

Abfallfreie Herstellung von Betonbauteilen durch die Verwendung einer gefrorenen Sandschalung | Waste-free production of concrete components by means of a frozen sand formwork

- ▶ Oliver Gericke, Daria Kovaleva, Walter Haase, Werner Sobek
- ▶ Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

1 Einführung

Durch computergestützte Methoden zur Formfindung und Strukturoptimierung können heute Betonstrukturen entwickelt werden, die optimal an ihre jeweilige statische Aufgabe angepasst sind. Mit dem reduzierten Material- und Energieverbrauch der optimierten Struktur geht jedoch zumeist eine Geometrie einher, deren Herstellung material- und arbeitsintensiver Schalungstechniken bedarf. Auch vor dem Hintergrund einer absehbaren Knappheit von für die Bauindustrie wichtigen Materialien hat Werner Sobek schon 1999 mit der Triple-Zero®-Maxime – *zero fossil based energy, zero waste, zero emission* – gefordert, in Bauprozessen idealerweise nur recycelbare Materialien zu verwenden [1]. Dem steht die Forderung gegenüber, dass eine Schalungstechnik die Formgebung, Konstruktion oder Herstellung von optimierten, insbesondere geometrisch komplexen Bauteilen in keiner Weise einschränken sollte.

Ein möglicher Ansatz, der beide Forderungen weitgehend erfüllt, ist die Verwendung von Erdreich als Schalungsmaterial für Betonschalen: Ein Hügel wird aufgeschüttet und angeformt und dann mit Beton übergossen. Nach dem Aushärten kann die so entstandene Schale durch Abgraben des Erdreichs ausgeschalt werden. Diese Methode wurde bereits 1955 beim Bau des 66,3 m weit spannenden Albuquerque Civic Auditorium angewandt [2]. Heinz Isler, der diese Methode in [3] als den *frei geformten Hügel*

1 Introduction

Today, computer-aided methods for form-finding and structural optimization can be used to develop concrete structures that are optimally adapted to their structural requirements. However, the reduced material and energy consumption of the optimized concrete structure usually goes hand in hand with complex geometry whose production usually requires material- and labour-intensive formwork techniques. With a foreseeable scarcity of essential construction materials in mind, Werner Sobek back in 1999 coined the Triple-Zero® concept – *zero fossil-based energy, zero emission, zero waste* – which demands that only recyclable materials should be used in construction processes [1]. Thus, there is a demand for waste-free formwork technology that simultaneously should in no way restrict the shaping, design or manufacture of optimised, and therefore, geometrically complex components.

One possible approach that largely satisfies both requirements is the use of soil as formwork material for concrete shells: a hill is heaped up, shaped and then covered with concrete. After hardening, the resulting formwork can be removed by digging off the soil. This method was used as early as 1955 in the construction of the Albuquerque Civic Auditorium (66.3 m) [2]. Heinz Isler, who presented this method in [3] as the *freely formed hill* (Fig. 1), attributed to it the greatest freedom for the design of shells. More



Bild 1: Der frei geformte Hügel als Schalung für einen Beton-Iglu | **Fig. 1:** The freely shaped hill as formwork for a concrete igloo



Bild 2: Teshima Art Museum, 2010; die Schalung aus Sand wurde durch die elliptische Öffnung ausgehoben | **Fig. 2:** Teshima Art Museum, 2010; the formwork made of sand was excavated through the elliptic opening

vorstellte (Bild 1), maß ihr die größte Freiheit für den Entwurf von Schalen bei. In jüngerer Vergangenheit wurde eine Schalung aus Erdreich beim Bau des Kunstmuseums in Teshima (Bild 2) erfolgreich in großem Maßstab angewandt [4]. Das Schalungsmaterial für die bis zu 60,2 m weit spannende Schale konnte auch hier vollständig rückgewonnen werden.

Im Rahmen des Projekts *Automatisierte adaptive Schalungsmethode zur Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten Oberflächen* wurde am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart die Schalungsmethode der gefrorenen Sandschalung entwickelt. Diese Methode vereint die Vorteile des Schalungsmaterials Sand mit der hohen Präzision CNC-gesteuerter Fertigungsmethoden. Die Formstabilität der Schalung während der Bearbeitung und der Betonage wird gewährleistet, indem der Sand mit Wasser gemischt und anschließend eingefroren wird. Aufgrund des festen Zustands während der Bearbeitung und des granularen Verhaltens nach abschließendem Auftauen des Sands können auch komplexe, feingliedrige Betonbauteile hergestellt und ohne großen Aufwand ausgeschalt werden. Der Sand kann beliebig oft wiederverwendet werden.

Anschließend an [5] fasst der vorliegende Beitrag die Forschungen zu der Schalungsmethode des gefrorenen Sands im DFG-Schwerpunktprogramm 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ zusammen.

recently, an earth formwork was successfully used on a large scale in the construction of the Art Museum in Teshima (Fig. 2) [4]. The formwork material for the up to 60.2 m wide formwork could also be completely regained here.

Within the framework of the project *Automated adaptive formwork method for the production of concrete components with curved surfaces*, the frozen sand formwork method was developed at the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK) at the University of Stuttgart. This formwork method combines the advantages of the formwork material sand with the high precision of CNC-controlled production methods. The geometrical stability of the formwork during processing and concreting is ensured by mixing the sand with water and then freezing it. Due to the solid-state during processing and the granular behaviour after final thawing of the sand, even complex and delicate concrete components can be produced and demoulded without great effort. The sand can be reused virtually indefinitely.

Following [5], this article summarises the research on Frozen Sand Formwork Method in the framework of DFG Priority Programme 1542 “Concrete Light”.

2 Herstellung gefrorener Sandschalungen

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte zur Herstellung einer mehrteiligen Schalung aus *gefrorenem Sand*, nämlich die Herstellung des Werkstücks, die formgebende Bearbeitung, das Zusammensetzen mehrerer Schalungsteile zu einer Schalung und die Betonage, beschrieben (Bild 3). Untersuchungen zu den dargelegten Fertigungsparametern sind in ausführlicher Fassung in [4], [5] veröffentlicht.

