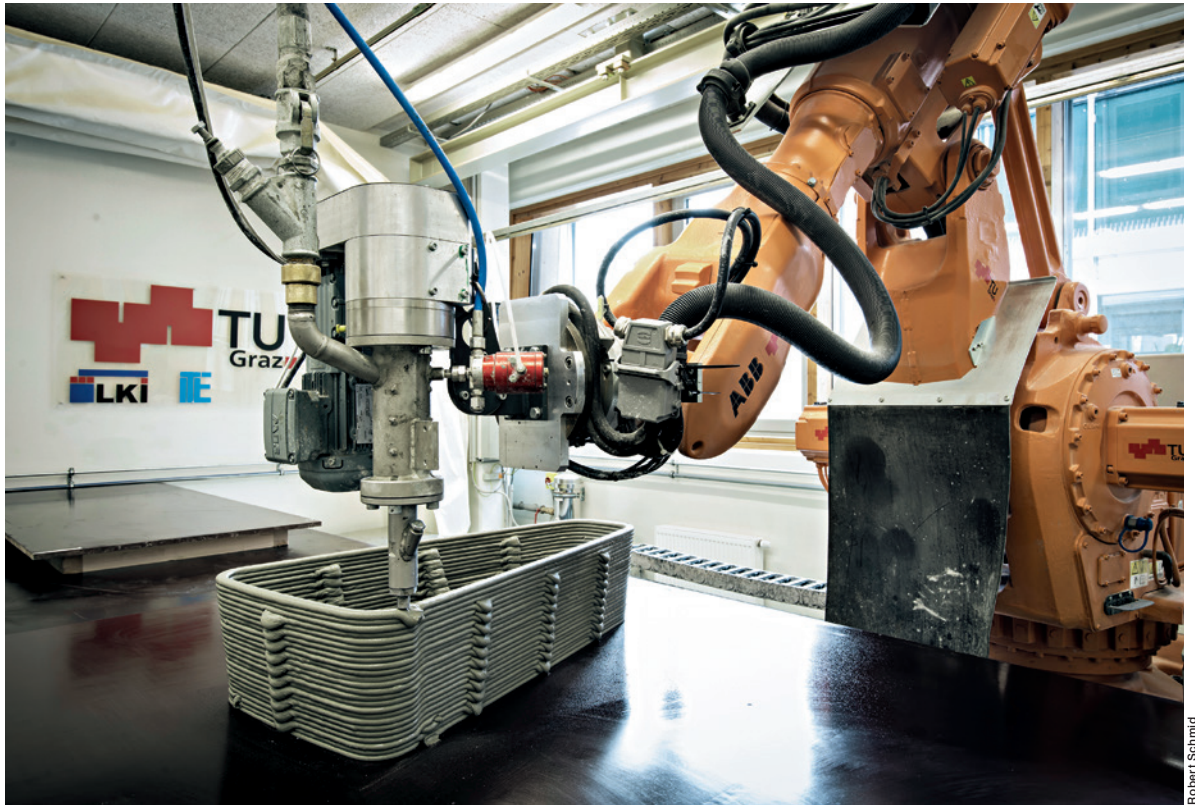


Gedruckte Schalungen für den Stahlbeton- Leichtbau

Text: Stefan Peters, Andreas Trummer

Printed Formwork for Lightweight Reinforced Concrete



Robert Schmidt

Digitale Planungs- und Produktionswerkzeuge ermöglichen die differenzierte, material- und ressourcensparende Herstellung tragender Betonbauteile. Digital design and production tools enable the manufacture of load-bearing concrete components combining a refined appearance with material and resource savings.

Die Idee, komplette Häuser aus Beton mit Hilfe eines 3D-Druckers zu bauen, wurde bereits vor 16 Jahren in der Öffentlichkeit präsentiert. Der Begriff 3D-Druck ist dabei etwas irreführend. Eher ist es heute eine Art Extrusionsverfahren für Mörtel mit skalierbaren Bauteilstärken von wenigen Millimetern bis hin zu den Wandstärken des Hochbaus im Dezimeterbereich. Die Alternative zu Schalungsbau und klassischer Betonage eröffnet neue Möglichkeiten, den Werkstoff präzise und vor allem sparsam einzusetzen. Schlanke Betonelemente mit geringen Wandstärken können individuell, mit geringem Aufwand und großer Geschwindigkeit produziert werden. Differenzierte, filigrane Schalungen, die auf den ersten Blick für Geschossbauten unwirtschaftlich erscheinen, sind dadurch auf einmal zum Greifen nahe. Das Ver-

