

Entwurf und Herstellung von dünnwandigen Faltwerken aus zementbasierten Verbundwerkstoffen | Design and construction of folded plate structures made of novel cementitious composites

- ▶ Jan Dirk van der Woerd, Josef Hegger, Rostislav Chudoba
- ▶ Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

1 Motivation und Zielsetzung

Der in den Ingenieurwissenschaften zunehmend populäre Einsatz der Origami-Technik eröffnet neue Möglichkeiten zur Herstellung von effizienten Tragkonstruktionen [1]–[5]. In Verbindung mit leistungsfähigen, zementbasierten Verbundwerkstoffen bietet die Origami-Technik einen innovativen Ansatz für Entwurf und Realisierung von leichten tragenden Strukturen nach dem Prinzip *form follows force* – dem Grundgedanken des SPP 1542.

Aktuelle Entwicklungen, wie Textilbeton, ermöglichen die Ausführung von extrem dünnwandigen und schlanken Betonstrukturen [6], [7]. Außerdem besitzen die als Bewehrung verwendeten Materialien – i. d. R. alkaliresistentes (AR) Glas oder Carbon – neben hohen charakteristischen Festigkeiten die Eigenschaft, leicht biegsam zu sein. Diese Flexibilität erlaubt die Übertragung des Prinzips des Faltens auf dünne Betonplatten.

Um aus Beton ein faltbares Medium ähnlich Papier zu machen, wurden zwei Verfahren entwickelt:

- Einführen von Faltlinien mit Hilfe von Aussparungselementen,
- Falten des Betons im noch frischen Zustand.

1 Motivation and objectives

The increasingly popular use of origami technology in the engineering sciences opens up new possibilities for the manufacture of efficient load-bearing structures [1]–[5]. In combination with high-performance, cement-based composite materials, origami technology offers an innovative approach to the design and realisation of lightweight load-bearing structures based on the principle *form follows force* – the basic idea of SPP 1542.

Current developments, such as textile reinforced concrete, enable the execution of extremely thin-walled and slender concrete structures [6], [7]. In addition, the materials used as reinforcement – usually alkali-resistant (AR) glass or carbon – have the property of being easily bendable in addition to their high characteristic tensile strengths. This flexibility allows the principle of folding to be transferred to thin concrete plates.

Two processes were developed to turn concrete into a foldable medium similar to paper:

- introduction of crease lines with spacer elements and
- folding of concrete in the fresh state.

Das erste Verfahren wurde mit *fold-and-grout* [8] benannt und ist in Bild 1 dargestellt. Vor der Betonage werden an der Position der zukünftigen Faltkante ober- und unterhalb des Textils linienförmige Aussparungselemente angeordnet. Nach dem Erhärten des Betons und dem Entfernen der Aussparungselemente kann die Platte hier gefaltet werden. Zwischen den starren Betonfacetten wird durch die durchlaufende zentrische Bewehrung ein definiertes Gelenk erzeugt. Nach Erreichen des gewünschten Faltwinkels wird die Faltkante mit Mörtel verfügt und ist in ihrer Lage fixiert.

The first method was named *fold-and-grout* [8] and is shown in Figure 1. Before concreting, linear spacer elements are placed at the position of the future crease lines above and below the textile fabric. After hardening of the concrete the spacer elements were removed and the plate can be folded. A defined joint is created between the rigid concrete facets by the continuous centric reinforcement. After reaching the desired folding angle, the crease is grouted with mortar and fixed in its position.



Bild 1: *Fold-and-grout:* Falten von Beton mit definierter Faltkante und nachträglichem Vermörteln [1] | **Fig. 1:** *Fold-and-grout:* folding of a concrete plate with a pre-defined crease and subsequent grouting

Beim zweiten Verfahren, das als *fold-in-fresh* [8] bezeichnet wird, wird der Beton noch im frischen Zustand gefaltet. Das Vorgehen ist in Bild 2 zu sehen. Ein Liniengelenk ist in die Schalung eingebaut, womit der Faltmechanismus von der Betonplatte in die Schalung verschoben wurde. Im noch frischen Zustand wird die textilbewehrte Platte durch das Falten der Schalung aus der Ebene in die räumliche Form gebracht. Die Bewehrung hält dabei den Beton in seiner Position und verhindert das Abfließen von den geneigten Flächen. Nach dem Erhärten wird die Schalung entfernt und ist das Element fertig.

In the second method, named as *fold-in-fresh* [8], the concrete is folded while still fresh in unhardened state. The procedure can be seen in Fig. 2. A line joint is built into the formwork, and so the folding mechanism is shifted from the concrete plate into the formwork. While still fresh, the textile-reinforced plate is brought from the plane into the spatial configuration by folding the formwork. The reinforcement keeps the concrete in position and prevents it from flowing off the inclined surfaces. After hardening, the formwork is removed and the element is completed.

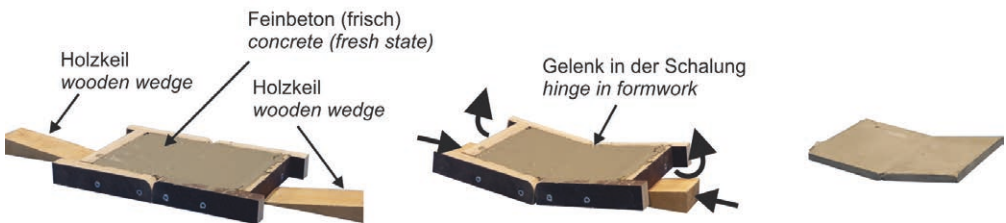


Bild 2: *Fold-in-fresh:* Falten von Beton im frischen Zustand | **Fig. 2:** *Fold-in-fresh:* folding of concrete in fresh state

Die beiden Ansätze bildeten die Grundlage für den Entwurf und Bau von dünnwandigen faltstrukturen. Sind diese Strukturen so gestaltet, dass gleichzeitig die Scheiben- und Platten-tragwirkung aktiviert wird, spricht man von faltwerken, die sich durch ein sehr günstiges tragverhalten kennzeichnen. Da der Begriff des faltens sich hier nicht nur auf die endgültige Form bezieht, sondern auch auf die herstellung, können diese strukturen im wahrsten sinne des wortes als faltwerke bezeichnet werden. Dies unterscheidet den hier im projekt verfolgten ansatz fundamental von anderen neueren ansätzen zur herstellung von faltwerken, bei welchen diese aus einzelnen flächigen elementen gefügt werden [5], [9]–[11], oder auch von klassischen stahlbetonfaltwerken, die auf festen schalungen, die eine gefaltete geometrie ergeben, gleich in ihrer endform gefertigt werden [12].

Grundlagen für den entwurf einer faltstruktur sind faltmuster, die sich aus einer vielzahl von faltkanten zusammensetzen. Durch die wahl des faltmusters und der faltwinkel bei der anschließenden faltung lässt sich ein breites spektrum an formen erzeugen. Eine reiche quelle für faltmuster bietet das origami. Durch die zusammenführung des durch origami aufgespannten entwurfsraums und des faltbaren betons entsteht ein neuer ansatz für die herstellung von leichten tragwerken. Das ziel war die erweiterung der formenvielfalt von leichten massivbaukonstruktionen unter vermeidung aufwendiger schalungen. Betonelemente werden in einer ebenen schalung erstellt und durch das falten in eine räumliche struktur überführt. In anlehnung an den japanischen begriff *Origami* wurde der im projekt konzipierten entwurfs- und herstellmethodik zum falten von beton – englisch: *concrete* – der name *Oricrete* gegeben [13]. Die entwicklung der methoden geschah sukzessive und ging einher mit dem bau von verschiedenen klein- und großformatigen prototypen.

These two approaches formed the basis for the design and construction of thin-walled folded structures. If these structures are designed in such a way that the slab and plate load-bearing effect is activated at the same time, one speaks of folded plate structures. They are characterised by a very favourable supporting behaviour. Since the term folding refers here not only to the final form, but also to the manufacturing process, these structures can also literally be called folded plate structures. This fundamentally distinguishes the approach pursued here in the project from other more recent approaches to the production of folded plate structures, in which these are assembled from individual flat elements [5], [9]–[11], or also from classical folded plate structures made of reinforced concrete structures. Classical folded plate structures are produced in their final form with folded formwork [12].

The design of a folded structure is based on crease patterns consisting of a large number of crease lines. A wide range of shapes can be created by selection of the crease pattern and the folding angles during the subsequent folding process. A rich source for crease pattern is origami. The combination of the design space determined by origami and the foldable concrete creates a new approach to the fabrication of lightweight structures. The aim was to expand the variety of shapes of lightweight structures while avoiding elaborate formwork. Concrete elements are created in a flat formwork and transferred into a spatial structure by folding. Based on the Japanese term *Origami*, the design and manufacturing methodology for folding concrete, which was conceived in the project, was given the name '*oricrete*' [13]. The development of the methods took place successively and was accompanied by the construction of various small and large scale prototypes.

2 Entwurfs- und Herstellmethodik: Oricrete

2.1 Faltmuster für die Erstellung von Faltwerken

Beim Falten von Strukturen oder Figuren aus einem Blatt Papier stellt man oft fest, dass es immer wieder Schritte gibt, bei der sich die Papierflächen in ihrer Ebene verformen oder gebogen werden müssen. Solche Schritte lassen sich mit steifen Materialien, die keine Verformung in der Ebene zulassen, nicht umsetzen. Es gibt allerdings auch Faltmuster, die sich problemlos mit starren Materialien falten lassen. Diese Faltmuster besitzen eine Eigenschaft, die als *rigid foldability* bezeichnet wird. Diese Muster sind besonders für technische Anwendungen interessant [1], [14]. Eine Übersicht von *rigid foldable* bzw. starr faltbaren Faltmustern findet sich in [15]. Beim Falten dieser Muster treten lediglich Rotationen entlang der Faltkanten auf und die Facetten bleiben eben. Für den Einsatz im Projekt wurden hauptsächlich das Yoshimura-Faltmuster (links im Bild 3) [16] sowie das Waterbomb-Faltmuster (Bild 3, rechts) [17] verwendet, die diese Eigenschaft haben.

2 Design and manufacturing methodology: Oricrete

2.1 Crease patterns for the production of folded plate structures

When folding structures or figures from a sheet of paper, one often notices that there are always steps in which the paper surfaces have to be deformed or bent in their plane. Such steps cannot be realized with stiff materials that do not allow any deformation in the plane. However, there are also crease patterns that can easily be folded with rigid materials. These folding patterns have a property known as rigid foldability. These patterns are particularly interesting for technical applications [1], [14]. An overview of rigid foldable crease patterns can be found in [15]. When folding these patterns, only rotations along the creases occur and the facets remain flat. The Yoshimura crease pattern (left in Fig. 3) [16] and the waterbomb crease pattern (Fig. 3, right) [17], which have this property, were mainly used in the project.

