

# Kontinuierliches Beton-3D-Drucken von Überhangstrukturen mittels wiederverwendbarer Stützmaterialien

## Continuous 3D concrete printing of overhang structures with reusable support materials

### Projektleiter

#### Project leaders:

Paul Blankenstein,  
Ronny Lang

### Projektbearbeiter

#### Persons in charge:

Paul Blankenstein,  
Johannes Kohl,  
Julia Kaufhold

### Fördermittelgeber

#### Co-funded by:

BBSR (Zukunft Bau)

### AUSGANGSSITUATION UND ZIELSTELLUNG

Beton ist der weltweit am häufigsten verwendete Baustoff. Seine Konsistenz ist im frischen Zustand üblicherweise so eingestellt, dass er nach dem Ausbringen nicht formstabil ist. Die meisten Betonarten benötigen deshalb Schalungen für den Einbau. Der Einsatz dieser Schalungen führt zu hohen Material-, Arbeits- und Maschinenkosten sowie Zeitverzögerungen und Umweltbelastungen. Möglichst schalungsfreie Bauweisen sind daher zukünftig anzustreben. Das 3D-Drucken zementgebundener Werkstoffe ist eine zukunftsfähige Option, die all diese Problemstellungen überwinden kann.

3D-Druck, auch generative oder additive Fertigung genannt, beschreibt Prozesse, bei denen Strukturen schichtweise und automatisiert aufgebaut werden. Es existiert eine Vielzahl additiver Fertigungstechnologien. Für die Herstellung zementbasierter Bauteile bietet die extrusionsbasierte Fertigung mit Zementwerkstoffen für großformatige Strukturen aufgrund wirtschaftlicher Aspekte das größte Potential. In dieser Form generierte Strukturen können im Hausbau Ziegel oder Gussbeton problemlos ersetzen. Bewehrungen, die dem Beton neben der vorhandenen Druckfestigkeit auch relativ hohe Biege- und Zugfestigkeiten verleihen, sind auch in Strukturen möglich, die mit additiven Verfahren hergestellt werden.

### INITIAL SITUATION AND OBJECTIVE

Concrete is the most frequently used building material worldwide. Its consistency when fresh is usually such that it is not dimensionally stable after spreading. Therefore, most kinds of concrete require formwork for keeping it in place. The use of such formwork forms has high material, labour and machine costs in its wake as well as time delays and environmental pollution. Therefore, formwork-free construction methods should be endeavoured in the future to the largest possible extent. 3D printing of cement-bonded materials is a sustainable option that can overcome all these issues.

3D printing, also known as generative or additive manufacture, describes processes in which structures are built up layer by layer and in an automated way. There is a large variety of additive manufacturing technologies. Extrusion-based manufacture for making cement-based components using cement materials for large-size structures offers the greatest potential for economic reasons. Structures generated in that way can easily replace house-building structures made of brick or poured concrete. Reinforcements that provide concrete with relatively high bending and tensile strengths in addition to the existing compressive strength are also possible in structures generated by additive processes. Currently available 3D concrete printing processes enable direct, vertical layer placement very well. In contrast,

Derzeit verfügbare 3D-Betondruckverfahren ermöglichen sehr gut die direkte, vertikale Schichtablage. Demgegenüber sind geneigte, auskragende oder horizontal freitragende Elemente derzeit nicht oder nur stark eingeschränkt fertigbar.

Im Vorhaben sollten die prozess- und anlagentechnischen Voraussetzungen für die Generierung stark geneigter, auskragender bzw. horizontal freitragender Bauteilstrukturen in einem kontinuierlichen, extrusionsbasierten Beton-3D-Druckverfahren geschaffen werden.

#### VORGEHENSWEISE

Grundlage des Lösungswegs war die Nutzung von Stützmaterialien, wie es bei anderen extrusionsbasierten Drucktechnologien möglich ist, da rein mit Beton derartige Geometrien nicht in 3D-Druckverfahren darstellbar sind. An das Stützmaterial werden dabei hohe Anforderungen gestellt: förder- und austragbar, schnell aushärtend, formstabil, Aufnahme der Drucklasten, des Weiteren kostengünstig, umweltfreundlich, wiederverwendbar und lagerfähig. Das Projekt BioConSupport (gefördert durch Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., FKZ 22010917) beinhaltetete zum Zeitpunkt der Antragstellung vielversprechende Stützmaterialien auf Basis des natürlichen Bindemittels Stärke. Holzpartikel dienen dabei als Füllstoffe und zur Unterstützung der Austragbarkeit, Formstabilität und Festigkeit. Auf Grundlage dieser Stützmaterialentwicklung sollten derartige Holz-Stärke-Komposite in den Beton-3D-Druckprozess integriert werden. Dafür wurde ein gemeinsamer Prozess mit aufeinander abgestimmter Anlagentechnik für Beton- und Stützmaterial-3D-Druck

inclined, projecting or horizontally cantilevered elements are currently not, or only to a very limited extent, possible to manufacture.

In the project, the process and plant engineering prerequisites for the generation of strongly inclined, projecting or horizontally cantilevered component structures in a continuous, extrusion-based concrete 3D printing process were to be created.