The concept of constructing complete buildings using a 3D-printer came to the notice of the public 16 years ago. The term 3D-printing is somewhat misleading. Today, it is rather more an extrusion process using mortar with component thicknesses scalable from a few to several hundred millimetres, the thickness of the walls of a building. The alternative to erecting formwork panels and traditional concreting opens new horizons for using materials precisely and above all frugally. Slender concrete elements with thin

walls can be produced to individual designs quickly and at low cost. Discerning quality, filigree forms that appear at first glance to be unfeasible for buildings with more than one storey are all of a sudden almost within reach. The process was used by the Institute for Structural Design at Graz University of Technology in the Coebro "Additive Fabrication of Concrete Elements by Robots" research project to demonstrate the manufacture of less material- and emissions-intensive floor slabs. Waffle and ribbed slabs or filigree

fahren wurde am Institut für Tragwerksentwurf der TU Graz im Forschungsprojekt Additive Fabrication of Concrete Elements by Robots (Coebro) exemplarisch für die Herstellung eines masse- und emissionsreduzierten Flachdeckenelements angewendet. Kassetten- und Rippendecken sowie generell filigrane Stahlbetonelemente, wie sie Ingenieure wie Pier Luigi Nervi oder Aldo Favini und Architekten wie Angelo Mangiarotti in den 1960er- und 1970er-Jahren geplant haben, waren materialsparend und weiterhin sichtbare gestalterische Konstruktionselemente von Gebäuden. Diese verbrauchen beispielsweise im Vergleich zu Flachdecken 30 bis 40 % weniger Material. Heutige Geschossbauten haben dagegen oftmals punktförmig gestützte Flachdecken mit konstantem Rechteckquerschnitt, da ein erhöhter Schalungsaufwand im Vergleich zu den eingesparten Materialkosten nicht wirtschaftlich erscheint. Eine innovative und zugleich pragmatische Methode in Richtung eines neuen Betonleichtbaus sind 3D-gedruckte Schalelemente, die als verlorene Schalung dienen und mit konventionellen Betoniermethoden ergänzt werden.

3D-gedruckte Schalkörper

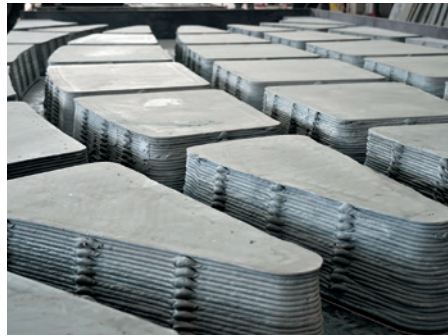
Für den Druckprozess braucht es eine Robotersteuerungseinheit, eine automatische Misch- und Förderanlage, einen Industrieroboter mit einer zusätzlichen siebten Achse, Beschleunigerpumpe und Printkopf. Über diese vielseitigen Geräte, die sich auch für Schleif-, Fräs- und Vermessungsaufgaben eignen, verfügt das Roboterlabor der TU Graz. Auf diesen basiert auch das hier vorgestellte Forschungsprojekt mit Fokus auf die Planung und Produktion eines großformatigen Prototyps im Maßstab 1:1. Das Experiment an einer gewichtsreduzierten Flachdecke sollte Erkenntnisse über den Fertigungsprozess und das Tragverhalten bringen.

Ausgangspunkt war eine 30 cm starke, punktgestützte Stahlbetonflachdecke mit einem Stützenraster von 8 m Spannweite und einer Belastung von 5 kN/m², inklusive der Ausbau- und Verkehrslasten. Diese typische Situation, beispielsweise für den Skelettbau eines Bürogebäudes, wurde nach geltenden Normen verbessert und so die erforderlichen Betonfestigkeit und Bewehrungsgrade ermittelt. Im zweiten Schritt erfolgte – mittels Optimierung in einem Finite-Element-Modell – die Transformation in eine Rippendecke.