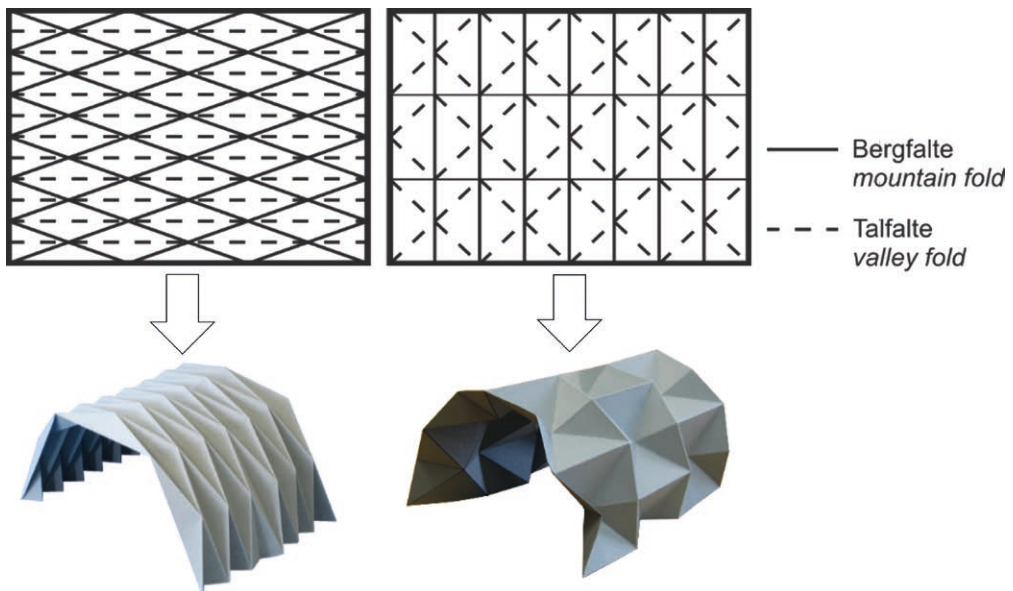


Bild 3: Starr faltbare Faltmuster: Yoshimura-Faltmuster (links) und Waterbomb-Faltmuster (rechts) | **Fig. 3:** Rigid foldable crease pattern: Yoshimura crease pattern (left) and waterbomb crease pattern (right)

2.2 Simulations- und Modellierungsrahmen Oricreate

Aufgrund der vielen Freiheitsgrade der Faltmuster sind die Gestaltungsmöglichkeiten für die endgültige Form einer Tragstruktur sehr vielfältig. Der Zusammenhang zwischen dem Faltmuster und der entstehenden Form ist nur für einfache Fälle offensichtlich. Zur gezielten Analyse und Steuerung des Formfindungsprozesses und des damit verbundenen Faltvorgangs ist die Unterstützung durch eine numerische Modellierung unabdingbar. Ebenso sind für eine effiziente Herstellung Hebe- und Faltmaschinen zu entwerfen, welche eine exakte Steuerung des Faltvorgangs ermöglichen.

Für den Entwurf und die Realisierung der Demonstratoren wurde am Institut eine Simulationsplattform entwickelt, die mit der Programmiersprache PYTHON implementiert wurde. Ihr Name *Oricreate* soll unterstreichen, dass das Modell materialunabhängig ist und allgemein für die Herstellung von Faltenwerken durch Faltung eingesetzt werden kann.

Das Modell ist als Optimierungsproblem formuliert und es lassen sich eine Vielzahl von Anwendungsaufgaben umsetzen. Die Hauptanwendungen sind:

- Formfindung,
- Modellierung der Formgebung mittels Faltparaten,
- Simulation des Trag- und Verformungsverhaltens der Falstrukturen.

Durch die Wahl einer Zielfunktion und die Kombination mit entsprechenden Nebenbedingungen wird das Modell für die jeweilige Aufgabe angepasst.

Nähere Details zur mathematischen Formulierung und Implementierung des numerischen Modells enthält [18]. Der Quelltext des Oricreate-Toolkits ist öffentlich zugänglich auf der Open-Source-Management-Plattform www.github.com [19]. Eine Online-Dokumentation mit Beispielen der Simulationsergebnisse und Animationen der simulierten Faltprozesse ist unter www.oricrete.com [20] verfügbar.

2.2 Simulation and modelling framework oricreate

Due to the many degrees of freedom of the crease pattern, the design space for the final shape of a load-bearing structure are very large. The connection between the crease pattern and the resulting shape is only obvious in simple cases. For the targeted analysis and control of the form-finding process and the associated folding process, support by numerical modelling is indispensable. Lifting and folding machines, which enable precise control of the folding process, must also be designed for efficient production.

For the design and realization of the prototypes, a simulation platform was developed at our institute, which was implemented with the programming language PYTHON. Its name '*oricreate*' should underline that the model is material independent and can generally be used for the production of folded plate structures by folding.

The model is formulated as an optimization problem and a multitude of application tasks can be realized. The main applications are:

- form finding,
- modelling of the folding process with folding devices,
- simulation of the load-bearing behaviour of folded structures.

By selecting a goal function and combining it with corresponding constraints, the model is adapted to the respective task.

Further details on the mathematical formulation and implementation of the numerical model can be found in [18]. The source code of the oricreate-toolkit is publicly available on the open source management platform www.github.com [19]. An online documentation with examples of the simulation results and animations of the simulated folding processes is available at www.oricrete.com [20].

2.3 Gestaltungsmöglichkeiten der Form und des Tragverhaltens von Faltwerken

Durch Studien mit dem Yoshimura-Faltmuster wurden drei Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung und Gestaltung der Form identifiziert [13]:

- Verteilung der Faltwinkel in der Endkonfiguration,
- Anpassung des Faltmusters unter Einhaltung bestimmter winkel- und längenbasierter Bedingungen,
- Modularisierung der globalen Geometrie und Montage des Gesamttragwerks aus separat gefertigten Einzelsegmenten.

Trotz der Bedingung der *rigid foldability* bleibt der Gestaltungsraum der erzielbaren Formen sehr groß. Neben der globalen Form, die auch das globale Tragverhalten bestimmt, können durch die Anordnung und Ausbildung der Faltkanten die Steifigkeitsverhältnisse innerhalb der Struktur und somit das lokale Tragverhalten gezielt beeinflusst werden. Auf das Tragverhalten des Querschnittes haben unter anderem die folgenden Parameter Einfluss, s. a. Bilder 4 und 5:

- die Faltfrequenz,
- die Faltungshöhe,
- Ausrichtung der Faltkante zur Tragrichtung.

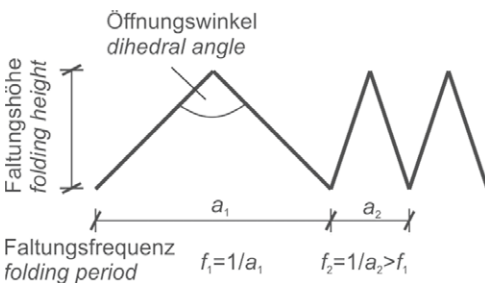


Bild 4: Merkmale von Faltungen, die das Tragverhalten des Querschnittes beeinflussen | **Fig. 4:** Characteristics of folds, influencing the load bearing behaviour of the cross-section

Die Faltfrequenz und die Faltungshöhe beeinflussen direkt das Widerstandsmoment und somit die Biegetragfähigkeit des Querschnittes.

2.3 Design options for the shape and for the load-bearing behaviour of folded plate structures

Through studies with the Yoshimura crease pattern, three measures for targeted influencing and shaping of the form were identified [13]:

- distribution of dihedral angles in the final configuration,
- adaption of the crease pattern under consideration of certain angle- and length-based constraints,
- modularization of the global geometry and assembly of the entire load-bearing structure from separately manufactured segments.

Despite the condition of rigid foldability, the design space of the achievable forms remains very large. In addition to the global shape, which also determines the global load-bearing behaviour, the arrangement and formation of the folded edges can influence the stiffness ratios within the structure and thus the local load-bearing behaviour. The following parameters, among others, have an influence on the load-bearing behaviour of the cross-section, see Figures 4 and 5:

- the folding period,
- the folding height,
- alignment of the folded edges to the supporting direction.

The folding frequency and the folding height directly influence the moment of resistance and thus the bending load capacity of the cross-section. The orientation of the folded edge to the main load direction has a special influence, as could be observed with experimental investigations on small scale folded vaults (Fig. 5). It was found that in configurations with diagonal folded edges with an angle smaller than 45° to the vertical (main load-bearing direction), the first cracking occurred in the facets (Fig. 5, left). At angles greater than 45°, the folded edges first cracked continuously (Fig. 5, right).

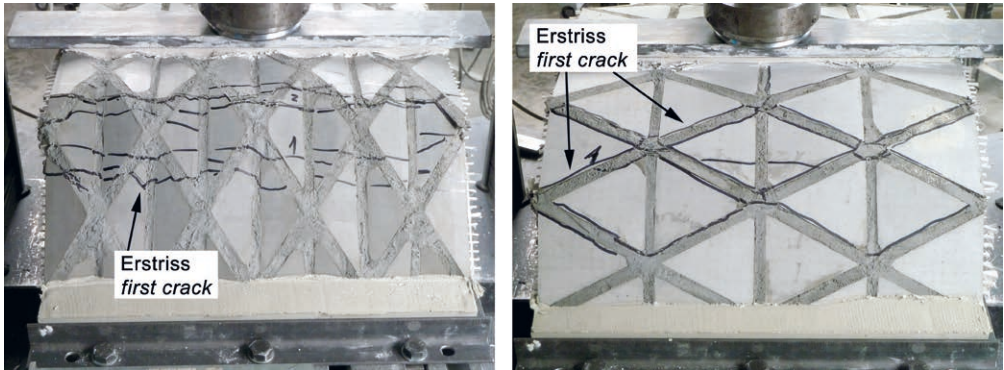


Bild 5: Ort des Erstrisses und Rissbild bei experimentellen Untersuchungen an kleinformatigen Bögen: Erstrissbildung in den Facetten bei diagonalen Faltkanten mit einem Winkel kleiner 45° zwischen Diagonale und vertikaler Faltkante (links); Erstrissbildung in Faltkanten mit Winkeln größer als 45° (rechts) | **Fig. 5:** Location of the first crack in experimental investigations of small scale vaults: first crack within the facets at an angle smaller than 45° between vertical and diagonal crease (left) and first crack within creases with an angle bigger than 45° between vertical and diagonal crease (right)

Einen besonderen Einfluss hat die Ausrichtung der Faltkante zur Haupttragrichtung, wie mit experimentellen Untersuchungen an kleinformatigen gefalteten Bögen beobachtet werden konnte (Bild 5). Es wurde festgestellt, dass bei steilen diagonalen Faltkanten mit einem Winkel kleiner 45° zur Vertikalen (Haupttragrichtung), die Erstrissbildung in den Facetten auftrat (Bild 5, links). Bei Winkeln größer 45° rissen durchgehend zuerst die Faltkanten (Bild 5, rechts).