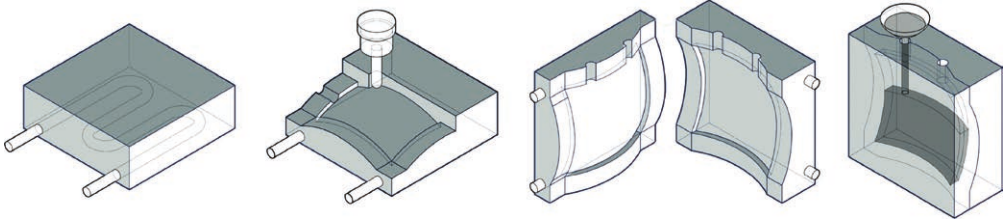


Bild 3: Grundsätzliche Schritte zur Herstellung einer Schalung aus gefrorenem Sand (v. l. n. r.): Herstellung und Einfrieren eines Werkstücks aus einem Sand-Wasser-Gemisch, formgebende Bearbeitung, Zusammensetzen mehrerer Schalungsteile, Betonage | **Fig. 3:** Principal steps of the production process of frozen sand formwork (from left to right): production and freezing of a raw geometry made from a mixture of sand and water, milling, assembly of multiple formwork parts, casting of concrete

Das Werkstück zur Schalungsherstellung wird aus einem Gemisch aus Wasser und Sand hergestellt. Der Sand mit einer Sieblinie von 0,063 mm bis 0,315 mm wird mit dem Wasser in einem Gewichtsverhältnis von 1 : 0,15 vermischt. Die Mischung wird in einer Form mit eingebetteten Kupferrohren und einem angeschlossenen Kühlkreislauf bis zu einer Oberflächentemperatur von $-7,5^{\circ}\text{C}$ abgekühlt. Während der Bearbeitung muss das Werkstück *in situ* kontinuierlich weiter gekühlt werden.

Die formgebende Bearbeitung des Werkstücks erfolgt mittels CNC-Fräsen in zwei Arbeitsschritten. Zunächst findet im *Schruppgang* unter großer Materialabnahme eine Annäherung an die angestrebte Fertigteilgeometrie statt. Im folgenden *Schlichtgang* wird die Geometrie mit feineren Fräsern und höherer Präzision herausgearbeitet (Bild 4). Die Parameter der Bearbeitung orientieren sich dabei hauptsächlich an einer möglichst kurzen Bearbeitungsdauer, einer möglichst hohen Maßhaltigkeit der Schalungsgeometrie sowie einer möglichst hohen

2 Production of frozen sand formwork

In the following, the individual steps for the production of a multi-part formwork from frozen sand are described, namely the production of the workpiece, the shaping processing, the assembly of several formwork parts into one formwork and the concreting (Fig. 3). Detailed investigations of described production parameters are published in [4] and [5].

The workpiece for formwork production is made from a mixture of water and sand. The sand with grain sizes from 0.063 mm to 0.315 mm is mixed with water in a weight ratio of 1 : 0.15. The mixture is then cooled down to a surface temperature of -7.5°C in a mould with embedded copper pipes and a connected cooling circuit. During machining, the workpiece is continuously cooled *in situ*.

The machining of the workpiece to the final geometry is carried out by CNC-milling in two steps. First, an approximation to the desired target geometry takes place in the roughing step with a large amount of excavated material. In the following finishing step, the geometry is worked out with finer milling cutters and higher precision (Fig. 4). The machining parameters are mainly oriented towards the shortest possible machining time combined with the highest possible dimensional accuracy of the formwork geometry and the longest possible tool life of the milling cutters. Previous investigations ([5]) have shown that single-edged solid carbide

Standzeit der Fräser. In vorhergehenden Untersuchungen konnte gezeigt werden [5], dass einschneidige Fräser aus Vollhartmetall (VHM) die geringste Abnutzung bei der Bearbeitung des abrasiven Materials Sand aufweisen.

Wenn die Schalung aus mehreren Einzelteilen zusammengesetzt werden soll (Bild 5), so werden diese zunächst einzeln bei konstanter Kühlung aller Teile hergestellt. Unmittelbar vor dem Einbringen des Betons wird die Kühlung deaktiviert. Der Beton wird anschließend direkt in die gefrorene Schalung eingebracht. Es werden keine Zwischenschichten, beispielsweise aus Formtrennmittel, vorgesehen. Für alle vorgestellten Versuche wurde der Vergussmörtel SikaGrout 551 [6] verwendet, der aufgrund hoher Fließfähigkeit, der feinsandigen Sieblinie (Größtkorn 1 mm) und seiner selbstverdichtenden Eigenschaften ausgewählt wurde. Die in diesem Zusammenhang relevanten Eigenschaften und Parameter der verwendeten Betonmischung sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Bei Beginn der Betonage wird die Kühlung deaktiviert. Auch im aufgetauten Zustand behält die Sandschalung dabei ihre äußere Form für



Bild 4: Schalungsgeometrie während des Schlichtgangs der formgebenden Bearbeitung | **Fig. 4:** Formwork geometry during finishing step of the milling process

(VHM) milling cutters have the lowest wear when machining the abrasive material sand.

If the formwork is to be assembled from several individual parts (Fig. 5), these are first produced individually with constant cooling of all parts. Cooling is deactivated immediately before concreting. The concrete is then cast directly into the frozen formwork. No intermediate layers, e.g. mould release agent, are provided. The grouting mortar SikaGrout 551 [6] was used for all the presented tests. It was selected for its high flowability, fine sand grading curve (max-

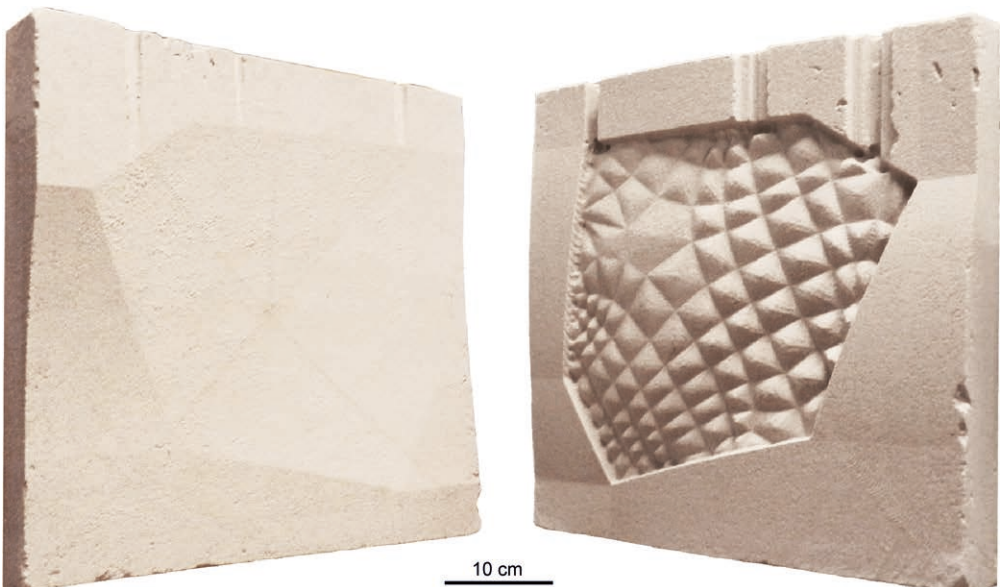


Bild 5: Zwei Teile einer Schalung vor dem Zusammensetzen | **Fig. 5:** Two parts of a formwork before being assembled