Im zu Grunde liegenden Gedankenmodell sollte es künftig möglich sein, eine in Ortbetonbauweise geplante konventionelle Flachdecke zu einem späteren Zeitpunkt in die neue Bauweise umzuplanen. Dies erfolgt aktuell in ähnlicher Weise bei Entscheidungen zwischen Ortbeton- und Halbfertigteilbauweise und ist nur realitätsnah, wenn die Bauhöhen dabei unverändert bleiben können. Die Rippenstrukturgeometrie des Prototyps wurde iterativ in Anlehnung an einen Trajektorienverlauf, resultierend aus der Biegebeanspruchung, entwickelt. Dies ergab ein Einsparpotential von ca. 35 % bei gleicher Tragfähigkeit und gleicher Durchbiegung.

In vier Stunden stellte die 3D-Betondruckanlage 34 unterschiedlich geformte Aussparungskörper her, die auf dem Schaltisch positioniert wurden.

The 3D-concrete printer took 4 hours to make all 34 variously shaped void formers, which were put in position on the casting table.



Georg Hansemann

concrete elements in general, such as those designed by Pier Luigi Nervi or Aldo Favini and architects like Angelo Mangiarotti in the 1960s and 1970s, are earlier examples of material-saving and often visible building construction elements. They use typically 30–40 % less material compared to solid slabs. Today's multi-storey buildings, on the other hand, often have floor slabs with a constant rectangular cross-section supported at discrete points because the extra formwork cost



Georg Hansemann

Zwischen den Aussparungskörpern werden die vorgebogenen und zu Körben geflochtenen Bewehrungsseisen mit den jeweiligen Biegeradien platziert.

The reinforcing bars bent to the required radii and interlaced in their cages are placed between the void formers.

for material-saving construction makes this alternative economically unviable. An innovative and pragmatic solution pointing the way to a new type of lightweight concrete is 3D-printed formwork elements that act as lost formwork and can be used with conventional concreting methods.

3D-printed void formers

The printing process requires a robot control unit and an automatic mixing and delivery system, an industrial robot with an additional seventh axis, a booster pump and a printhead. Other equipment used during the research project, e.g. for grinding, milling and dimensional control, is provided by the Robotics Laboratory at Graz University of Technology. The focus was on the design and production of a full-scale prototype. The experiment on a weight-reduced floor slab had the aim of increasing knowledge about the manufacturing process and the load-bearing behaviour. The starting point was a 30 cm thick, point-supported reinforced concrete slab with an 8 m span between supports and a load of 5 kN/m², including dead and live load. This situation, typically found in a framed office building, was analysed in accordance with the applicable standards to determine the required concrete strength and reinforcement grade. In a second stage – optimisation using a finite element model – this design was transformed into a ribbed slab. Based on this idea, it should be possible in future to redesign a conventional in situ concrete slab to use this new method of construction. This is currently done in a similar way to the decisions over in situ and semi-precast construction and is a possibility only if the construction depths can remain the same. The geometry of the ribbed structure of the prototype was designed iteratively in a similar way to trajectory analyses based on bending moments and deflections. This gives a potential saving of approximately 35 % for the same load-bearing capacity and deflection.

Versuchskörper im Maßstab 1:1

Der daraus entwickelte Versuchskörper im Maßstab 1:1 entspricht dem Ausschnitt aus einem Deckenfeld zwischen zwei Stützen. Die Außenabmessungen (8×3 m) waren durch Transportmaße, Kranleistung und Abmessung des Prüfgerüsts begrenzt. Die Ränder der Rippen wurden durch die Konturen der einzelnen, unterschiedlich geformten Aussparungskörper gebildet. Deren maximale Abmessungen wurden auf ein Hebegewicht von bis zu 50 kg ausgelegt. Auf eine mitgeführte Bewehrung in Form von Fasern oder Drähten in den Schalkörpern konnte verzichtet werden. Aussteifende, nach innen gerichtete Rippen wirken den Beanspruchungen infolge von Anheben, Transport und Betonierdruck entgegen. Die Aussparungskörper sind zwischen 90×48 cm und 140×60 cm groß. Sie bestehen aus Mörtel der Festigkeitsklasse C85, der in 22 Schichten mit je 9×18 mm aufgetragen wird. Ihre Wände sind leicht konisch, die Ecken weich ausgerundet. Böden bzw. Deckel sind 18 mm stark. Zur Betonierseite hin wurden in regelmäßigen Abständen ca. 1 cm große Überstände eingeplant. Diese dienen der zusätzlichen Verzahnung mit dem Frischbeton sowie als Abstandhalter für die Längsbewehrung der Rippen. In netto vier Stunden erzeugte die 3D-Betondruckanlage 34 Aussparungskörper, die auf einem großformatigen Schaltisch an der vorgezeichneten Position platziert wurden, um hier auch die vorgebogenen und zu Körben geflochtenen Bewehrungseisen mit den jeweiligen Biegeradien in die Zwischenräume zu heben. Nach dem Anbringen der Randabschalung konnte die Flachdecke konventionell mit C30/37 betoniert werden. Dieses im Vergleich zur Flachdecke um 35 % leichtere Bauteil steht stellvertretend für eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten der Massereduzierung beispielsweise bei Wänden oder besonders materialintensiven Gründungsbauteilen in Stahlbetonbauweise.