2.4 Formfindung für Falwerke

Ein einfacher und schneller Ansatz, um neue Muster und Formen zu finden, ist das Probieren von Hand mit Papier. Für komplexere Formen und Geometrien werden die Zusammenhänge aber schnell unübersichtlich und ein experimenteller Ansatz mit Papier ist nicht mehr zielführend. Für den Entwurf von faltstrukturen auf Basis des Yoshimura-Faltmusters wurden drei Ansätze konzipiert:

- Beschreibung der geometrischen Beziehung zwischen Faltmuster und Form,
- Formfindung mit einer Faltsimulation unter Variation der kinematischen Randbedingungen,
- Formfindung mit Hilfe von Optimierungsansätzen.

2.4 Form finding for folded plate structures

A simple and quick approach to find new patterns and shapes is to try them out by hand with paper. For more complex shapes and geometries, however, the connections quickly become unclear and an experimental approach with paper is no longer effective. Three approaches were developed for the design of folded structures based on the Yoshimura folding pattern:

- description of the geometric relationship between crease pattern and shape,
- form finding with a folding simulation under variation of the kinematic boundary conditions,
- form finding with the help of optimization approaches.

The first approach can only be used for simple and regular structures such as barrel vaults. The other two approaches could be implemented with the oricrete platform.

2.5 Fold-and-grout method

2.5.1 Production of an oricrete plate

The production of a folding-prefab plate or oricrete plate for the fold-and-grout method is shown in Fig. 6 using the example of the *bike*

Der erste Ansatz lässt sich lediglich für einfache und regelmäßige Strukturen wie z. B. Tonnenschalen einsetzen. Die beiden anderen Ansätze konnten mit der Oricrete-Plattform umgesetzt werden.

2.5 Fold-and-grout-Verfahren

2.5.1 Herstellung der Falthalbzeuge

Die Herstellung eines Falthalbzeuges für das Fold-and-grout-Verfahren ist in Bild 6 am Beispiel des Demonstrators *bike shell-ter* [21] dargestellt. Zunächst wurde auf einer Schalplatte die untere Hälfte des Faltmusters mit Aussparungsleisten, die aus mit Klebeband umwickel-

shell-ter [21]. First, the lower half of the crease pattern was made on a formwork panel with spacer elements, which consist of wooden strips wrapped into tape (a). Next, the textile reinforcement was installed with slight tension (b), which ensures a centric position of the reinforcement during concreting. After the installation of the upper layer of the crease pattern (c), the plate was concreted. The fine concrete used [22] with a maximum grain size of 0.6 mm could easily penetrate the textile with a mesh size of 8.4 mm × 8.4 mm. After the concrete had hardened, the spacer elements of the upper layer were removed (d) and the oricrete plate was ready.

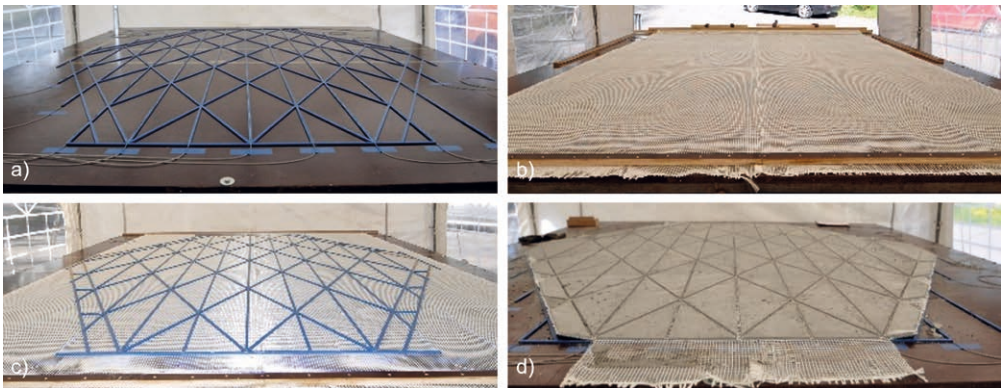


Bild 6: Herstellung eines Falthalbzeuges (hier für den Demonstrator *bike shell-ter*): a) untere Hälfte des Faltmusters, b) Einbau textile Bewehrung, c) obere Hälfte des Faltmusters vor der Betonage, d) fertiges Halbzeug | **Fig. 6:** Construction of an oricrete plate: lower half of the crease pattern a); installed textile reinforcement b); upper half of the crease pattern before concreting c); finished oricrete plate with removed spacers d)

ten Holzstreifen bestanden, hergestellt (a). Anschließend wurde die textile Bewehrung mit einer schwachen Vorspannung eingebaut (b), die eine zentrische Lage der Bewehrung während der Betonage sicherstellt. Nach dem Einbau der oberen Lage des Faltmusters (c) wurde die Platte betoniert.

Der verwendete Feinbeton [22] mit einem Größtkorn von 0,6 mm konnte das Textil mit einer Maschenweite von 8,4 mm × 8,4 mm problemlos durchdringen. Nach dem Erhärten des Betons wurden die Aussparungselemente der oberen Lage entfernt (d) und das Falthalbzeug ist fertig.

2.5.2 Lifting and folding of oricrete pre-fab plates

The oricrete plates are easy and inexpensive to produce due to the flat formwork. However, they require new working steps for lifting and folding in the further construction process. A complicating factor here is that the oricrete plates are a highly kinematic system before the fixation of the creases.

Small oricrete plates can still be lifted manually. An interesting approach to lifting was the use of suction cups in the realisation of a folding device (Fig. 7, left). With most large scale dem-

2.5.2 Heben und Falten der Falthalbzeuge

Die Falthalbzeuge sind durch die ebene Schaltung einfach und preiswert herzustellen. Sie verlangen aber im weiteren Bauablauf neuartige Arbeitsschritte für das Heben und Falten. Erschwerend hierfür ist, dass die Falthalbzeuge vor dem Fixieren der Faltkanten ein hochgradig kinematisches System sind.

Kleine Falthalbzeuge können noch manuell gehoben werden. Ein interessanter Ansatz zum Heben war die Verwendung von Saugnäpfen bei der Umsetzung eines Faltapparates (Bild 7, links). Bei den meisten großformatigen Demonstratoren wurden in ausgesuchte Faltkanten dünne Stahlseile unterhalb des Textils angeordnet. Durch die Befestigung dieser Seile an einem umlaufenden Rahmen konnte das Falthalbzeug angehoben werden.

Für die Überführung der ebenen Falthalbzeuge in die Endform wurden mehrere Konzepte entwickelt und untersucht. Als ein sehr robustes Verfahren hat sich der Einsatz einer Spantenkonstruktion erwiesen, auf der das Falthalbzeug aufgelegt und durch sein Eigengewicht in Form gebracht wird (Bild 8). Die Geometrie der Spanten wurde mit Hilfe der Oricreate-Plattform ermittelt. Neben der Formgebung übernahm die Spantenkonstruktion auch die Funktion der Fixierung der Faltstruktur für das Verfugen.

Die Faltung kann auch durch gezielte punktuelle Bewegungen, z. B. mit pneumatischen oder hydraulischen Aktuatoren durchgeführt werden.

onstrators within the project, thin steel cables were arranged in selected creases below the textile fabric. By attaching these ropes to a surrounding frame, the oricrete plate could be lifted.

Several concepts were developed and investigated for the folding process. The use of a wooden scaffolding on which the oricrete plate is placed and shaped by its dead load has proven to be a very robust method (Fig. 8). The geometry of the ribs of the scaffolding was determined using the oricrete platform. Besides the shaping, the wooden scaffolding also fulfilled the function of stabilization the folded structure for the grouting process.

Folding can also be carried out by specific punctual movements, e.g. with pneumatic or hydraulic actuators. This concept was implemented in a study with a crane adapter [23]. In order to reduce the degree of freedom of the structure, the facets were coupled with a mechanism consisting of rods and joints, whereby the folding could be carried out with a vertical movement (Fig. 7, left). Clamping profiles with a given angle are another method (Fig. 7, middle). One profile each is placed on the front and back of the crease and connected with screws through it. When the screws are tightened, the adjacent facets are brought into a folded position. A last way to fold is by hanging using the dead load (Fig. 7, right).

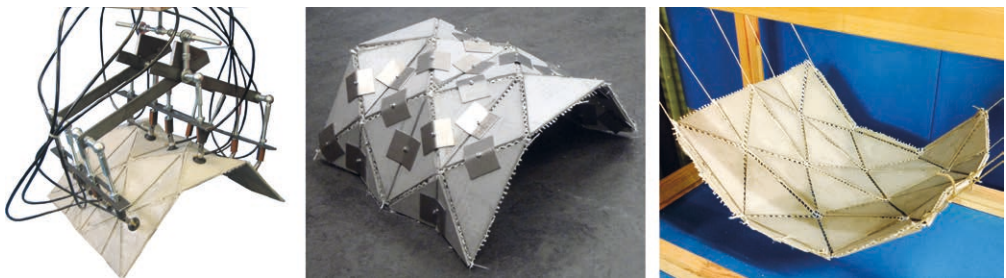


Bild 7: Verschiedene Ansätze zur Faltung von Falthalbzeugen; v. l. n. r.: kinematischer Kranadapter, Klemmbleche zur Vorgabe der Faltwinkel, Formgebung mit Eigengewicht durch Hängen | **Fig. 7:** Various approaches for folding; from left to right: folding device, clamping profiles with predefined angles, shaping with dead load by hanging

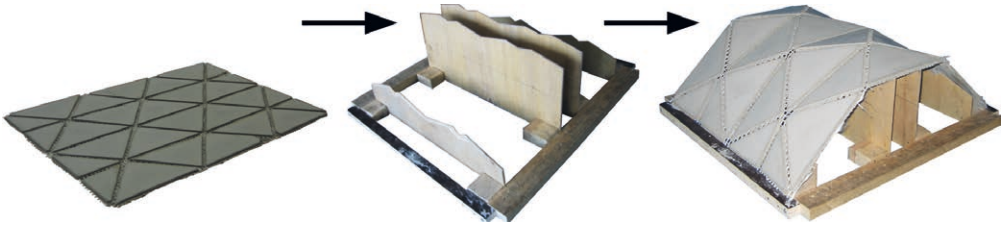


Bild 8: Falten mit Spantenkonstruktion unter Nutzung der Gravitation | Fig. 8: Folding with scaffolding and gravitation

In einer Studie mit einem Kranadapter wurde dieses Konzept umgesetzt [23]. Zur Reduktion der Freiheitsgrade der Struktur wurden die Facetten mit einem Mechanismus aus Stangen und Gelenken gekoppelt, wodurch die Faltung mit einer vertikalen Bewegung ausgeführt werden konnte (Bild 7, links). Ein weiteres Verfahren sind Klemmbleche mit einem vorgegebenen Winkel (Bild 7, Mitte). Jeweils ein Blech wird auf die Vorder- und auf die Rückseite der Falkante gesetzt und mit Schrauben durch die Falkante verbunden. Beim Anziehen der Schrauben werden die angrenzenden Facetten in eine gefaltete Position gebracht. Ein letztes Verfahren ist die Formgebung mit Hilfe des Eigengewichts durch Hängen (Bild 7, rechts).