SikaGrout 551	
Charakteristische Druckfestigkeit Characteristic compressive strength	Zylinder Cylinder: 50 MPa Würfel Cube: 60 MPa
Frühfestigkeitsklasse gemäß [7] Early strength class acc. to [7]	A (40 MPa nach after 24 h)
Konsistenz gemäß [7] Consistency acc. to [7]	Fließmaßklasse Slump class: f1
Größtkorn Max. aggregate size	1 mm
Zusatzmittel Additives	Fließmittel Superplasticizer: Sika® ViscoCrete®-1020 X (1,5 % des Zementgewichts 1.5 % of the cement weight)
Umgebungsbedingungen beim Anmischen Ambient conditions during mixing	Umgebungstemperatur Ambient temperature: 20 °C Relative Luftfeuchte Relative air humidity: 65 %

Tabelle 1: Eigenschaften von SikaGrout 551 für die Herstellung von Betonbauteilen mit gefrorener Sandschalung [6] |

Table 1: Properties of SikaGrout 551 for the fabrication of concrete parts with frozen sand formwork [6]

mehrere Tage. Im Allgemeinen werden Bauteile nach 24 Stunden ausgeschalt, wobei der rückgewonnene Sand stets vollständig wiederverwendet werden kann.

3 Untersuchungen

Während in [5] die grundsätzlichen Fertigungsparameter wie die Auswahl geeigneter Fräser und praktikable Verdichtungsmethoden diskutiert wurden, werden im vorliegenden Beitrag die Untersuchungen auf der Bauteilebene wie der Schalungsentwurf und der Einfluss der Schalungstemperatur auf die Eigenschaften des Betons beschrieben. Zusätzlich dazu wird eine Variation der Methode der gefrorenen Sandschalung vorgestellt, mit der feingliedrige räumliche Schalungsgeometrien hergestellt werden können.

3.1 Bauteilumschließende Schalung

Mit dieser Versuchsreihe wurden Fertigungsparameter für die Herstellung einer mehrteiligen Schalung erprobt. Hierbei sollte möglichst das ganze Bauteil beziehungsweise die entsprechende Kavität von gefrorenem Sand umschlossen sein. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsreihe wurde in [8] veröffentlicht.

In einem Entwurfsraum mit den Maßen 450 mm × 450 mm × 100 mm wurden zwei identische flächige Bauteile vorgesehen (Bild 6). Diese wurden mit kleinen Krümmungsradien und

imum grain size 1 mm) and self-compacting properties. The relevant properties and parameters of the concrete mix used in this context are listed in Table 1.

The cooling is deactivated upon casting. Even when thawed, the sand formwork retains its outer shape for several days. In general, components are demoulded after 24 hours at which point the sand is regained and can be completely reused.

3 Investigations

While [5] dealt with fundamental production parameters such as the selection of suitable milling cutters and practicable compaction methods, in this report the investigations at the component level such as the formwork design and the influence of the formwork temperature on the properties of the concrete are described. In addition, a variation of the frozen sand formwork method is presented, which can be used to produce filigree spatial formwork geometries.

3.1 Component-enclosing formwork

This test series was used to test production parameters for the manufacture of a multi-part formwork. If possible, the entire component or the corresponding cavity should be enclosed in frozen sand. A detailed description of the test series was published in [8].

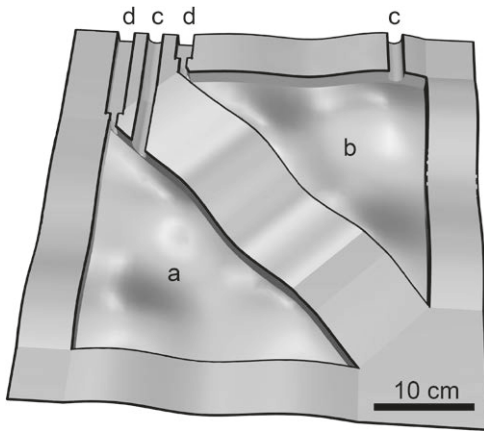


Bild 6: Schalungsgeometrie mit Kavitäten (a, b), Einfüllkanälen (c) und Entlüftungskanälen (d) | **Fig. 6:** Formwork geometry with cavities (a, b), sprues (c), and risers (d)

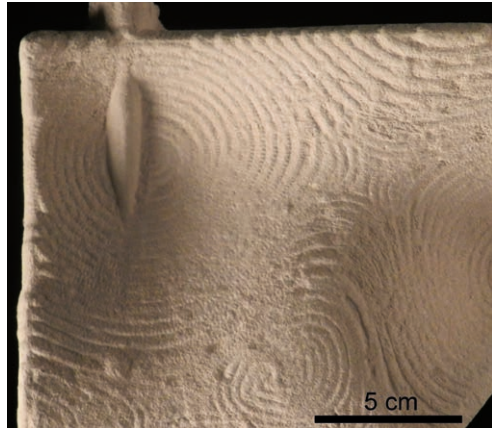


Bild 7: Hergestelltes Bauteil mit Abweichungen von der geplanten Geometrie im Bereich der Einfüllkanäle | **Fig. 7:** Fabricated concrete part with deviations from the planned geometry near the sprues

häufigen Krümmungswechseln entworfen und so in der Schalung angeordnet, dass sie völlig von gefrorenem Sand umschlossen waren. Zum Befüllen wurde ein Angussystem vorgesehen, das aus einem Einfüllkanal für den Beton sowie einem Entlüftungskanal am Hochpunkt der Kavität bestand. Die Schalung bestand aus zwei Teilen, die an einer gekrümmten Kontaktfläche gestoßen wurden. Die unebene Form der Kontaktfläche ermöglichte das passgenaue Platzieren der beiden Schalungsteile gegeneinander ohne Hilfsmittel.

Mit dem Versuch konnte gezeigt werden, dass flächige gekrümmte Bauteile in einer umschließenden Schalung aus gefrorenem Sand mit hoher Formtreue hergestellt werden können. Selbst feingliedrige Teile der Schalungsgeometrie, wie die Spurrillen des Fräasers, blieben während der Herstellung erhalten und wurden durch den Beton abgebildet (Bild 7). Alle Formen wurden ohne das Auftreten von Lufteinschlüssen komplett aufgefüllt. Nach der Entnahme der Bauteile aus der Schalung konnte das Schalungsmaterial vollständig rückgewonnen und wiederverwendet werden.

