

Ultraleichtes, flexibles Schalungssystem für dünne, textildbewehrte Betonschalen

Ultralight, flexible formwork system for thin, textile-reinforced concrete shells

Tom Van Mele
Tomás Méndez Echenagucia
David Pigram
Andrew Liew
Philippe Block

Tom Van Mele ist Kodirektor und Forschungsleiter der Block Research Group (BRG) an der ETH Zürich.

Tomás Méndez Echenagucia ist Architekt und Postdoktorand in der BRG.

David Pigram ist Mitbegründer und Direktor des Architekturbüros supermanoeuvre und Dozent an der University of Technology in Sydney.

Andrew Liew ist Bauingenieur und Postdoktorand in der BRG.

Philippe Block ist ordentlicher Professor für Architektur und Tragwerk an der ETH Zürich, Gründer der BRG und Direktor des Nationalen Forschungsschwerpunkts (NFS) - Digitale Fabrikation.

Tom Van Mele is co-director and head of research and development of the Block Research Group (BRG) at ETH Zürich.

Tomás Méndez Echenagucia is an architect and post-doctoral researcher in the BRG.

David Pigram is co-founder and director of the architecture firm supermanoeuvre and a senior lecturer at the University of Technology Sydney (UTS), Australia.

Andrew Liew is a structural engineer and post-doctoral researcher in the BRG.

Philippe Block is professor of architecture and structure at ETH Zürich, where he founded the BRG. He is also director of the Swiss National Centre for Competence in Research (NCCR) - Digital Fabrication.

HiLo ist eine Forschungs- und Innovations-einheit in den Bereichen Leichtbau und intelligenter, adaptiver Gebäudesysteme. Sie dient als zweigeschossige Wohnung, die 2018 am NEST (Next Evolution in Sustainable Building Technologies), dem modularen Forschungsgebäude der EMPA in Dübendorf in der Schweiz, gebaut wird. Das Dach der Einheit besteht aus einer zweilagigen, doppelt gekrümmten, kohlefaserverstärkten Betonschale mit integriertem hydronischen Heiz- und Kühlsystem sowie einer aufgesetzten Dünnschicht-Photovoltaikanlage. Mit einer Gesamthöhe von 7 m und einer Oberfläche von 160 m² überdeckt es eine Fläche von 120 m². Gleichsam als Generalprobe für das innovative Bausystem wurde ein 1:1-Prototyp der unteren Schicht des Betondachs im Robotic Fabrication Lab des Instituts für Technologie in der Architektur der ETH Zürich realisiert.

Der Unterbau des Systems besteht aus wiederverwendbaren Gerüstelementen, die eine Reihe von Holz-Randträgern tragen. Zwischen den Trägern und den Widerlagern bzw. Konsolen ist ein Seilnetz gespannt, während ein



A

HiLo is a research and innovation unit for light-weight construction and smart and adaptive building systems. It is a two-storey apartment that will be built in 2018 on NEST, EMPA's modular research building in Dübendorf, Switzerland. The roof of the unit is a double-layered, doubly curved, carbon-fibre-reinforced concrete shell structure with integrated hydronic heating and cooling, and a thin-film photovoltaic system on top. With a total height of 7 metres, the roof covers an area of 120 square metres and has a total surface area of 160 square metres. A full-scale prototype of the bottom layer of the concrete roof was built in the Robotic Fabrication Lab of the Institute of Technology in Architecture at ETH Zürich as a dress rehearsal for its innovative construction system.

The base of the system is composed of reusable scaffolding elements that support a set of timber edge beams. A cable net spans between the beams and the lower supports, and a fabric on top serves as shuttering for the sprayed concrete. The cable net is comprised of custom-cut steel cables connected by rings and brackets and is designed such that it deflects under the weight of the wet concrete into the correct final geometry, which it then supports until the shell has cured. To achieve this, the cable net must be precisely tensioned at the correct angle from specific anchor points in the CNC-milled edge beams.