2.5.3 Verguss der Fugen

Im gefalteten Zustand wird die Falterwerksform durch das Vergießen der Faldfugen fixiert. Erst durch das Verfugen wird die Beweglichkeit der Struktur unterbunden und die Tragwirkung als Falterwerk aktiviert. Kriterien bei der Auswahl geeigneter Mörtel waren seine Festigkeit, die Verarbeitungsdauer, die Verarbeitbarkeit, die Optik sowie die Kosten. Mit verschiedenen Mörteln wurden Herstellversuche sowie Haftzugversuche durchgeführt. Der Fugenmörtel Ardex WA auf Epoxidharzbasis erfüllte die Ansprüche am besten. Für das Einbringen des Mörtels haben sich der manuelle Einbau mit Hilfe eines Spachtels (Bild 9, oben) sowie der Einsatz einer Mörtelspritze bewährt (Bild 9, unten). Beim Verfugen war eine stabile Lagerung essentiell.

2.5.3 Grouting of creases

Through the grouting of the creases, the flexibility of the structure is eliminated and the load-bearing mechanism of a folded plate structure activated. Criteria for the selection of suitable mortars for grouting were its strength, processing time, workability, appearance and costs. Manufacturing tests and tensile adhesion tests were carried out with various mortars. The joint mortar Ardex WA based on epoxy resin best met the requirements. Manual installation using a palette-knife (Fig. 9, top) and the use of a mortar caulking gun (Fig. 9, bottom) proved to be the best methods for applying the mortar. A stable bearing was essential for the grouting process.



Bild 9: Einbringen des Mörtels in die Faldfuge: händischer Einbau (oben) und Einbau mit Mörtelspritze (unten) | Fig. 9: Pouring of grout into folding edges: manual installation (top) and installation with mortar caulking gun (bottom)

2.6 Fold-in-fresh-Verfahren

Die Herstellung eines Elements im Laminierverfahren für das Fold-in-fresh-Verfahren ist in Bild 10 dargestellt. In dem Beispiel wurde nur eine Lage Textil eingebaut, jedoch lassen sich durch den lageweisen Aufbau auch mehrlagige Bewehrungen realisieren. Die Faltung des hier hergestellten Elementes mit Hilfe von Keilen war in Bild 2 dargestellt.

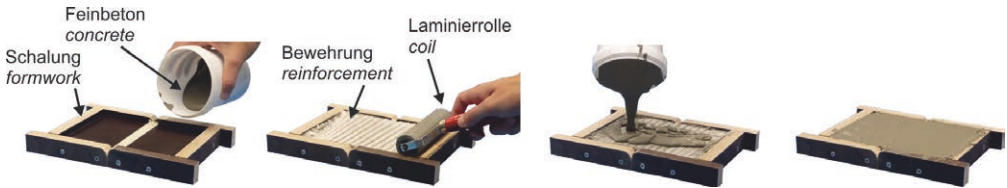


Bild 10: Exemplarische Darstellung der Herstellung einer im frischen Zustand faltbaren Platte mit dem Laminierverfahren | **Fig. 10:** Exemplary representation of the production of a plate for the fold-in-fresh-method using the lamination process

Zur Ermittlung der Herstellgrenzen des Fold-in-fresh-Verfahrens wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Textilien zur Ermittlung des maximal realisierbaren Neigungswinkels untersucht. Das beste Ergebnis von bis zu 50° Facettenneigung konnte mit ungetränkten engmaschigen Textilien erzielt werden. Der Faktor Zeit hat beim Falten eine herausragende Bedeutung. Durch den beginnenden Erhärtungsprozess des Betons nach der Betonage können mit fortschreitender Zeit stetig steilere Neigungen erreicht werden. Gleichzeitig werden die ohne Aufreißen des Querschnitts realisierbaren Faltewinkel durch das abnehmende Verformungsvermögen des Betons immer stumpfer. In diesem Spannungsfeld ist der optimale Zeitpunkt zu finden.

2.7 Vergleich der Herstellmethoden

Eine klare Aussage, dass eine Methode überlegen ist, ist nicht möglich, aber auch nicht notwendig. Beide Methoden weisen jeweils besondere Eigenschaften auf, die für unterschiedliche Einsatzzwecke von Vorteil sind. Die jeweiligen Vor- und Nachteile sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Ein Nachteil des Fold-and-grout-Verfahrens ist der aufwendige mehrstufige Prozess, der jedes

2.6 Fold-in-fresh method

The manufacturing of an element for the fold-in-fresh method using a laminating process is shown in Fig. 10. In the example, only one layer of textile reinforcement was used, however, multilayer reinforcement can also be achieved by layer-wise construction. The folding of the element produced here using wedges is shown in Fig. 2.

Experimental investigations were carried out to determine the manufacturing limits of the fold-in-fresh method. Different textile fabrics were examined to determine the maximum possible angle of inclination. The best result of up to 50° facet inclination was achieved with unimpregnated fabrics with small mesh sizes. The time factor is of outstanding importance in folding. Due to the initial hardening process of the concrete after concreting, continuously steeper inclinations can be achieved as time goes on. At the same time, the folding angles that can be achieved without tearing of the cross-section become increasingly blunt due to the decreasing deformability of the concrete. Within this domain, an optimum has to be found.

2.7 Comparison of manufacturing methods

A clear statement that a method is superior is not possible, but also not necessary. Both methods have special properties, which are advantageous for different applications. The respective advantages and disadvantages are listed in Table 1.

A disadvantage of the fold-and-grout method is the complex multi-phase process that is required each time to produce an oricrete plate. This is countered by rapid series production us-

Aspekt Aspect	Fold-and-grout	Fold-in-fresh
Serienfertigung Serial production	-	+
Schnelle Anpassung Faltmuster Fast adaption to crease pattern	+	-
Beliebige Neigungen und Faltwinkel Arbitrary inclinations and folding angle	+	-
Mehrlagige Bewehrung Multi-layer reinforcement	-	+

Tabelle 1: Vergleich ausgewählter Aspekte der Herstellmethoden | **Table 1:** Comparison of selected aspects of the manufacturing methods

Mal für die Erstellung eines Faltmusterhalbzeuges erforderlich wird. Diesem steht eine schnelle Serienfertigung mit dem Fold-in-fresh-Verfahren für Elemente mit dem gleichen Faltmuster und gleichen Grundrissabmessungen entgegen. Für eine Variation der Größe und des Faltmusters bei der Herstellung von Unikaten ist das Fold-and-grout-Verfahren besser geeignet. Der Aufwand der Erstellung eines individuellen Faltmusterhalbzeuges ist geringer als der Bau einer faltbaren Schalung. Die Präzision der gefalteten Elemente ist beim Einsatz einer faltbaren Schalung größer als beim Fold-and-grout-Verfahren. Aufgrund der Breite der Faltkante und der Flexibilität des Textils waren kleine ungeplante Verschiebungen unvermeidbar. Die maximal realisierbaren Neigungen und Öffnungswinkel sind beim Fold-in-fresh-Verfahren aufgrund der Fließfähigkeit des Betons begrenzt. Beim Fold-and-grout-Verfahren gibt es keine Einschränkungen, jedoch kann der Querschnitt nur mit einer zentrischen Lage Bewehrung ausgeführt werden. Durch die Herstellung der Platte im Laminierverfahren beim Fold-in-fresh-Verfahren kann der Querschnitt mehrlagig bewehrt werden.

2.8 Analyse des Tragverhaltens

Für die Ermittlung von Bemessungswerten und mechanischen Kennwerten wurden experimentelle Untersuchungen an Kleinkörpern durchgeführt. Im Fokus standen das Biegetragverhalten der Faltkanten und Facetten sowie das Zugtragverhalten der Facetten.

Für eine numerische Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens können die Geometriedaten der gefalteten Struktur aus der Oricreate-Plattform exportiert und als Eingabe für eine Simulation mit finiten Elementen verwendet

ing the fold-in-fresh method for elements with the same crease pattern and the same ground view dimensions. The fold-and-grout method is more suitable for varying the size and the crease pattern in the production of unique items. The effort involved in producing an oricrete plate with an individual crease pattern is less than building a foldable formwork. The precision of the folded elements is greater with the use of a foldable formwork than with the fold-and-grout method. Due to the width of the crease lines and the flexibility of the textile fabric, small-unplanned displacements were unavoidable. The maximum possible inclinations and dihedral angles with the fold-in-fresh method are limited due to the flowability of the concrete. In this respect there are no restrictions with the fold-and-grout method, but the cross-section can only be produced with a centric layer of reinforcement. By producing the plate using the laminating process of the fold-in-fresh method, the cross-section can be reinforced with several layers.

2.8 Analysis of the load-bearing behaviour

For the determination of design values and mechanical properties, experimental investigations were carried out on small specimens. The focus was on the flexural strength of the folded edges and facets as well as the tensile strength of the facets.

For a numerical analysis of the load-bearing and deformation behaviour, the geometry data of the folded structure can be exported from the oricreate platform and used as input for a finite element simulation (Figure 11, left). As failure criterion the first crack formation was defined. For this reason a linear-elastic formulation was sufficient.

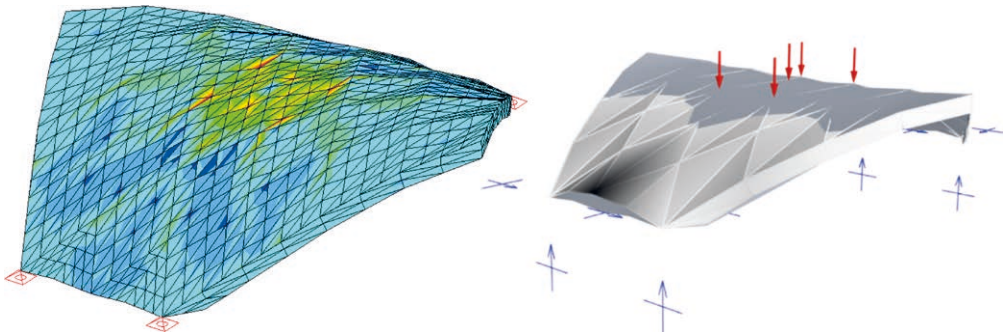


Bild 11: Numerische Untersuchung der Canopy-Faltschale: Finite-Elemente-Simulation (links), Untersuchung mit der Oricreate-Plattform (rechts) | **Fig. 11:** Numerical investigation of the canopy shell: finite element simulation (left) investigation with the Oricreate platform (right)

werden (Bild 11, links). Als Versagen wurde die Erstrissbildung definiert, wodurch eine linear-elastische Formulierung ausreichend war.