Abweichungen von der entworfenen Geometrie konnten nur dort festgestellt werden, wo der Beton während der Betonage an dem gefrore-

In a design space with the dimensions 450 mm × 450 mm × 100 mm, two identical flat components were placed (Fig. 6). These were designed with small radii of curvature and various changes of curvature and arranged in the formwork in such a way that they were completely enclosed by frozen sand. To enable casting, a sprue system consisting of a concrete filling channel and a venting channel at the highest point of the cavity was used. The formwork consisted of two parts which are in contact through a curved contact surface. The uneven shape of the contact surface made it possible to place the two formwork parts exactly against each other without any additional aids.

The test showed that flat curved components can be produced from frozen sand with high dimensional accuracy in an enclosing formwork. Even delicate parts of the formwork geometry, such as the track grooves of the milling cutter, were retained during production and were mapped by the concrete (Fig. 7). All moulds were completely filled without the occurrence of air inclusions. After removing the components from the formwork, the formwork material could be completely recovered and reused.

Deviations from the designed geometry could only be detected where the concrete had flowed

nen Sand entlanggeflossen war. Folgende Punkte sollten daher für den Entwurf von Angussystemen berücksichtigt werden:

- Zuflusskanäle sollten so angeordnet werden, dass beim Befüllen der Schalung kein Beton an den Wänden der Schalung entlangfließt.
- Entlüftungskanäle müssen an jedem lokalen Hochpunkt einer Kavität angeordnet werden.

3.2 Einfluss der Schalungstemperatur

In diesem Versuch wurde der Einfluss der gefrorenen Sandschalung auf die mechanischen Eigenschaften des Betons quantifiziert. In einer Kombination aus zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen wurden die Entwicklung der Druckfestigkeit sowie die des statischen Elastizitätsmoduls für ein Betonalter zwischen 0,5 und 28 Tagen untersucht.

Hierfür erfolgte die Herstellung von 40 mm × 40 mm × 160 mm großen Prismen aus SikaGrout 551 mit drei verschiedenen Methoden:

- | | |
|-------------------------|--|
| 1. Referenz | mittels Stahlschalung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte, |
| 2. Sand, kalt | mittels gefrorener Sandschalung ohne Nachbehandlung der Schalung nach der Betonage und |
| 3. Sand, erwärmt | mittels gefrorener Sandschalung, die nach Einbringen des Betons auf 20 °C erwärmt wurde. |

An den Prismen konnten in Abständen von 1 bis 3 Tagen anhand einer zerstörungsfreien Prüfung mit der Impakt-Resonanz-Methode nach [9] der dynamische Elastizitätsmodul zerstörungsfrei ermittelt und die Druckfestigkeit sowie der statische Elastizitätsmodul abgeschätzt werden. Der Zusammenhang zwischen dynamischem Elastizitätsmodul und der Druckfestigkeit bzw. dem statischen Elastizitätsmodul ist in der Literatur in Form empirischer Gleichungen umfassend dokumentiert [10], [11]. Die Formeln aus der Literatur

along the frozen sand during concreting. The following points should, therefore, be considered for the design of sprue systems:

- Inlet channels should be arranged in such a way that no concrete flows along the walls of the formwork when the formwork is filled.
- Ventilation ducts must be located at all local high points of a cavity.

3.2 Influence of formwork temperature

In this experiment, the influence of the frozen sand formwork on the mechanical properties of the concrete was quantified. In a combination of non-destructive and destructive tests, the development of the compressive strength and the static modulus of elasticity were investigated for a concrete age between 0.5 and 28 days.

For this purpose, prisms with dimensions of 40 mm × 40 mm × 160 mm were manufactured from SikaGrout 551 using three different methods:

- | | |
|-------------------------|---|
| 1. reference: | prisms were cast into steel formwork at 20 °C and 65% relative humidity, |
| 2. sand, frozen: | prisms were cast into frozen sand formwork without post-treatment of the formwork after concreting, and |
| 3. sand, heated: | prisms were cast into frozen sand formwork that is heated to 20 °C after concreting. |

The dynamic modulus of elasticity could be determined non-destructively on the prisms at intervals of 1 to 3 days by means of a non-destructive test with the impact-resonance method according to [9]. From this, the compressive strength as well as the static modulus of elasticity could be estimated. The relationship between the dynamic modulus of elasticity and compressive strength or static modulus of elasticity is comprehensively documented in the literature in the form of empirical equations [10], [11]. The formulas from

wurden für jede der drei Herstellungsmethoden kalibriert, indem an einzelnen Prismen nach der zerstörungsfreien Prüfung zusätzlich der statische Elastizitätsmodul sowie die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390 [12] zerstörend ermittelt wurden. Die Genauigkeit dieser Abschätzung hängt dabei direkt von der Streuung der Festigkeitswerte ab. Die in Bild 8 gezeigten Werte für die Druckfestigkeit und den statischen Elastizitätsmodul wurden mit den kalibrierten empirischen Formeln nach [10], [11] ermittelt.

Die Ergebnisse der Werkstoffprüfung belegen, dass die Verwendung einer gefrorenen Sandschalung die Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul eines derart hergestellten Bauteils negativ beeinflusst. Wenn die Schalung jedoch nach Einbringen des Betons erwärmt wird, können Festigkeit und Steifigkeit erhöht werden. Die Druckfestigkeit aufgrund der erwärmten Schalung übersteigt dabei die der Referenzkörper. Auf den Ergebnissen aufbauend wurde der in Abschnitt 2 vorgestellte Herstellungsansatz um die Erwärmung der Schalung nach der Betonage erweitert.

the literature were calibrated for each of the three manufacturing methods by additionally determining the static modulus of elasticity as well as the compressive strength according to DIN EN 12390 [12] destructively on individual prisms after the non-destructive test. The accuracy of this estimation depends directly on the scatter of the strength values. The values for compressive strength and static modulus of elasticity shown in Fig. 8 were determined using the calibrated empiric formulae according to [10], [11].

The results of the material test show that the use of frozen sand formwork has a negative effect on the compressive strength and modulus of elasticity of a component produced in this way. If, however, the formwork is heated after the concrete has been cast, strength and stiffness can be increased. The compressive strength due to the heated formwork even exceeds that of the reference bodies. Based on the results, the manufacturing approach presented in Section 2 was extended to include heating of the formwork after concreting.