Projektbeteiligte der TU Graz

Project participants of Graz University of Technology:
Institut für Tragwerksentwurf, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau, Institut für Betonbau

Team

Stefan Peters, Andreas Trummer sowie Georg Hansemann, Robert Schmid, Christoph Holzinger, Joshua P. Tapley, Bernhard Freytag, Hoang Huy Kim, Valentino Sliskovic

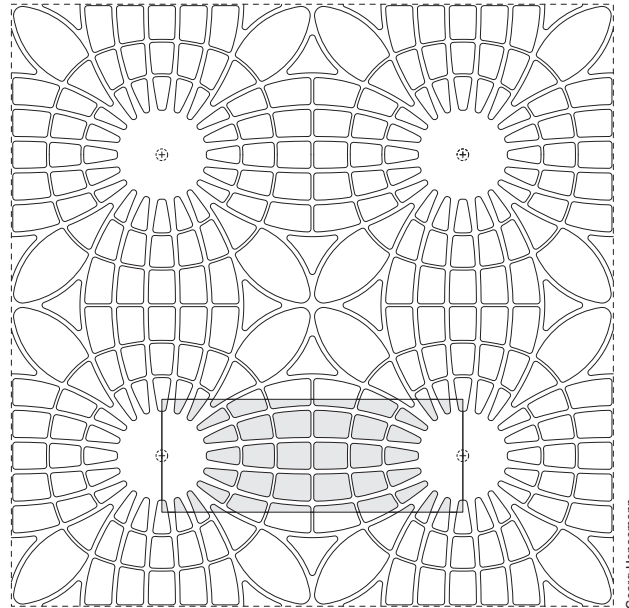
Partner

Kirchdorfer Fertigteilterhaltung, Sika Services, Peri, Hage Sondermaschinenbau, ABB

→ tugraz.at/institute/ite/home/

Deckenfeld mit an den Trajektorienverlauf angelehnten Rippen

Floor slab with ribs designed using trajectory analyses.



Full-scale test unit

The full-scale test unit developed from this analysis equates to part of a floor slab spanning between two supporting columns. The external dimensions (8×3 m) were limited by transport restrictions, crane capacity and test frame dimensions. The edges of the ribs were defined by the contours of the individual, differently shaped void formers. Their maximum dimensions were designed for lifting purposes around a weight of 50 kg. No reinforcing

fibres or pieces of wire needed to be added to the formwork mortar mix. Stiffening ribs running towards the centre resist the loads caused by lifting, transport and concrete pressure. The void formers range in size from 90×48 cm to 140×60 cm. They consist of mortar strength class C85 applied in 22 layers, each 9×18 mm. Their walls taper slightly from the bottom and the corners are gently rounded. The base and top layers are each 18 mm thick. The concreting side had 1 cm projections at regular spacings. These create an extra key into the concrete and act as spacers for the longitudinal reinforcement in the ribs. It took effectively four hours for the 3D-concrete printer to create 34 void formers, which were then placed in their predetermined positions on a large casting table. Steel reinforcement bars bent to the required radii are interlaced into cages and lifted into the voids. After attaching the edge forms, the floor unit was poured conventionally with C30/37 concrete. The 35 % weight advantage compared to a flat slab represents one of the many other possibilities for reducing, for example, the mass of walls or especially material-intensive reinforced concrete foundation components.

Prototyp der Decke im Maßstab 1:1: Transportmaße, Kranleistung und Prüfgerüst bestimmten die Maße.

Full-scale floor unit prototype: transport restrictions, crane capacity and test frame dimensions determined the size.