Im Rahmen der Arbeiten für die Canopy-Faltschale wurde ein weiterer Ansatz für die Tragwerk-analyse in Form einer Optimierungsaufgabe im Oricreate-Modell implementiert (Bild 11, rechts) [24]. Die Grundannahme für diesen Ansatz war, dass das Tragverhalten der Struktur von den Fal-kanten bestimmt wird und diese auch als erstes versagen. Als Zielfunktion sollte das Minimum der potentiellen Energie der Struktur gefunden werden. Die gesamte potentielle Energie des Bau-werks setzte sich zusammen aus der Summe der äußeren Arbeit der einwirkenden Kräfte und des Eigengewichtes sowie der Formänderungsenergie der Faltkanten. Als Nebenbedingung wurden die Facetten als starr angenommen. Die Lösung der Optimierungsaufgabe ergab die Verformungen der Struktur und die Momentenverteilung entlang der Faltlinien. Der Vorteil eines solchen Modellierungsansatzes besteht darin, dass der gesamte Faltungsprozess und die Strukturanalyse inner-halb des gleichen numerischen Rahmens model-liert werden können, ohne dass Daten exportiert und Ergebnisse nachbearbeitet werden müssen. Darüber hinaus hat das Modell nur eine über-schaubare Anzahl an Freiheitsgraden, so dass der Rechenaufwand deutlich geringer im Vergleich mit einer Simulation mit finiten Elementen ist.

Beide Ansätze wurden im Rahmen der Arbeiten zur Canopy-Faltschale angewandt und mit den Er-gebnissen der experimentellen Untersuchungen

Within the work on the canopy shell, a further approach for structural analysis was imple-mented in the form of an optimization problem in the oricreate model (Figure 11, right) [24]. The basic assumption for this approach was that the load-bearing behaviour of the structure is de-termined by the creases and that these also fail first. As a goal function the minimum of the po-tential energy of the structure should be found. The total potential energy of the structure was formulated as a sum of the external work due to the applied loads and stored energy due to the bending of fold lines. Additionally, the equal-ity constraints of rigid facets were applied. The solution of the optimization problem delivers the deformations of the canopy and the distri-bution of rotational moments along the fold lines. The advantage of such a modelling ap-proach is that the whole folding process and the structural analysis can be modelled within the same numerical framework without a need of data export and of post processing of results. Furthermore, the model consists of small num-ber of degrees of freedom in contrast to a finite element (FE) simulation, which means that the computational effort is significantly lower.

Both approaches were applied in the work on the canopy shell and compared with the results of the experimental investigations [24]. Both were able to reproduce the deformation figure sufficiently well. However, the experimental in-vestigation showed that the assumption of the fold line as the weakest element was not correct. The first cracking occurred in the facets. Due to

verglichen [24]. Beide konnten die Verformungsfigur ausreichend gut wiedergeben. Die experimentelle Untersuchung zeigte jedoch, dass die Annahme der Faltkante als schwächstes Element nicht korrekt war. Die Erstrissbildung trat in den Facetten auf. Durch diese fehlerhafte Annahme überschätzte die Simulation mit der Oricreate-Plattform die Erstrisslast von 5 kN mit 17,5 kN deutlich. Es ist zu erwarten, dass die Erweiterung der Simulation mit dem elastischen Verhalten der Facetten zu einem besseren Ergebnis führt. Unter der Annahme der minimalen Biegezugfestigkeit des Betons von 5 N/mm² wurde für das Erstrissmoment des Facettenquerschnitts ein Wert von 0,084 kNm/m ermittelt. In der FE-Simulation mit Infograph wurde dieser Wert bei einer Last von 4,5 kN erreicht.

3 Prototypen

3.1 Kleinformatige Prototypen

Zu Beginn der Untersuchungen wurden nur kleinformatige, modellartige Strukturen mit dem Fold-and-grout-Verfahren gebaut und untersucht. Der erste Prototyp eines Bogens mit dem Yoshimura-Faltmuster ist in Bild 12 (links) dargestellt. Als Basis diente eine 6 mm dicke Platte aus UHPC mit den Abmessungen 1,40 m × 0,80 m. Weitere kleinformatige Bögen und Probekörper wurden gebaut, um u. a. Fragestellungen zur Ausbildung der Faltkanten, der Faltung selbst und der Verfugung zu klären. Das Gestaltungskonzept der Segmentierung wurde im Rahmen einer Studie untersucht [25]. Aus 20 Segmenten wurde eine Kuppel gefertigt, die mit dem Namen *Oridome* bezeichnet



this incorrect assumption, the simulation with the oricreate platform clearly overestimated the first crack load of 5 kN with 17.5 kN. It is to be expected that the extension of the simulation with the elastic behaviour of the facets leads to a better result. Assuming the minimum bending tensile strength of the concrete with 5 N/mm², a value of 0.084 kNm/m was determined for the first crack moment of the facet cross-section. In the FE simulation with Infograph, this value was achieved with a load of 4.5 kN.

3 Prototypes

3.1 Small scale prototypes

At the beginning of the investigations, only small scale, model-like structures were built and investigated using the fold-and-grout method. The first prototype of a vault with the Yoshimura crease pattern is shown in figure 12 (left). A 6 mm thick UHPC plate measuring 1.40 m × 0.80 m served as basis. Further small scale vaults and specimens were built in order to clarify issues such as the design of the folding edges, the folding itself and the jointing. The design concept of segmentation was investigated in a study [25]. From 20 segments a dome was assembled, which was called *Oridome* (picture 12, right). It had a height of 40 cm and a diameter of 120 cm.

3.2 Singly-curved folded plate structures

Once the basic principles had been developed, the structures were to take on larger dimensions based on practical application scenar-



Bild 12: Kleinformatige Prototypen: erste Oricrete-Struktur (links) und Oridome, gefügt aus 20 Segmenten (rechts) | **Fig. 12:** Small scale prototypes: first oricrete structure (left) and 'Oridome' made out of 20 segments (right)

wurde (Bild 12, rechts). Sie hatte eine Höhe von 40 cm und einen Durchmesser von 120 cm.

3.2 Einfach gekrümmte Falwerke

Nach der Erarbeitung von Grundlagen sollten die Strukturen größere Abmessungen annehmen, die sich an praktischen Einsatzszenarien orientierten. Es wurden als erstes zwei Tonnenschalen gebaut und geprüft [26], [27]. Die Schalen wurden aus identischen, 1 cm dicken Falthalbzeugen mit Abmessungen von 2,4 m × 3,0 m hergestellt. Als Bewehrung wurde ein offenmaschiges Gelege aus AR-Glasfasern verwendet. Für den Faltprozess der ersten Schale in Bild 13 wurden Seile und eine Unterstüztungsstruktur aus Spanten eingesetzt (Bild 14, links). Durch das langsame Ablegen der Platte auf die Spantenkonstruktion wurde das Halbzeug gefaltet (Bild 14, rechts).

Ein alternatives Konzept für die Faltung wurde bei der zweiten gefalteten Schale erprobt. Die zylindrische Zielform wurde zunächst mit Hilfe von Seilen und dem Eigengewicht in einer auf dem Kopf stehenden hängenden Konfiguration angenähert (Bild 15, links). Für die Feinjustierung der Form und die Fixierung wurden im jeweiligen Winkel der Falkante gekantete Bleche eingesetzt. Als zusätzlicher Arbeitsschritt musste die gesamte Schale gewendet werden, was mit Hilfe eines Kranes und eines Gabelstaplers gelang (Bild 15, rechts). Zur endgültigen Fixierung der Falkanten der Tonnenschalen wurden diese mit Mörtel verfügt.

Die Tragfähigkeit beider Schalen wurde untersucht [27]. Dazu wurde eine Einzellast jeweils



Bild 13: Tonnenschale I | Fig. 13: Barrel vault I

ios. First two barrel vaults were built and tested [26], [27]. The shells were made of identical oricrete pre-fab plates with dimensions of 2.4 m × 3.0 m and a thickness of one centimetre. An open-mesh fabric made of AR glass was used as reinforcement. For the folding process of the first shell in Fig. 13, ropes and a scaffolding were used (Fig. 14, left). The oricrete pre-fab plate was folded by slowly placing the plate on the frame construction (Fig. 14, right).

An alternative concept for folding was tested with the second barrel vault. The cylindrical target shape was approximated using ropes and dead load in an upside-down hanging configuration (Fig. 15, left). For the fine adjustment of the form and the fixation, clamping profiles with the respective angle of the folded edge were used. As an additional work step, the entire shell had to be turned, which was achieved with the aid of a crane and a forklift truck (Fig. 15, right). For the final fixation of the folded edges of the barrel vaults, these were grouted with mortar.

The load-bearing capacity of both vaults was investigated [27]. For this purpose a single load was applied in the middle of each vault. Barrel



Bild 14: Faltung der Tonnenschale I: Spantenkonstruktion (links) und Faltung des Halbzeuges durch Ablassen auf die Spantenkonstruktion (rechts) | Fig. 14: Folding process of barrel vault I: scaffolding (left); folding of the oricrete plate by use of the scaffolding (right)

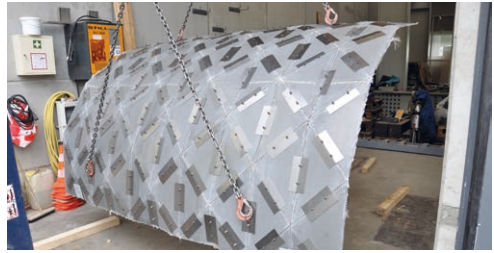


Bild 15: Arbeitsschritte bei der Herstellung von Tonnenschale II: Annäherung der Form durch Hängen (links); Wenden der Struktur (rechts) | **Fig. 15:** Steps during the construction process of barrel vault II: approximation of the form in a hanging state (left); turning (right)

mittig auf den Scheitel aufgebracht. Tonnenschale I war auf vier Punkten gelagert. Dagegen wurde die Tonnenschale II auf beiden Seiten liniengelagert. Bei der Tonnenschale I versagte eine Faltkante in der Nähe des Auflagers bei einer Last von 2,7 kN. Die Ausbildung des Auflagers war nicht optimal, da der Kraftfluss hier die Faltkante senkrecht schneidet. Tonnenschale II versagte bei einer Last von 8,1 kN durch das Aufreißen der senkrechten Faltkante in der Mitte der Schale auf einer Seite. Dieser Versagensmodus war völlig unerwartet. Im Nachgang zeigte sich, dass die Unterkonstruktion des Linienlagers zu weich gewesen war und das Tragverhalten eher dem eines Einfeldträgers entsprach. Nachdem die resultierenden Zugspannungen in Feldmitte die Erstrissspannung der Faltkante erreichten, versagte die Struktur schlagartig, da der Querschnitt mit nur einer Lage textiler Bewehrung unterbewehrt war.