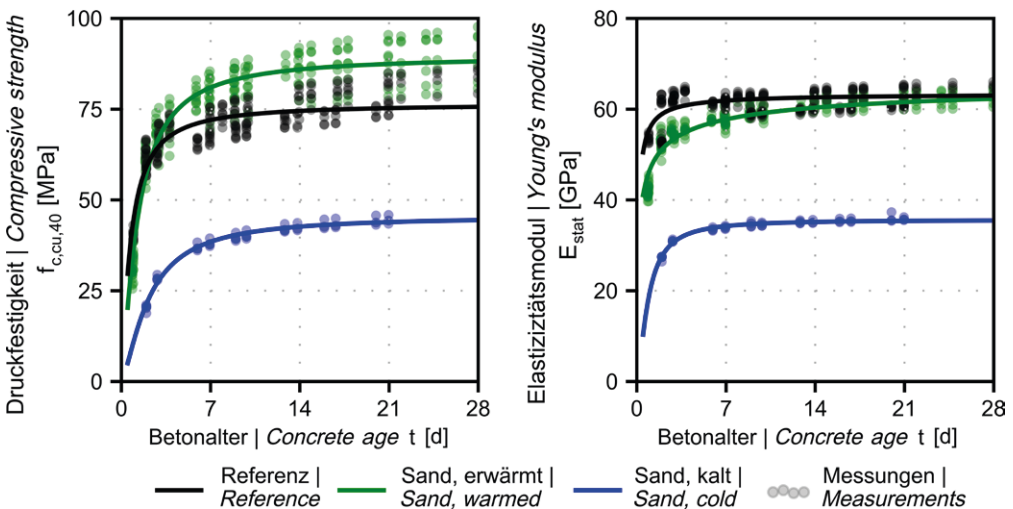


Bild 8: Ergebnisse und Regressionskurven für den Verlauf der Druckfestigkeit (links) und des statischen Elastizitätsmoduls (rechts) in Abhängigkeit zum Betonalter der Proben zwischen 0,5 und 28 Tagen | **Fig. 8:** Results and regression curves for compressive strength (left) and Young's modulus (right) for a concrete age of the specimen of 0.5 to 28 days

3.3 Komplexe Geometrien

Mit einer weiteren Versuchsreihe sollte nachgewiesen werden, dass mit der *Methode der gefrorenen Sandschalung* auch Bauteile mit dünnwandigen und filigranen Geometrien hergestellt werden können. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsreihe wurde in [13] veröffentlicht.

Innerhalb eines Entwurfsraums von 450 mm × 450 mm × 100 mm wurde ein dünnwandiges Schalensegment entworfen, dessen innere Struktur auf der Grundlage einer angenommenen Beanspruchung auf zwei Arten angepasst wurde:

- A. Entsprechend ermittelter Spannungstrajektorien wurde ein Rippenraster vorgesehen. Die Rippen wiesen eine Höhe von 18 mm auf. An der dünnsten Stelle war das Segment 5 mm dick.
- B. Entsprechend der ermittelten Materialausnutzung wurde eine Verteilung von Poren mit einem Durchmesser 10 bis 80 mm vorgesehen. Die resultierenden Betonstreben wiesen eine konstante Höhe von 18 mm und eine Breite von minimal 8 mm auf.

Beide Schalensegmente wurden mithilfe einer umschließenden Schalung hergestellt und nach Einbringen des Betons erwärmt.

3.3 Complex geometries

A further series of tests was to prove that components with thin-walled and filigree geometries can also be produced using the *frozen sand formwork method*. A detailed description of the test series was published in [13].

Within a design space of 450 mm × 450 mm × 100 mm, a thin-walled shell segment was designed whose inner structure was adapted in two ways on the basis of an assumed load:

- A. A ribbed grid was provided according to determined stress trajectories. The ribs had a height of 18 mm. At the thinnest point, the segment was 5 mm thick.
- B. A distribution of pores with a diameter of 10 to 80 mm was planned according to the degree of material utilisation. The resulting concrete struts had a constant height of 18 mm and a minimum width of 8 mm.

Both formwork segments were produced with the aid of an enclosing formwork and heated after the concrete had been placed.

The produced components (Figs. 9 and 10) show that the desired geometries could be realised with high precision. The surface of the components is of high and consistent quality. All geometric parts could be manufactured precisely.

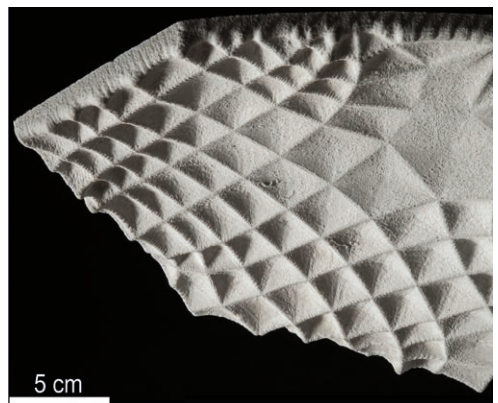
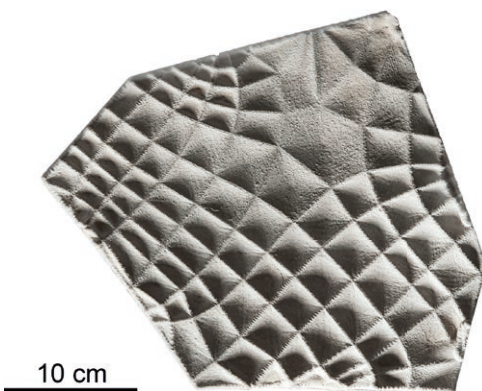


Bild 9: Hergestelltes Schalensegment mit Rippenraster (Typ A), Untersicht und Nahaufnahme | **Fig. 9:** Produced ribbed shell segment (Type A), bottom view and close up

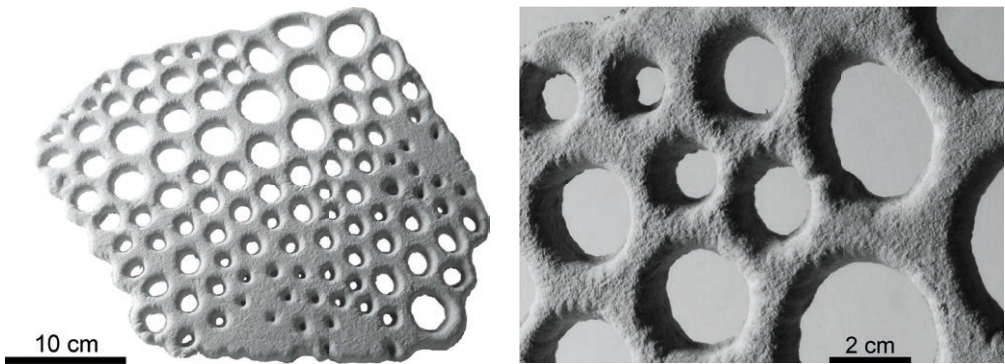


Bild 10: Hergestelltes Schalensegment mit grader Porosität (Typ B), Gesamtansicht und Nahaufnahme der hergestellten Struktur | **Fig. 10:** Produced shell segment with graded porosity (Type B), entire view and close up of the structure of the shell segment

Die hergestellten Bauteile (Bilder 9 und 10) zeigen, dass die angestrebten Geometrien mit hoher Präzision hergestellt werden konnten. Die Oberflächen der Bauteile weisen eine hohe und gleichbleibende Qualität auf. Sämtliche Geometrieteile konnten präzise hergestellt werden. Hervorzuheben sind hier die dünnen Betonstreben sowie die Poren (Bild 10). In jeder Pore berühren sich die beiden Schalungsteile. An keiner Stelle drang Beton zwischen sie.