#### APPROACH

The basis for the approach was the use of support materials, likewise possible in other extrusion-based printing technologies, as such geometries cannot be represented in 3D printing processes using concrete alone. In that respect, high requirements are posed to the support material: conveyable and spreadable, quickly curing, dimensionally stable, load-bearing, but also cost-effective, environmentally friendly, reusable and storable. At the time for applying for it, the BioConSupport project (promoted by the special agency of Nachwachsende Rohstoffe e. V., FKZ 22010917) included promising support materials on the basis of starch as a natural binder. Wood particles serve as filler material and for the support of its spreadability, dimensional stability and strength. Based on this support material development, such wood-starch composites were to be integrated in 3D concrete printing. To that end, a joint process of orchestrated 3D-printing equipment for concrete and support on a lab-scale was created. This required adjustments in material composition regarding the conveying technology, storability, removability and reusability. Construction options were investigated

im Labormaßstab geschaffen. Dazu erfolgten Anpassungen der Materialzusammensetzung hinsichtlich Fördertechnik, Lagerfähigkeit, Entfernbarkeit und Wiederverwendbarkeit. Konstruktive Aufbaumöglichkeiten wurden eingehend untersucht, um das Material für die industrielle Anwendung nutzbar zu machen. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen flankierten das Vorhaben.

## ERGEBNISSE

Die Festigkeitseigenschaften einer Stützstruktur beim 3D-Druck von Beton müssen nur temporär den Anforderungen genügen, da die Strukturen bereits nach kurzer Zeit wieder entfernt werden. Längerfristige Eigenschaften sind nur aus Gründen der Recyclingfähigkeit wichtig. Allerdings wurde 24 Stunden nach der Stützmittel-Produktion ein sehr intensives Pilzwachstum beobachtet. Die mikroskopischen Aufnahmen deuteten auf die Bildung des „Schwarzen Mehltaus“ hin, der auch als Aspergillose oder Schwarzer Schimmel bezeichnet wird.

Die Referenzmischung des Stützmaterials auf Holzstärkebasis wies gute Fließeigenschaften aufgrund des hohen Wasseranteils von 70 Gew-% (Gewichtsmassenprozent) auf. Das Stützmaterial muss jedoch schnellstmöglich nach der Austragung mechanisch auf Druck voll belastbar sein, um die resultierende Last aus den folgenden Schichten abtragen zu können. Die eigentliche Festigkeitsentwicklung des Holz-Stärke-basierten Stützmaterials setzt durch das Verdunsten des Wassers ein. Im Verlauf der Materialentwicklung wurden verschiedene Möglichkeiten zur Trocknungsbeschleunigung in Betracht gezogen. Zusätzlich führte die Gefahr

in depth in order to make the material exploitable by industry. Economic feasibility complemented the project.

## RESULTS

The strength characteristics of a support structure in 3D concrete printing only have to meet the requirements temporarily, as the structures are removed again after a short time. Longer-term properties are only important for reasons of recyclability. However, very intensive fungal growth was observed 24 hours after the support production. The microscopic images indicated the formation of “black mildew”, also known as aspergillosis or black mould.

The referential mixture of the support material based on wood starch showed good flow properties due to the high portion of water of 70 % of weight mass. However, the support material must be fully mechanically load-bearable under pressure as soon as possible after discharge in order to be able to take the resulting load from the following layers. The actual strength development of the wood-starch-based support material sets in with the water vaporising. In the course of the material development, various possibilities for accelerating drying were considered. In addition, the risk of mould growth led to the consideration of replacing the starch in the formulation of the support material by calcium sulphate- $\beta$ -hemihydrate. This was intended to cause chemical drying and allow adjustability of the strength development. The hydration of the hemihydrate was to start after the extrudate was deposited and to remove excess water from the material. Follow-up tests were able to prove that



Abb. 1: Herstellungsprozess eines Demonstrators des kontinuierlichen Betonbaus

Fig. 1: Manufacture of a demonstrator of continuous concreting

der Schimmelpilzbildung zu der Überlegung, die Stärke in der Rezeptur des Stützmaterials durch Calciumsulfat- $\beta$ -Halbhydrat zu ersetzen. Dies sollte eine chemische Trocknung bewirken und eine Einstellbarkeit der Festigkeitsentwicklung ermöglichen. Die Hydratation des Halbhydrats sollte nach dem Ablegen des Extrudats einsetzen und dem Werkstoff das überschüssige Wasser entziehen.

In den darauffolgenden Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass holzbasierte, calciumsulfatgebundene Stützmaterialien für den Beton-3D-Druck geeignet sind (Abb. 1).

Offen bleibt, inwiefern sich das in dieser Arbeit bearbeitete Stützmaterial in der Konkurrenzsituation mit anderen Stützkonzepten behaupten kann. Die Stärken des extrudierbaren Stützmaterials liegen gerade bei Abweichungen von orthogonalen Regelgeometrien, wie geneigte oder mehraxial gekrümmte Bauteile.

wood-based, calcium-sulfate-bound support materials are suitable for 3D concrete printing (Fig. 1).

It remains unsolved to what extent the support material dealt with in this project can maintain its position in competition with other support concepts. It is just the deviations from orthogonal geometries, such as inclined or multi-axially curved components, that make out distinctive advantages of the extrudable support material.