Der Entwurf der Tonnenschalen war durch eher flachere Öffnungswinkel von bis zu 162° geprägt. Deutlich spitzere Winkel zwischen den Facetten bis 107° konnten beim *bike shell-ter* (Bild 16) realisiert werden [21]. Das Falthalbezeug (Bild 6) hatte eine Länge von 3 m und in der Mitte eine Breite von 2,4 m, die sich zu den Seiten auf 0,8 m verringerte. Für den Faltprozess wurden eine vereinfachte Spantenkonstruktion sowie Klemmbleche eingesetzt. Allerdings verlief der Faltprozess nicht reibungslos und es waren viele manuelle Korrekturen erforderlich. Auch wurde das Textil aus AR-Glas in den Faltkanten stark beansprucht und riss vor allem an den Kontaktstellen zu den Hebeseilen. Nach diesen Erfahrungen wurde für die folgende Canopy-Faltschale ein textiles Gelege aus Carbon mit

vault I was supported on four points. In contrast, barrel vault II was linearly supported on both sides. In the case of barrel vault I, a crease next to the support failed at a load of 2.7 kN. The design of the support was not optimal, as the force flow here cuts the crease vertically. Barrel vault II failed at a load of 8.1 kN. A vertical crease at one side was torn apart. This failure mode was completely unexpected. Afterwards it showed that the substructure of the linear support was too soft. The overall behaviour of the support was more like a simply supported beam. After the initial cracking stress of the crease was reached at maximum stressed spot in the middle of the span, the structure failed abruptly. The cross-section was underreinforced with only one layer of textile reinforcement.

The design of the barrel vaults was characterised by rather flat dihedral angles of up to 162° . Significant steeper angles between the facets of up to 107° could be achieved with the *bike shell-ter* (Fig. 16) [21]. The oricrete plate (Fig. 6) had a length of 3 m and a width of 2.4 m at the centre, which was reduced to 0.8 m on the sides. A simplified scaffolding and clamping profiles were used for the folding process. However, the folding process did not run smoothly and many manual corrections were necessary. The AR-glass textile fabric was also subjected to heavy wear in the creases and tore, especially at the contact points with the lifting ropes. Based on this experience, a carbon textile fabric with a coating of styrol-butadien rubber (SBR) was used for the following canopy shell, which proved to be much more robust.

SBR-Tränkung eingesetzt, dass sich als deutlich robuster erwies.

3.3 Doppelt gekrümmtes Faltnetz: Canopy-Faltschale

Ausgehend von einer identischen Grundplatte wie beim bike shell-ter wurde mit der in Bild 17 (rechts) dargestellten Canopy-Schale der Entwurfsraum auf doppelt gekrümmte Strukturen erweitert [24]. Durch den Einbezug des Hängeprinzips bei Entwurf und Herstellung konnte der Grundsatz des Prinzips *form follows force* umgesetzt werden (Bild 17, links).

An der Canopy-Faltschale wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die Schale war an den Seiten auf jeweils zwei Punkten gelagert und wurde wie auch die Tonnenschale im Bogenscheitel mit einer Einzellast belastet. Die Erstrisslast betrug 5 kN. Die im weiteren Belastungsverlauf entstehenden Risse fanden sich an der Plattenoberseite in den Viertelpunkten und an der Plattenunterseite im Scheitel. Dies steht im Einklang mit der Verteilung der Zugspannungen in einem Bogen unter einer Einzellast. Die maximale Traglast betrug 8 kN. Nach dem Erreichen dieser maximalen Last zeigte die Struktur ein sehr gutmütiges Verhalten. Die Verformung der Struktur schritt voran, ohne dass es zu einem schlagartigen Versagen kam. Die Risse fanden sich überwiegend in den Facetten und erst zu einem späteren Zeitpunkt entstanden auch Risse in den Faltkanten.

Für die Vermessung der Schale und die Verformungsmessung während des Versuches wurde



Bild 16: Bike shell-ter | Fig. 16: Bike shell-ter

3.3 Doubly-curved folded plate structure: canopy shell

Starting from an identical base plate as for the bike shell-ter, the design space was extended to doubly-curved structures with the canopy shell depicted in Fig. 17 (right) [24]. By including the hanging principle in the design and manufacturing process, it was possible to implement the principle *form follows force* (Fig. 17, left).

Experimental investigations were performed on the canopy shell. The shell was supported at two points on each side and, like the barrel vaults, loaded with a single load in the centre. First cracking occurred at a load level of 5 kN. The cracks that developed during the course of the load were found at the top side of the shell in the quarter points and at the bottom side of the shell in the middle. This was in accordance to the distribution of tensile stresses in a vault subjected to a single load. The maximum load was 8 kN. After reaching this maximum load, the structure showed a very good-natured be-



Bild 17: Canopy-Faltnetzwerk: Faltnetzprozess durch Hängen (links); Ansicht fertige Schale (rechts) | Fig. 17: Canopy shell: folding process by hanging (left); view of finished structure (right)



Photogrammetrie eingesetzt, was sich sehr gut bewährt hat. Ausführliche Ergebnisse sind in [26] dargelegt.

3.4 Segmentierte Tonnenschale

Das Konzept der Segmentierung zur Erweiterung der Größe der herstellbaren Strukturen wurde beim Bau einer Tonnenschale erprobt [8]. Für die Herstellung der Einzelsegmente wurde erstmalig das Fold-in-fresh-Verfahren eingesetzt, wodurch das Verfugen entfiel. In Bild 18 sind die dazu verwendete faltbare Schalung sowie die Herstellung eines Elementes dargestellt. Mit der Schalung konnte pro Tag mit einem Zeitaufwand von einer Stunde ein Element hergestellt werden. Die Elemente ließen sich kompakt auf einer Palette stapeln (Bild 19, links).

Aus den Einzelementen wurde der Bogen schrittweise in einem Klappverfahren aufgebaut. An einer Seite war der Bogen gelenkig gelagert, an der anderen wurde er mit einem Kran angehoben, so dass manuell ein weiteres Element überlappend ergänzt werden konnte.

haviour. The structure continued to deform, but there was no sudden collapse. The cracks were mainly found in the facets and only at a later stage cracks appeared in the folding edges.

Photogrammetry was used for the measurement of the shell and the deformation measurement during the test, which has proved very successful. Detailed results are presented in [26].

3.4 Segmented barrel vault

The concept of segmentation to expand the size of the structures to be produced was tested during the construction of a barrel vault [8]. For the first time, the fold-in-fresh method was used to produce the single segments, eliminating the need for grouting the creases. Figure 18 shows the foldable formwork used for this as well as the production of a folded element. With the formwork, one element per day could be produced with a time requirement of one hour. As shown in Fig. 19 (left), the elements could be stacked compactly on a pallet.

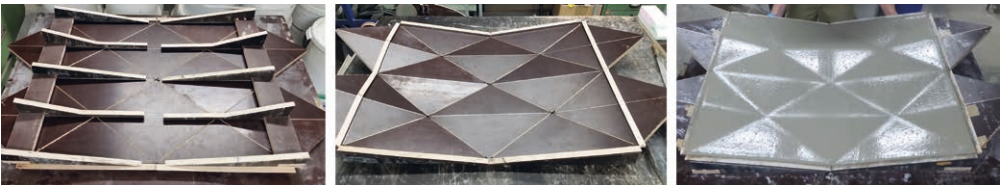


Bild 18: Herstellung eines Elementes für die segmentierte Tonnenschale mit dem Fold-in-fresh-Verfahren; v. l. n. r.: Bestandteile der faltbaren Schalung, Schalung im gefalteten Zustand, Betonelement kurz nach dem Falten | **Fig. 18:** Production of a folded segment for the segmented barrel vault by fold-in-fresh; from left to right: components of foldable formwork, formwork in folded condition, folded element shortly after folding

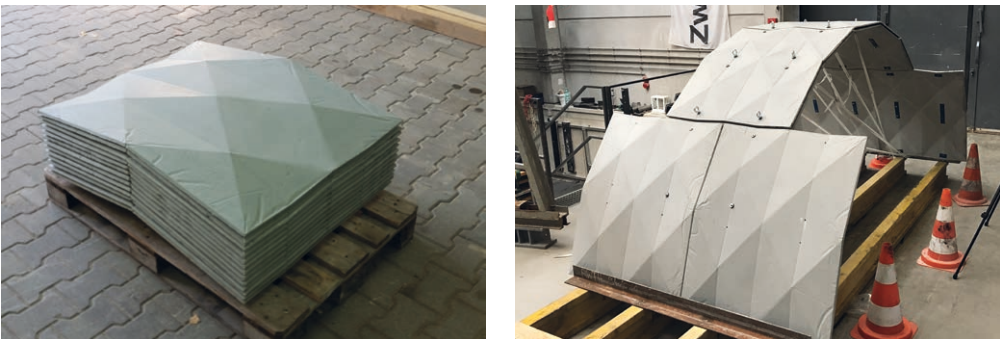


Bild 19: Vom Segment zum Bogen: gestapelte Elemente auf einer Palette (links), fertiger Bogen (rechts) | **Fig. 19:** From segments to a vault: stacked segments on a pallet (left) and finished vault (right)

Die Verbindung der Elemente untereinander erfolgte mit Schrauben, die auch einen Rückbau des Bogens ermöglichen. Die Schnüre an der Unterseite dienten zur Aufnahme der während des Anhebens entstehenden horizontalen Kräfte. Nach der Fertigstellung des Bogens wurden diese entfernt. Die Spannweite des aus elf einzelnen Segmenten realisierten Bogens betrug ca. 2,75 m, die Höhe 1,25 m.

3.5 Gefaltete Träger

Die zuletzt mit der Fold-in-fresh-Methode gebauten Prototypen waren gefaltete Träger. Das verwendete Faltmuster wurde aus dem Waterbomb-Faltmuster abgeleitet. Damit gelang im Gegensatz zum Yoshimura-Faltmuster eine unabhängige Gestaltung von Krümmung und Faltungshöhe. Für die Durchführung der Faltung wurde eine spezielle Faltschalung konstruiert. Das 2,2 m × 0,7 m große Faltmuster war aus einzelnen Facetten aus Holz, die mit Scharnierbändern verbunden wurden, aufgebaut. Es wurde anschließend in einem Holzkasten auf verschiedenen Punkten gelagert. In Studien mit der Oricreate-Plattform wurden der Falprozess simuliert und die Lage der Auflager ermittelt. Die Betonplatte wurde im Laminierverfahren erstellt, wodurch eine gezielte Verstärkung von hoch belasteten Stellen mit zusätzlicher Bewehrung möglich war.