3.4 Alternativer Herstellungsansatz Hydroplotting

Die vorliegende Versuchsreihe wurde gemeinsam mit Forschern des ILEK aus dem DFG-SFB/Transregio 141 [14] als interdisziplinäres Seminar für Studierende der Architektur und des Bauingenieurwesens durchgeführt. Die Seminarteilnehmer sollten sich dabei dem gefrorenen Sand und dem Werkstoff Beton in experimentellen Studien annähern, um Potentiale für neue Technologien zu identifizieren. Eine Zusammenfassung der Versuchsreihe wurde in [15] veröffentlicht.

Im Seminar wurde die Schalungsmethode *Hydroplotting* entwickelt. Bei diesem Verfahren wird eine CNC-gesteuerte Nadel verwendet, um selektiv Wasser in eine Form aus trockenem Sand zu injizieren (Bild 11). Die Form wird anschließend gekühlt, so dass die Bereiche aus feuchtem Sand gefrieren. Durch Abblasen des noch trockenen Sands wird eine feingliedrige räumliche

The thin concrete struts and the pores (Fig. 10) deserve special mention here. In each pore, the two formwork parts touch each other. At no point did concrete penetrate between them.

3.4 Alternative production approach Hydroplotting

The present test series was conducted together with researchers of the ILEK from the DFG-CRC/Transregio 141 [14] as an interdisciplinary seminar for students of architecture and civil engineering. The seminar participants should approach the frozen sand and the material concrete in experimental studies in order to identify potentials for new technologies. A summary of the test series was published in [15].

In the seminar, the formwork method *Hydroplotting* was developed. This method uses a CNC-controlled needle to selectively inject water into a dry sand mould (Fig. 11). The mould is then cooled so that the areas of wet sand freeze. By blowing off the still dry sand, a fine spatial structure of frozen sand is exposed, which can be used as formwork (Fig. 12). After the concrete has hardened, the sand can simply be washed out.

4 Summary and outlook

Within the framework of the project *Automated adaptive formwork method for the production*

Struktur aus gefrorenem Sand freigelegt, die als Schalung verwendet werden kann (Bild 12). Der Sand lässt sich nach dem Aushärten des Betons einfach auswaschen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes *Automatisierte adaptive Schalungsmethode zur Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten Oberflächen* sollte eine Methode entwickelt werden, die die geometrischen Möglichkeiten von Sandschalungen mit der Präzision von CNC-Methoden verbindet und so die präzise Herstellung von frei geformten Betonbauteilen ermöglicht, ohne dass dabei Abfall entsteht.

Die präsentierten Versuchsreihen und die daraus gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass diese Aufgabe erfüllt wurde: Es wurden Methoden entwickelt und erprobt, die die Herstellung einer bauteilumfassenden Schalung ermöglichen. Es wurde ein Prozess entwickelt, der trotz der Verwendung eines gefrorenen Schalungsmaterials die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs Beton in keiner Weise negativ beeinflusst. Weiter konnte die Leistungsfähigkeit der Methode anhand zweier filigraner Schalensegmente nachgewiesen werden. Bei keinem der durchgeführten Versuche wurde dabei Schalungsmaterial verbraucht.

Die Forschungen im Themenfeld wurden in zwei Vorhaben fortgesetzt. In dem vom BMBF geförderten Vorhaben „*C³-Sandwich – Hochgedämmte Sandwichfassaden*“ im Basisvorhaben C3-B4 „*Multifunktionale Bauteile*“ [16] des C³-Konsortiums wurde die Methode der *gefrorenen Sandschalung* um die Möglichkeit der Einbettung zusätzlicher Elemente wie Verbindungsmittel und Bewehrung erweitert. Dies wurde anhand dünnwandiger Carbonbeton-Sandwiches erprobt und in [17], [18] veröffentlicht, siehe auch S. 762 ff. in diesem Berichtsbuch. Zusätzlich dazu hatten die Arbeiten und Ergebnisse des vorliegenden Projekts großen Einfluss auf die Arbeiten des ILEK in dem Projekt *Fabrication of biomimetic and biologically inspired (modular*



Bild 11: CNC-gesteuerte Nadel während der Injektion von Wasser in trockenen Sand | **Fig. 11:** CNC-controlled needle injecting water into dry sand

of concrete components with curved surfaces, a method was developed which combines the geometric possibilities of sand formwork with the precision of CNC methods and thus enables the precise production of freely formed concrete components without producing waste.

The series of tests presented and the results obtained show that this task has been fulfilled: Methods have been developed and tested that enable the production of a formwork system that encompasses all components. A process was developed which, despite the use of a frozen formwork material, has no negative influence whatsoever on the mechanical properties of the concrete material. Furthermore, the efficiency of the method could be proven by means of two filigree shell segments. None of the tests carried out consumed any formwork material.

The research in this field was continued in two projects. In the BMBF-funded project, „*C³-Sandwich – Highly Insulated Sandwich Facades*“ in the basic project C3-B4 „*Multifunctional Compo-*

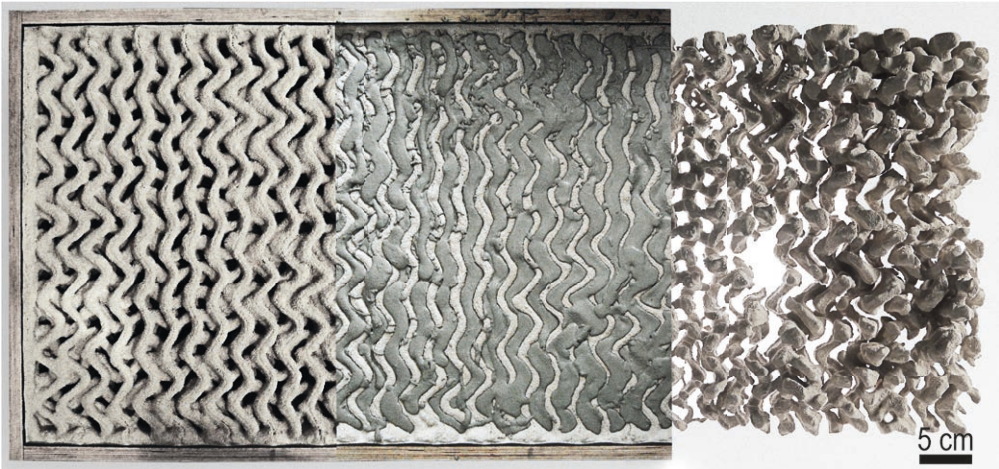


Bild 12: Produktionsschritte einer Hydroplotting-Schalung; von links nach rechts: gefrorene Sandschalung, mit Beton gefüllte Schalung und ausgeschaltes Betonbauteil | **Fig. 12:** Production of a hydroplotting formwork; from left to right: frozen sand formwork, formwork filled with concrete, and demoulded concrete part