Cable net design

The anticlastic shape of the concrete shell structure is the result of a custom-developed, multi-criteria optimisation process that balances architectural and functional constraints, such as possible touchdown regions, headroom clearances and solar orientation, with structural and fabrication requirements. Through a best-fit form-finding procedure, the specific non-uniform prestress of the cable net that would allow it to deform into this target shape under the 20 tonnes of wet concrete was then determined. The topology of the cable net was defined to best reflect the features of the anticlastic target shape, while minimising the required number of cable elements, controlling the sizes of the faces and dealing with the concentration of cables in the funnelling parts. Allowable forces were constrained during the form-finding process to

darüber liegendes Gewebe als Schalung für den Spritzbeton dient. Zusammengesetzt ist das Seilnetz aus genau zugeschnittenen Stahlseilen, die durch Ringe und Klammern verbunden sind – die richtige Endgeometrie erreicht es unter dem Gewicht des nassen Betons, den es trägt, bis die Schale ausgehärtet ist. Damit dies gelingt, muss das Netz von bestimmten Befestigungspunkten an den CNC-gefrästen Randträgern im richtigen Winkel angebracht und präzise vorgespannt werden.

Gestaltung des Seilnetzes

Die gegenseitig gekrümmte Form der Betonschale resultiert aus einem eigens entwickelten Optimierungsprozess, der architektonische und funktionale Aspekte (z. B. Befestigungsbereiche, Durchgangshöhen oder die Ausrichtung zur Sonne) mit Konstruktions- und Fertigungsanforderungen in Einklang bringt. Mit einem inversen Formfindungsverfahren wurde anschließend die genaue, ungleichmäßige Vorspannung ermittelt, durch die das Seilnetz unter der Last des 20 t schweren Nassbetons seine finale Form erreicht. Die räumliche Struktur des Netzes war dabei so zu definieren, dass sie nicht nur optimal den Besonderheiten der gegenseitig gekrümmten Netzform entspricht, sondern zugleich die Anzahl der erforderlichen Seilelemente minimiert, die Maximalgröße der Netzfelder miteinbezieht und die höhere Seildichte in den trichterförmigen Bereichen berücksichtigt. Um einen sauberen Übergang zur verglasten Fassade zu schaffen, kamen außerdem besondere Seile entlang vertikaler Ebenen zum Einsatz. Im Verlauf des Formfindungsprozesses wurden die zulässigen Kräfte beschränkt, um die erforderlichen Größen der Seilnetzkomponenten zu begrenzen. Die Gestaltung der Knoten sorgt dafür, dass alle Seile die nötigen Freiheitsgrade (axial, in der Schalenebene und senkrechte Rotation) haben, um der gewünschten Schalengeometrie entsprechen zu können. Zudem besitzen die Knoten Vorrichtungen zum Ausrichten und Befestigen der

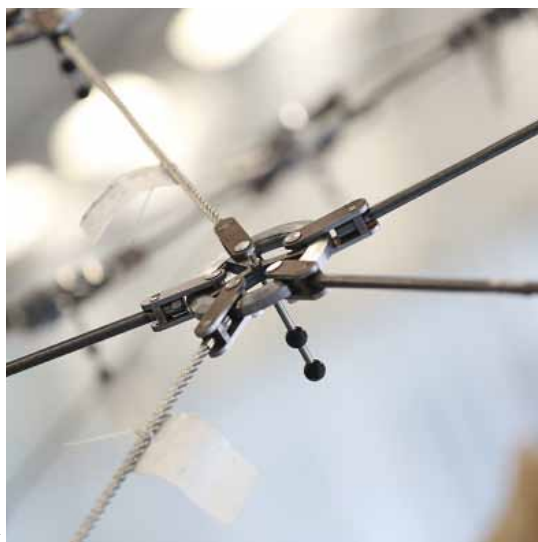
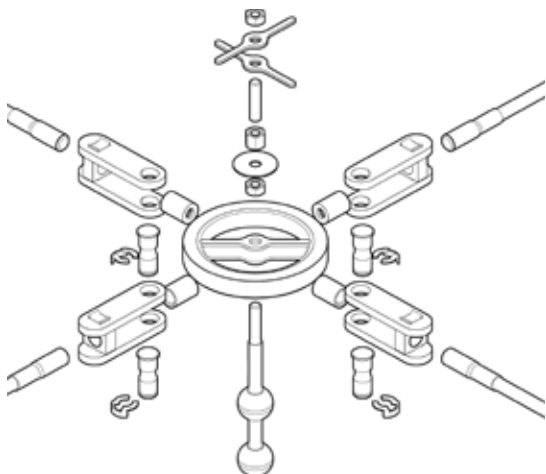