Die Faltschalung wurde an drei Stellen gesteuert (Bild 20, links). In der Mitte wurde sie durch einen Stempel vertikal angehoben. Die Seiten wurden mit Schnüren kontrolliert abgelassen. Die gewünschte Zielform wurde sehr genau erreicht. Es wurden insgesamt fünf Falträger hergestellt. Einer der Träger ist in Bild 20 (rechts) dargestellt. Zur Vermeidung des Eindringens von Beton in die Scharniere wurden unterschiedliche Folien verwendet. Dabei zeigte sich, dass übliche Kunststofffolien vor allem in den Talfalten Wellen bildeten, die sich dann direkt im fertigen Betonelement wiederspiegeln und den Querschnitt schwächten. Eine deutliche Reduzierung der Wellenbildung und sehr schöne Oberflächen konnten hingegen durch den Einsatz einer Folie aus Latex erzielt werden.

With the help of a crane, the vault was assembled step by step with the finished elements in a clapping process. On one side, the arch was hinged. On the other side, the arch was lifted with the help of the crane, so that another element could be added manually. The elements were connected to each other with screws, which also made it possible to dismantle the arch. The strings on the underside were used to absorb the horizontal forces generated during lifting. These were removed after completion of the vault. The span of the vault, which consisted of eleven individual segments, was approximately 2.75 m, the height 1.25 m.

3.5 Folded girders

The last realized prototypes were folded girders made using the fold-in-fresh method. The pattern used for the design was derived from the waterbomb crease pattern. In contrast to the Yoshimura crease pattern, an independent design of the curvature and the folding height was achieved with it. A special foldable formwork was constructed for the folding process. The crease pattern was made up of individual facets of wood, which were connected with hinged bands and had dimensions of 2.2 m × 0.7 m. The crease pattern was then stored in a wooden box on various points. Studies with the oricreate platform simulated the folding process and determined the position of the supports. The concrete plate was constructed using a lamination process, which made it possible to selectively reinforce highly stressed areas with additional reinforcement.

The foldable formwork was controlled at three points (Fig. 20, left). The formwork was lifted vertically by a stamp situated in the middle. The sides were lowered with cords in a controlled manner. The desired target shape could be reached very exactly. A total of five folded girders were produced. One of the girders is shown right in Fig. 20. Different foils were used to prevent concrete from penetrating the hinges. It turned out that common plastic foils formed waves mainly in the valley folds, which were then reflected directly in the finished concrete



Bild 20: Gefalteter Träger mit Waterbomb-Faltpattern, links während der Faltung und rechts fertiger Träger | **Fig. 20:** Folded girder with waterbomb crease pattern: during folding (left) and finished girder (right)

Bei vier der Falträger wurde die Tragfähigkeit experimentell ermittelt. Dazu wurden sie mit einer Spannweite von 2 m an beiden Seiten unverschieblich gelagert und mittig mit einer Einzellast belastet. Es wurde eine maximale Tragfähigkeit von 13,5 kN erreicht. Das Tragverhalten der Träger war sehr robust und geprägt von vielfältigen Umlagerungsmöglichkeiten.

4 Methoden zur Steigerung der Tragfähigkeit

Bei den durchgeführten experimentellen Untersuchungen an den beiden Tonnenschalen sowie der Canopy-Faltschale trat das Versagen üblicherweise aufgrund der Überschreitung der Zug- oder Biegezugfestigkeit des Feinbetons ein. Die Querschnitte waren unterbewehrt; wodurch sie nach Erreichen der Erstrisslast direkt versagten. Die hohe Druckfestigkeit des Feinbetons wurde bei weitem nicht ausgenutzt, womit Potential zur Steigerung der Tragfähigkeit vorhanden ist. Es wurden hierzu zwei Ansätze untersucht [27]. Der erste Ansatz zur Verstärkung war die gezielte Aufbringung von zusätzlichen Textilbetonschichten. Einerseits wurde dadurch dem Querschnitt mehr statische Höhe gegeben und andererseits kann die Lage der Bewehrung aus der Querschnittsmitte an den Rand verschoben werden. Hierdurch kann die Bewehrung nach der Rissbildung effektiver Zugkräfte aufnehmen und es wird die Biegetragfähigkeit des Querschnittes erhöht. Der zweite Ansatz ist die Anwendung von Vorspannung, wodurch die hohe Druckfestigkeit des Betons besser ausge-

element und weakened the cross-section. A clear reduction of the wave formation and very beautiful surfaces, however, could be achieved by using a latex film.

The load-bearing capacity of four of the folded girders was investigated experimentally. For this purpose, they were rigidly supported on both sides and loaded with a single load in the middle. The girders had a span of 2 m. A maximum load capacity of 13.5 kN could be achieved. The load-bearing behaviour of the girders was very robust and characterised by a variety of relocation options.

4 Methods for increasing load-bearing capacity

In the experimental investigations carried out on the two barrel vaults and the canopy shell, failure usually occurred because the tensile or flexural strength of the fine concrete was exceeded. The cross-sections were underreinforced, so that they failed immediately after reaching the first crack load or large cracks were formed. The high compressive strength of the fine concrete has by far not been exploited. This offers the possibility for increasing the load-bearing capacity. Two approaches were examined [27]. The first approach to to strengthen the structure was the targeted application of additional textile concrete layers. On the one hand, this gave the cross-section more static height and on the other hand, the position of the reinforcement could be shifted from the centre

nutzt wird. Im Rahmen einer Studie wurde ein System zur Vorspannung ohne Verbund entwickelt (Bild 21) und an gefalteten Bögen mit einer Spannweite von 1,6 m und einen Stich von 0,46 m erprobt. In die Schalung für das Faltmusterhalbzeug wurden dazu zwei Schläuche mit je einem dünnen Stahlseil installiert (Bild 21, links). Nach der Betonage und dem Falten wurde in die mittlere Falte ein weiteres Spannglied eingelegt und alle Fugen vermörtelt. Mit einer Klemmkonstruktion konnte über ein Schraubgewinde je Spannglied eine Vorspannkraft von 3 kN erzeugt werden (Bild 21, Mitte).

Zur Bewertung der Wirksamkeit der Vorspannung wurden experimentelle Untersuchungen an zwei vorgespannten und zwei nicht vorgespannten Bögen durchgeführt (Bild 21, rechts). Die nicht vorgespannten Bögen versagten bei einer Last von 7,3 bzw. 7,8 kN und die vorgespannten bei 9,5 bzw. 9,9 kN. Die Erstrisslasten konnten im Mittel um 55 % gesteigert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Inspiziert von der japanischen Papierfaltkunst Origami wurde eine Methodik für den Entwurf und die Herstellung von Tragstrukturen durch Faltung entwickelt. In Kombination mit flächig bewehrten zementbasierten Verbundwerkstoffen wie Textilbeton ermöglicht das Faltkonzept die Realisierung von dünnwandigen, frei geformten Faltenwerken, die trotz komplexer Geometrie wirtschaftlich hergestellt werden können. Zur Unterstützung des Entwurfs und der

of the cross-section to one edge. This allows the reinforcement to absorb effective tensile forces after crack formation and increases the bending strength of the cross-section. The second approach is the application of prestressing, which makes better use of the high compressive strength of the concrete. As part of a study, a system for pre-stressing without bond was developed (Fig. 21) and tested on folded vaults with a span of 1.6 m and a height of 0.46 m. Two hoses, each with a thin steel cable inside, were installed in the formwork for the oricrete plate (Fig. 21, left). After concreting and folding, another tendon was inserted into the middle crease and subsequently the creases were grouted. With a screwing device the three tendons were pre-stressed with a force of 3 kN per tendon (Fig. 21, middle).

To evaluate the effectiveness of the prestressing, experimental investigations were carried out on two prestressed and two non prestressed vaults (Fig. 21, right). The non-prestressed vaults failed at a load of 7.3 and 7.8 kN each and the prestressed vaults at 9.5 and 9.9 kN, respectively. The first cracking load could be increased on average by 55%.

5 Summary and outlook

Inspired by the Japanese art of paper folding origami, a methodology was developed for the design and manufacture of load-bearing structures by folding. In combination with reinforced cement-based composite materials



Bild 21: Vorgespannter gefalteter Bogen; v. l. n. r.: Faltpattern mit eingebauten Spanngliedern, Aufbringung der Vorspannung und experimentelle Untersuchung | **Fig. 21:** Prestressed folded vault; from left to right: crease pattern with installed tendons, applying the pre-stressing, testing of a vault

Herstellung wurde die modulare Simulationsplattform Oricreate entwickelt, die den Faltprozess als mathematische Optimierungsaufgabe erfasst. Der Entwurfsraum zur Gestaltung der Form und der Tragfähigkeit wurde skizziert. Mit dem Fold-and-grout- und dem Fold-in-fresh-Verfahren wurden zwei Methoden vorgestellt, um aus bewehrtem Beton ein faltbares Medium zu machen. Mit der Herstellung von mehreren Prototypen wurden verschiedene Entwurfskonzepte und Herstellmethoden erprobt. Zur Untersuchung und Bewertung der Tragfähigkeit wurden experimentelle und numerische Methoden eingesetzt. Zur besseren Ausnutzung der Werkstoffe und zur Steigerung der Tragfähigkeit wurden das Ergänzen von zusätzlichen Schichten Textilbeton und der Einsatz von Vorspannung mit Erfolg angewendet.

Die entstehenden Strukturen können nicht nur als eigenständige Tragwerke, sondern auch als verlorene Schalung oder bei der Gestaltung von Fassaden- und Hüllsystemen eingesetzt werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198006311 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Turner, N.; Goddwine, B.; Mihir, S.: A review of origami applications in mechanical engineering. *Journal of Mechanical Engineering Science* 230 (2016) 14, S. 2345–2362 – DOI: 10.1177/0954406215597713
- [2] Sorguc, A.; Hagiwara, I.; Selcuk, S.: Origamics in architecture: a medium of inquiry for design in architecture. *METU Journal of the faculty of architecture* (2009) 2, S. 235–247 – DOI: 10.4305/METU.JFA.2009.2.12
- [3] Trautz, M.; Ayoubi, M.: Das Prinzip des Faltens in Architektur und Ingenieurbau. *Bautechnik* 88 (2011) 2, S. 76–79 – DOI: 10.1002/bate.201110006
- such as textile reinforced concrete, the folding concept enables the realization of thin-walled, freely formed folding structures that can be produced economically despite complex geometry. The modular simulation platform oricreate was developed to support the design and manufacture process. It captures the folding process as a mathematical optimization task. The design space for the design of the form and the load-bearing capacity was described. With the fold-and-grout and the fold-in-fresh method, two methods were presented to turn reinforced concrete into a foldable medium. Various design concepts and manufacturing methods were tested with the production of several prototypes. Experimental and numerical methods were used to investigate and evaluate the load bearing capacity. In order to make better use of the materials and to increase the load-bearing capacity, the addition of extra layers of textile reinforced concrete and the use of prestressing were successfully applied.
- The resulting structures can not only be used as independent supporting structures, but also, for example, as lost formwork or in the design of façade and cladding systems.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (no. 198006311) within the Priority Programme SPP 1542.