structures for use in the construction industry [19] im Rahmen des DFG-SFB/Transregio 141, s. S. 758 ff. Im Hinblick auf die Produktion von Bauteilen mit einem durch gradierte Porosität optimierten Bauteilinnenraum wurde die Methode im Rahmen des SFB/TRR 141 weiter untersucht.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die großzügige Förderung des Projekts im Rahmen des SPP 1542 (Projekt Nr. 198455682) und bei der Firma Sika Deutschland GmbH, die das Projekt durch ihr Fachwissen und umfangreiche Materialproben unterstützt hat.

nents" [16] of the C³ consortium, the method of frozen sand formwork was extended by the possibility of embedding additional elements such as fasteners and reinforcement. This was tested with thin-walled carbon concrete sandwiches and published in [17], [18], see also p. 762 seq. In addition, the work and results of the present project had a major influence on the work of the ILEK in the project "*Fabrication of biomimetic and biologically inspired (modular) structures for use in the construction industry*" [19] within the framework of the DFG-funded CRC/Transregio 141, see p. 758 et seq. With regard to the production of structural elements with an interior optimised by graded porosity, the method was further investigated within the framework of the CRC/TRR 141.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for the generous support of the project within the framework of the SPP 1542 (project number 198455682) and the company Sika Deutschland GmbH, which supported the project with its expertise and extensive material samples.

Literatur | References

- [1] Sobek, W.: Bauschaffen – auch im Sinn der Nachhaltigkeit. ARCH+ 184 (2007), S. 88/89
 - [2] Heinle, E.; Schlaich, J.: Kuppeln aller Zeiten, aller Kulturen. Stuttgart: DVA, 1996
 - [3] Isler, H.: New Shapes for Shells. Bulletin of the Int. Association for Shell Structures 8 (1961), S. 123–130
 - [4] Sasaki, M.: Structural Design of free-curved RC shells – An overview of built works. In: Adriaenssens, S.; Block, P.; Veenendaal, D.; Williams, C. (Hrsg.): Shell Structures for Architecture, London und New York: Routledge, 2014, S. 258–270
 - [5] Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Schalungsmethode zur nachhaltigen Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten und un stetigen Oberflächen. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 218–223 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171521>
 - [6] Sika Deutschland GmbH: Datenblatt SikaGrout(R)-551/553/558 (2013). https://deu.sika.com/content/germany/main/de/solutions_products/Produkte_a_z/03/03a084.html
 - [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): DAfStb-Richtlinie Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel. Berlin: Beuth, 2011
 - [8] Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Herstellung von Freiform-Betonbauteilen mittels einer gefrorenen Schalung aus Wasser und Sand. In: Garrecht, H.; Hofmann, J.; Sobek, W.; Novák, B. (Hrsg.): Beiträge zur 3. DAfStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskoll., 11./12.11.2015 in Stuttgart, Stuttgart: Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2015, S. 23–30
 - [9] ASTM C215: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. 2014
 - [10] BS 8110-2:1985: Structural use of concrete. Code of Practice for Special Circumstances. London: British Standard Institute (BSI), 1985
 - [11] Lee, B. J.; Kee, S.-H.; Oh, T.; Kim, Y.-Y.: Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. Advances in Materials Science and Engineering (2017), Article ID 1651753, 13 S. – <https://doi.org/10.1155/2017/1651753>
 - [12] DIN EN 12390:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Dt. Fassung EN 12390-3:2009; zgl. DIN EN 12390-3 Berichtigung 1:2011-11 sowie DIN EN 12390-13:2014-06: Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN 12390-13:2013.
 - [13] Gericke, O.; Kovaleva, D.; Haase, W.; Sobek, W.: Fabrication of Concrete Parts using a Frozen Sand Formwork. In: Kawaguchi, K.; Ohsaki, M.; Takeuchi, T. (Hrsg.): Proc. of the IASS Annual Symp. 2016, 26.–30.09.2016 in Tokio (Japan), Madrid: IASS, 2016, Beitrag Nr. 1292, publ. auf USB-Stick, 10 S.
 - [14] Homepage des SFB/TRR 141: <https://www.trr141.de/>
 - [15] Müller, H.; Nething, C.; Schalk, A.; Kovaleva, D.; Gericke, O.; Sobek, W.: Porous Spatial Concrete Structures Generated Using Frozen Sand Formwork. In: Viana, V. (Hrsg.): Proc. of Int. Conf. Geometrias: Thinking, Drawing, Modelling – Geometrias'17 – Livro de Resumos (erschienen in: Springer Proceedings in Mathematics & Statistics book series (PROMS), Vol. 326), 16.–18.06.2017 in Porto (Portugal), Coimbra: Departamento de Arquitectura da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2017, S. 121–129
 - [16] Homepage des Projekts C³, Basisvorhaben C3-B4 „Multifunktionale Bauteile“: <https://www.bauen-neu-denken.de/vorhaben/b4-multifunktionale-bauteile/>
 - [17] Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Production of Curved Concrete Sandwich Panels Using a Frozen Sand Formwork. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9660, Book of Abstracts: S. 180, Langfassung auf USB-Stick, 9 S.
 - [18] C³-Sandwich – Hochgedämmte Sandwichfassaden. In: Hülsmeier, F. (Hrsg.): C³-Basisvorhaben B4 – Multifunktionale Bauteile aus Carbonbeton. Leipzig: Architektur-Institut Leipzig, 2016, S. 12–15
 - [19] Homepage des Projekts B04 im SFB/TRR 141: <https://www.trr141.de/index.php/research-areas-2/b04/>
- Alle Internetseiten wurden am 18.06.2019 geprüft. | All internet pages were checked on 18.06.2019.