limit the required sizes of the cable net components. The specific node design ensured that all cables have the necessary degrees of freedom to conform to the required shell geometry (axial, in-plane and perpendicular rotation). It incorporates features to align and attach the fabric shuttering, to fix the textile reinforcement at the correct height, to register the concrete thickness and to facilitate as-built measurement from below with two spherical markers on the nodes' central axis. The developed construction system was designed to compensate for unavoidable deviations from the theoretical model, for example due to fabrication and assembly tolerances of the edge beam and the supporting scaffolding structure, by means of an adaptive control system. Tightening or loosening the cables at the perimeter alters the forces within the cable net, steering the shape of the shuttering from an imperfect starting point towards the desired shape. An algorithm was implemented to determine the precise adjustment to be applied at each boundary cable to best direct the cable net towards the intended form while respecting maximum cable stress constraints.

W

Alle Grundrisse:
All floor plans:
detail.de/1-2-2018-sesc

- A Struktureller Gesamtaufbau: Traggerüst, Schalungssystem und textilbewehrte Betonschale (von unten nach oben).
- B, C Seilnetzknoten
- A Structural system components: supporting scaffold, formwork system and textile-reinforced concrete shell (from bottom to top).
- B, C Cable net nodes



B

C

- D Montage des Seilnetzes mit Hubarbeitsbühnen
- E Kohlefaserbewehrung, befestigt am Abstandhalter eines Knotens
- F Befestigung des Schalungsgewebes auf dem Seilnetz
- G Schalungsgewebe und Seilnetz von unten
- H Aufbringen des Spritzbetons und stellenweises Verflüssigen mit elektrischen Betonkellen

- D Installation of the cable net using aerial working platforms
- E Carbon-fibre reinforcement fixed to a spacer at a node
- F Fastening the shuttering fabric onto the cable net
- G Shuttering fabric and cable net from below
- H Application of sprayed concrete and localised liquefaction using electric vibrating trowels

Gewebeschalung, zum Fixieren der textilen Bewehrung in der richtigen Höhe, zum Able- sen der Betondicke und zum leichten Vermes- sen der fertigen Konstruktion von unten mit- hilfe zweier kugelförmiger Markierungspunkte in der Mittelachse der Knoten.

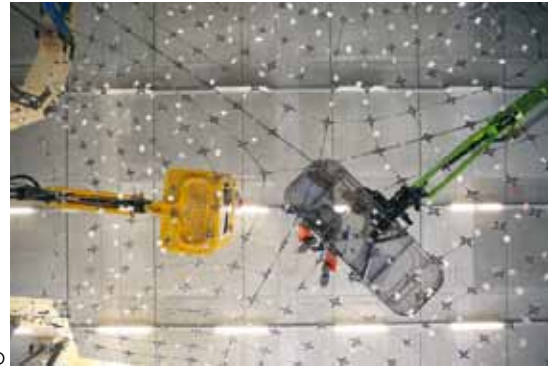
Das Konstruktionskonzept beinhaltet ein ad- aptives Steuerungssystem, das in der Lage ist, unvermeidbare Abweichungen vom theo- retischen Modell zu kompensieren, die z. B. aus Fertigungs- und Montagetoleranzen des Randträgers und des Traggerüsts resultieren. Das Festziehen oder Lösen der Seile vom Randbereich aus verändert den Kräfteverlauf innerhalb des Seilnetzes und macht es so möglich, die Schalung in die gewünschte Form zu bringen. Hierfür kam ein Algorithmus zur Anwendung, mit dem sich alle Randseile exakt justieren lassen, ohne dabei deren maxi- male Zugbeanspruchung zu überschreiten.

