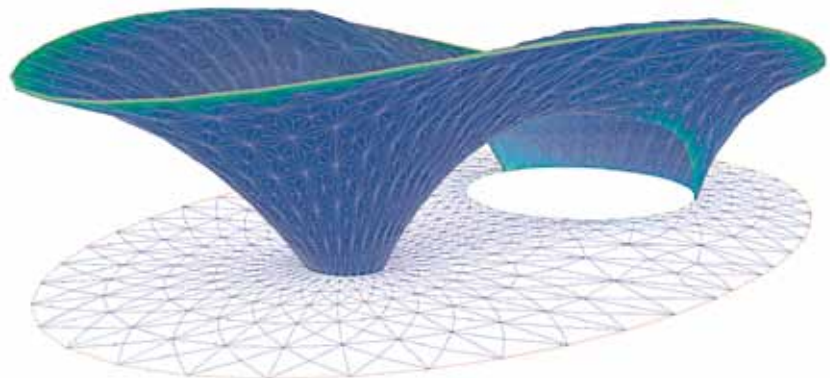
21 MLK Jr. Park Stone Vault, Modell, Architekturbiennale Venedig 2012, Architekten: BLOCK Research Group, ETH Zürich & Escobedo Construction

19 Free-form rib vault; architect: BLOCK Research Group, ETH Zurich & University of Technology Sydney

20 Form finding of a compression form incorporating a circumferential tension tie, architects: BLOCK Research Group, ETH Zurich

21 MLK Jr. Park stone vault, model, Venice Architecture Biennale, 2012; architects: BLOCK Research Group, ETH Zurich & Escobedo Construction

20



cal jobs in the poorly developed region. The unfired bricks – with a cement content of about 8% to stabilise them – were pressed manually: this is an extremely energy-efficient means of production. SUDU, a research project that was carried out in a cooperative effort between the BLOCK Research Group at the ETH Zurich and the Ethiopian Institute of Architecture, Building Construction and City Development, also deals with the development of economically sustainable construction systems in regions with scarce natural resources (ill. 10). The concept of the prototypical brick masonry and rammed earth building is based on the availability of local materials and workers, but also on reducing the consumption of imported materials such as steel, concrete and wood. With total building costs for the housing unit of less than 60 Euros/m<sup>2</sup>, this construction method is ideally suited to poor regions in need of high-density dwellings. The aesthetic of the Catalan vault depends, on the one hand, on the material and brickwork pattern employed; on the other hand, it is determined by the building's spatial quality and the vault's geometry, which, because it is subject to compression forces, is defined in structural terms. The techniques to find the form for structures in a pure state of compression allow variations to a limited degree. In order to expand the constrained design spectrum, the BLOCK Research Group at the ETH Zurich focuses its research on the development of nov-

el, three-dimensional form finding processes based on graphical methods. To this end, the freely available RhinoVAULT software provides the designer with an interactive environment to form find structures in compression. This design tool can be integrated in the planning process and aids the architect in developing suitable forms. With the help of this software, a Catalan free-form vault was designed, dimensioned, and realised as a 7.5 x 5.5 m prototype at the ETH Zurich (ills. 13–18). The result shows that complexly shaped structures can stand efficiently in compression despite their free-form appearance. Aided by the new developments in form finding mentioned above, it is now also possible to locally incorporate tensile elements, such as a continuous tension tie around the free edge, to generate cantilevering forms that thus far have primarily been executed as concrete shells. A hybrid structure consisting of one layer of bricks, bonded to a thin layer of fibre-reinforced concrete, can meet the high structural demands of these novel funicular funnel forms (ill. X). The assembly combines the advantages of the Catalan brick vault – e.g. the minimisation of falsework – with the structural performance of modern building materials. The visible bottom face of the bricks is desirable both architecturally and structurally, and requires no surface treatment. The future possibilities to design exciting structures based on this elegant vaulting technique are legion.



21