Bildnachweise | Picture credits

- Bild | Picture 1: gta Archiv / ETH Zürich, Heinz Isler; [3]
- Bild | Picture 2: Mit freundlicher Genehmigung der Kajima Corporation, Osaka (Japan) | Courtesy of Kajima Corporation, Osaka (Japan)
- Bilder | Pictures 3, 6, 8: Oliver Gericke
- Bild | Picture 7: Gabriela Metzger
- Bilder | Pictures 3–5, 9–14: Daria Kovaleva

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Automatisierte adaptive Schalungsmethode zur Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten Oberflächen

Automated adaptive formwork for the production of concrete elements with curved surfaces

Antragsteller Applicant :	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek Institutsleiter Institute's director
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SO 365/11-1 (Projektnummer Project number: 198455682)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Pfaffenwaldring 7+14, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685-6 6226/-6 3599 werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de http://www.uni-stuttgart.de/ilek/
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	10/2011–09/2014 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 09/2016
Team Team:	Oliver Gericke (10/2013–09/2016) Walter Haase Dennis Kasper (10/2011–09/2013) Daria Kovaleva (10/2014–09/2016)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Schalungsmethode zur nachhaltigen Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten und unetstetigen Oberflächen. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 218–223 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171521>
- Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Herstellung von Freiform-Betonbauteilen mittels einer gefrorenen Schalung aus Wasser und Sand. In: Garrecht, H.; Hofmann, J.; Sobek, W.; Novák, B. (Hrsg.): Beiträge zur 3. DAfStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskoll., 11./12.11.2015 in Stuttgart, Stuttgart: Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2015, S. 23–30
- Gericke, O.; Kovaleva, D.; Haase, W.; Sobek, W.: Fabrication of Concrete Parts using a Frozen Sand Formwork. In: Kawaguchi, K.; Ohsaki, M.; Takeuchi, T. (Hrsg.): Proc. of the IASS Annual Symp. 2016, 26.–30.09.2016 in Tokyo (Japan), 2016, Langfassung auf USB-Stick: Beitrag Nr. 1292, 10 S.
- Müller, H.; Nething, C.; Schalk, A.; Kovaleva, D.; Gericke, O.; Sobek, W.: Porous Spatial Concrete Structures Generated Using Frozen Sand Formwork. In: Viana, V. (Hrsg.): Proc. of Int. Conf. Geometrias: Thinking, Drawing, Modelling – Geometrias'17 – Livro de Resumos (erschienen in: Springer Proceedings in Mathematics & Statistics book series (PROMS), Vol. 326), 16.–18.06.2017 in Porto (Portugal), Coimbra: Departamento de Arquitectura da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2017, S. 121–129

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Teile der Forschungsarbeiten werden in die Dissertation von Daria Kovaleva mit dem Arbeitstitel "Zero-waste formwork for weight-optimized functionally graded concrete structures" eingehen. | Parts of the research work will go into the dissertation of Daria Kovaleva with the working title „Zero-waste formwork for weight-optimized functionally graded concrete structures“.

Studienarbeiten | Student's research projects

- Schalk, A.; Müller, H.; Nething, C.: Untersuchung des Gestaltungspotenzials der gefrorenen Sandschalung hinsichtlich der Herstellung von räumlich komplexen Betonstrukturen. Seminar 'Methamorphosis', Wintersemester 2015/16
- Wohlrab, A.: Untersuchung des Einflusses einer gefrorenen Schalhaut auf die mechanischen Eigenschaften von selbstverdichtenden Beton. Masterarbeit, 2016
- Cong, Z.; Garcia Merina, J. S.; Jimenez, B.; Koenig, C.-Z.; Müller, H.; Nething, C.; Olivares, C.; Rihaczek, G.; Rosenfeld, S.; Smirnova, M.: Untersuchung der gestalterischen Möglichkeiten von mittels gefrorener Sandschalung hergestellter Bauteile aus funktional gradiertem Beton. Design Studio 'Concrete Tectonics I', Wintersemester 2016/17
- Cong, Z.; Nething, C.; Rihaczek, G.; Smirnova, M.: Entwicklung und Bewertung eines zirkulären Produktionsprozesses für abfallfreie und wasserlösliche Sandschalungen. Entwurfsarbeit 'Concrete Tectonics II', Sommersemester 2017

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Teilprojekt C³-Sandwich – Hochgedämmte Sandwichfassade, Entwicklung dünnchaliger hochgedämmter Fassadenelemente – Schalungstechnologie und Befestigungstechnik im Rahmen des Basisvorhabens C3-B4: Multifunktionale Bauteile | Subproject C³-Sandwich – Highly insulated sandwich facade, development of thin-walled highly insulated facade elements – formwork technology and joining technology in the frame of the basic project C3-B4: Multifunctional components

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Förderer Funding:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) / Zwanzig20-Projekt Carbon Concrete Composite – C ³
Laufzeit Period:	07/2015–12/2019

- Teilprojekt B04: Herstellung von biomimetischen und biologisch inspirierten (modularen) Strukturen zur Verwendung in der Bauindustrie im Rahmen des SFB/Transregio 141: Entwurfs- und Konstruktionsprinzipien in Biologie und Architektur. Analyse, Simulation und Umsetzung | Subproject B04: Fabrication of biomimetic and biologically inspired (modular) structures for use in the construction industry in the frame of the CRC/Transregio 141: Biological design and integrative structures – analysis, simulation and implementation in Architecture

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 141
Laufzeit Period:	10/2014–06/2019

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation SPP-1542-Arbeitsgruppentreffen in Stuttgart, 2014, zur Präsentation der Arbeitsstände und zur fachlichen Abstimmung von Projekten mit experimentellem Schwerpunkt | Organization of SPP 1542 working group meeting in Stuttgart, 2014, for presentation and technical coordination of projects with experimental focus
- ILEKnlCE: Workshop, 2015, 10 Studierende (Architektur): In diesem einwöchigen Workshop untersuchten Studierende der Northwestern University (Evanston und Chicago, USA) die gestalterischen Möglichkeiten mit gefrorenem Sand. In mehreren Schritten wurden Betonobjekte in von Hand oder mittels CNC-Fräse hergestellten, gefrorenen Sandschalungen produziert. | Workshop, 2015, 10 students (architecture): In this one-week workshop, visiting students from the Northwestern University (Evanston and Chicago, USA) explored the design possibilities of frozen sand. In several steps, concrete objects were produced in frozen sand formwork produced by hand or by CNC milling.
- Shaping the Void: Workshop, 2017, 10 Studierende (Architektur): In diesem einwöchigen Workshop untersuchten Gaststudenten der Northwestern University (Evanston und Chicago, USA) die Gestaltungsmöglichkeiten des neu entwickelten Hydroplotting mit dem Schwerpunkt Design und Herstellung von räumlichen Betonstrukturen. | Workshop, 2017, 10 students (architecture): In this one-week workshop, visiting students from the Northwestern University (Evanston and Chicago, USA) explored the design potentials for newly developed Hydroplotting with the focus on design and fabrication of spatial concrete structures