Bau des Prototypen

Erster Schritt im Bauablauf war die Montage des Gerüsts und der Randträger. Anschlie- ßend wurden das Seilnetz und das Schalungs- gewebe angehoben und befestigt und das Seilnetz gemäß der Vorgaben des adaptiven Steuerungssystems gespannt. Am Schluss erfolgte das Verlegen der textilen Bewehrung und Aufbringen des Spritzbetons.

Die Vormontage des Seilnetzes fand auf dem Boden statt - in Feldern, die leicht genug wa- ren, um sie noch von Hand tragen zu können. Daraufhin wurde der mediale Hauptseilstrang des Netzes hochgezogen, befestigt und um die kleineren Felder ergänzt. Auf die Seilnetz- Montage folgte das Anheben und Ablegen des maßgeschneiderten, aufgerollten Schalungs- gewebes in der Mitte des Netzes. Von dort aus wurde es abgerollt und mithilfe vorgestan- zter Löcher an den richtigen Stellen an den Knoten verankert. Schließlich erfolgte das Vorkonfektionieren und Schneiden der Kohle- faserbewehrung, die sich über dem Scha- lungsgewebe streifenweise an den Abstands- haltern jedes Knotens befestigen ließ.

Die Betonmischung war so konzipiert, dass sie - unter niedrigem Druck gesprüht - auch an den fast vertikalen Bereichen des Schalungs- gewebes haften blieb. Aufgrund des Bedarfs an flüssigen Zuschlagsstoffen wurde das Material vor Ort gemischt. Um die gesamte



D

Prototype construction

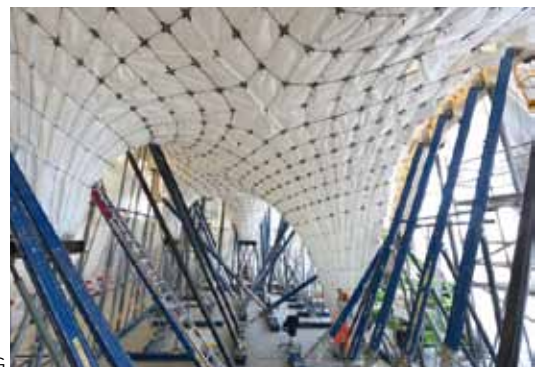
The construction process consisted of erecting the scaffolding and edge beams; hoisting and installing the cable net and fabric, fol- lowed by tensioning the cable net according to the control system process; placing the reinforcement and spraying of the concrete. The cable net was assembled on the ground in patches that were light enough to be car- ried by hand. The main spine of the net was hoisted and installed, followed by the patches. Once the cable net installation was complete, the custom-made fabric was rolled and hoisted onto the net's spine. From this position, it could be unrolled and installed in the correct location by anchoring it to the nodes through precut holes in the fabric. The carbon-fibre textile reinforcement was patterned and cut before being attached, one strip at a time, above the fabric by spacers on each node. The low-pressure sprayed concrete mix was designed to stick to the fabric shuttering, which was almost vertical in places. Liquid ad- mixtures meant that the concrete was mixed on site. Workers manoeuvred aerial working platforms from strategic locations to access the entire surface. Close proximity was required to enable the workers to use vibrating trowels to locally liquify the concrete to ensure that it completely consolidated around the carbon- fibre reinforcement without leaving any gaps. The concrete was sprayed in one continuous process to form a monolithic shell. After curing, the shell is capable of supporting its own weight without the aid of the cable net. It was decentred by releasing the tension on the boundary cables and removing them from the edge beams. The beams and scaffolding were removed, revealing the concrete shell.



E



F



G



Concluding remarks

The completion of the prototype demonstrates the efficacy and practicality of this novel flexible formwork system. The process uses significantly less material than conventional approaches to constructing doubly curved concrete formwork; employs primarily reusable scaffolding; preserves access beneath the formwork; proves the capacity of the adaptive control system to deliver improved accuracy and achieved the required tolerances.

The formwork system improves upon conventional methods for constructing doubly curved concrete shells in numerous ways. Construction time is reduced due to a significantly decreased reliance on subtractive machining or on-site craft. Material use and waste is minimised since a stiff shuttering surface that needs to be supported from below, is no longer needed. Furthermore, with the cable net only supported at the perimeter, the need for internal supports is eliminated along with any additional foundations these supports may have required. This opens up the possibility of building across rivers, roads or railway tracks without interrupting normal traffic or operation, as well as allowing worker access to the area below during construction and curing. The system incorporates features to attach reinforcement, concrete depth indicators, shear connectors and measurement aids. This functional integration reduces time on site, minimises error and increases accuracy, even for structures with complex, doubly curved geometry.

Oberfläche der Konstruktion erreichen zu können, setzten die Arbeiter Hubarbeitsbühnen ein. Die räumliche Nähe zur Schalung war nötig, damit sie den Beton stellenweise mit elektrischen Betonkellen verflüssigen konnten, um so sicherzustellen, dass er vollständig und ohne Lücken rund um die Kohlefaserbewehrung aushärtet. Mit dem Ziel, eine monolithische Schale auszubilden, erfolgte das Betonieren in einem einzigen Arbeitsgang.

Nach dem Aushärten war die Betonschale in der Lage, ihr Eigengewicht ohne Unterstützung des Seilnetzes zu tragen. Um letzteres zu demontieren, wurde die Vorspannung gelöst und die Randseile abgenommen. Nach Entfernung der Träger und des Gerüsts war die Betonschale schließlich freigelegt.

Abschließende Bemerkungen

Dieser Prototyp zeigt die Effizienz und Praxistauglichkeit des flexiblen Schalungssystems. Das Verfahren benötigt deutlich weniger Material als bisherige Methoden zum Bau doppelt gekrümmter Betonschalungen. Es verwendet vor allem wiederverwendbare Komponenten, wahrt den Zugang zum Bereich unter der Schalung, belegt die Leistungsfähigkeit des präzisen adaptiven Steuerungssystems und lässt sich mit den erforderlichen Toleranzen errichten. Hinzu kommt eine verkürzte Bauzeit vor Ort, weil dieses Schalungssystem deutlich weniger subtraktive maschinelle Bearbeitungsverfahren oder handwerkliche Tätigkeiten vor Ort erfordert. Minimiert sind auch der Materialverbrauch und die Abfallmengen, da die Notwendigkeit einer starren, von unten abgestützten Schalungsfläche entfällt. Und weil das Seilnetz nur am Rand gehalten wird, sind auch keine inneren Stützen und zusätzliche Fundamente für diese Stützen mehr nötig. Dies eröffnet nicht nur mehr Bewegungsspielraum unter der Schalung, sondern auch die Möglichkeit, über Flüsse, Straßen und Bahngleise hinweg zu bauen, ohne den Verkehr oder Betrieb zu stören.

Das Schalungssystem enthält Vorrichtungen zur Befestigung von Bewehrungen, Betonhöhenanzeigern, Scherkraftverbindern und Messhilfsmitteln. Das minimiert Fehlerquellen und erhöht zugleich die Genauigkeit, was gerade für Strukturen mit komplexer, doppelt gekrümmter Geometrie besonders wichtig ist.