- [4] Herkrath, R.; Trautz, M.: Starre Faltungen als Leichtbauprinzip im Bauwesen. *Bautechnik* 88 (2011) 2, S. 80–85 – DOI: 10.1002/bate.201110007
- [5] Buri, H.: Origami aus Brettsper Holz. *Detail* (2010) 10, S. 1066–1069
- [6] Scheerer, S.; Chudoba, R.; Garibaldi, M. P.; Curbach, M.: Shells made of Textile Reinforced Concrete – Applications in Germany. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures J.IASS* 58 (2017) 1 – special issue: new directions for shell structures, S. 79–93 – DOI: 10.20898/j.iass.2017.191.846

- [7] Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J.; Beul, P.: Filigrane Bauwerke aus Textilbeton – Leistungsfähigkeit und Anwendungspotenzial des innovativen Verbundwerkstoffs. *Beton- und Stahlbetonbau* 110, Issue S1 – Supplement: Verstärkt mit Textilbeton (2015) Jan., S. 83–93 – DOI: 10.1002/best.201400111
- [8] van der Woerd, J. D.; Bonfig, C.; Hegger, J.; Chudoba, R.: Construction of a vault using folded segments made out of textile reinforced concrete by fold-in-fresh. 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. 9434, Book of Abstracts: S. 124, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
- [9] Engelsmann, S.; Spalding, V.: Ein prototypisches Kunststoff-Faltwerk mit neuartiger Füge-technologie. *Stahlbau* 78 (2009) 4, S. 227–231 – DOI: 10.1002/stab.200910034
- [10] Marinitsch, S.; Schranz, C.; Kolbitsch, A.: Untersuchungen zur Tragfähigkeit eines Verbindungsdetails für Faltwerke aus Glas. *Bauingenieur* 90 (2015) 6, S. 265–271
- [11] Leitner, K.: Tragkonstruktionen aus plattenförmigen Holzwerkstoffen mit der textilen Fuge. Diss., RWTH Aachen University, 2004
- [12] Kind-Barkauskas, F.; Polonyi, S.; Kauhsen, B.; Brandt, J.: *Beton Atlas – Entwerfen mit Stahlbeton im Hochbau*. 2. Aufl., Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2001
- [13] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Scholzen, A.; Hegger, J.: *Oricrete – Eine Entwurfs- und Herstellmethodik für dünnwandige Faltwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen*. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 11, S. 774–782 – DOI: 10.1002/best.201300057
- [14] Künstler, A.; Trautz, M.: Wandelbare Faltungen aus biegesteifen Faltelementen. *Bautechnik* 88 (2011) 2, S. 86–93 – DOI: 10.1002/bate.201110008
- [15] Evans, T. A.; Lang, R. J.; Magleby, S. P.; Howell, L. L.: Rigidly foldable origami gadgets and tessellations. *Royal Society Open Science* 2 (2015) 9, 150067, 18 S. – DOI: 10.1098/rsos.150067
- [16] Yoshimura, Y.: On the mechanism of buckling of a circular cylindrical shell under axial compression. Technical Memorandum 1390, National Advisory Committee for Aeronautics, 1955
- [17] Hanna, B.; Lund, J.; Lang, R.; Magleby, S.; Howell, L. L.: Waterbomb base: a symmetric single-vertex bistable mechanism. *Smart Materials and Structures* 23 (2014) 9, 094009, 11 S. – DOI: 10.1088/0964-1726/23/9/094009
- [18] Chudoba, R.; van der Woerd, J. D.; Hegger, J.: ORICREATE: Modeling framework for design and manufacturing of folded plate structures. In: Miura, K.; Kawasaki, T.; Tachi, T.; Uehara, R.; Lang, R.; Wang-Iverson, P. (Hrsg.): *Proc. of Origami6 – Part II: Technology, Art, Education*, 10.–13.08.2014 in Tokio (Japan), Providence: American Mathematical Society, 2015, S. 523–536
- [19] <https://github.com/simvisage/oricrete> (geprüft am | checked at 11.04.2018)
- [20] www.oricrete.com (geprüft am | checked at 11.04.2018)
- [21] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Folded bike shell-ter: Application of oricrete design and manufacturing method. In: Kawaguchi, K.; Ohsaki, M.; Takeuchi, T. (Hrsg.): *Spatial Structures in the 21st Century – Proc. of the IASS Annual Symp.* 2016, 26.–30.09.2016 in Tokio (Japan), Madrid: IASS, 2016, publ. auf USB-Stick, 13 S.
- [22] Brockmann, T.: Mechanical and fracture mechanical properties of fine grained concrete for textile reinforced composites. Diss., RWTH Aachen University, 2006
- [23] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Singly-curved shell structure made of textile-reinforced concrete plate using a folding technique. In: Obrebski, J. B.; Tarczewski, R. (Hrsg.): *BEYOND THE LIMITS OF MAN – Proc. of the IASS Symp.* 2013, 23.–27.09.2013 in Wroclaw (Polen), 2013, Book of Abstracts: S. 342, Langfassung auf CD, 6 S.
- [24] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Canopy – Doubly Curved Folded Plate Structure. In: Hordijk, D. A.; Luković, M. (Hrsg.): *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering meet – Proc. of Int. fib Symp.*, 12.–14.06.2017 in Maastricht (Niederlande), Springer Int. Publ., 2018, S. 2512–2520 – DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_286
- [25] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.; Bongardt, C.: Oridome: Construction of a dome by folding. In: Reyolando, M.; Pauletti, R. (Hrsg.): *Shells, Membranes and Spatial Structures – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp.* 2014, 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, Beitrag Nr. 283, publ. auf USB-Stick, 8 S.
- [26] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Design and construction of a thin barrel vault by folding. In: KIVI (Hrsg.): *Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp.* 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-527713, publ. auf USB-Stick, 13 S.
- [27] van der Woerd, J. D.; Geßner, S.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Design, construction and strengthening of shell structures made by folding. In: IABSE (Hrsg.): *Engineering the Future – Proc. of 39th IABSE Symp.*, 21.–23.9.2017 in Vancouver (Kanada), 2017, S. 2898–290

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1–10, 11 links | left, 12 rechts | right, 14–15, 17 rechts | right, 18, 21: Jan Dirk van der Woerd
- Bilder | Pictures 11 rechts | right, 12 links | left, 13, 16, 17 links | left, 20: Rostislav Chudoba

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Dünnwandige Falwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen | Folded plate structures made of cementitious composites

Antragsteller 1 Applicant 1:	Dr.-Ing. Rostislav Chudoba Oberingenieur Senior engineer
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	CH 276/3-1/2 (Projektnummer Project number: 198006311)
Kontakt Contact:	+49 241 80 28150 rostislav.chudoba@rwth-aachen.de www.imb.rwth-aachen.de
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger Professor und Institutsdirektor Professor and institute's director
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	HE 2637/24-1/2 (Projektnummer Project number: 198006311)
Kontakt Contact:	+49 241 80 25170 jhegger@imb.rwth-aachen.de www.imb.rwth-aachen.de
Adresse Address:	RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Förderphase I Period I: 01.07.2011–30.06.2014 Förderphase II Period II: 01.10.2014–30.09.2017 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 30.03.2018
Team Team:	Jan Dirk van der Woerd

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Finding new forms for bearing structures by use of origamics. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 263–268
- Chudoba, R.; van der Woerd, J. D.; Schmerl, M.; Hegger, J.: ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures. Advances in Engineering Software 72 (2013) 6, S. 119–127 – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.05.004>
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Computational model for simulation of rigid foldable origami structures. In: Zingoni, A. (Hrsg.): Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation – Proc. of 5th Int. Conf. on Structural Engineering, Mechanics & Computations, 02.–04.09.2013 in Kapstadt (Südafrika), 2013, Book of abstracts: S. 299–301, Langfassung auf CD-ROM, 6 S.
- Chudoba, R.; van der Woerd, J. D.; Hegger, J.: Modeling framework for design and manufacturing of folded shell structures. In: Obrebski, J. B.; Tarczewski, R. (Hrsg.): BEYOND THE LIMITS OF MAN – Proc. of the IASS Symp. 2013, 23.–27.09.2013 in Wrocław (Polen), 2013, Book of Abstracts: S.189, Langfassung auf CD, 5 S.
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Singly-curved shell structure made of textile-reinforced concrete plate using a folding technique. In: Obrebski, J. B.; Tarczewski, R. (Hrsg.): BEYOND THE LIMITS OF MAN – Proc. of the IASS Symp. 2013, 23.–27.09.2013 in Wrocław (Polen), 2013, Book of Abstracts: S. 342, Langfassung auf CD, 6 S.
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Gefaltete Strukturen – Origami für Textilbeton. TUDALIT-Magazin (2013) 9, S. 19 – Tagungsband zur 5. Anwendertagung Textilbeton am 24.–25.09.2013 in Friedrichshafen
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.: Gestaltung von dünnwandigen Falwerken aus zementbasierten Verbundwerkstoffen nach der Oricrete-Methodik. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskoll., 07.–08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. S. 77–82
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Scholzen, A.; Hegger, J.: Oricrete – Eine Entwurfs- und Herstellmethodik für dünnwandige Falwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 774–782 – DOI: 10.1002/best.201300057

- van der Woerd, J. D.; Bongardt, Ch.; Kolodzie, M.; Chudoba, R.; Hegger, Josef: Oridome – Das Prinzip der Vielfältigkeit: Konzept für eine gefaltete Kuppel aus Textilbeton. *BWI BetonWerk International* (2014) 1, S. 30–38
- van der Woerd, J. D.; Stark, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Concrete light – Origami-based folded structures and prestressed sandwich shell beams | Leicht Bauen mit Beton – Origami-basierte Falwerke und vorgespannte Sandwich-Schalenträger. *BFT international* 80 (2014) 2, S. 27–29 – Tagungsband der 58. Ulmer Betontage, 18.–20.02.2014 in Neu-Ulm
- Chudoba, R.; van der Woerd, J. D.; Hegger, J.: Numerical modeling support for form-finding and manufacturing of folded plate structures made of cementitious composites using origami principles. In: Bičanić, N.; Mang, H.; Meschke, G.; de Borst, R. (Hrsg.): *Proc. of Euro-C 2014 – Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures*, 24.–27.03.2014 in St. Anton am Arlberg (Österreich), 2014, S. 451–462
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.; Bongardt, C.: Oridome: Construction of a dome by folding. In: Reyolando, M.; Pauletti, R. (Hrsg.): *Shells, Membranes and Spatial Structures – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp.* 2014, 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, Beitrag Nr. 283, publ. auf USB-Stick, 8 S.
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Entwurf und Herstellung von Falwerken durch Faltung 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. 60–69 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171612>
- Chudoba, R.; Hegger, J.; Scholzen, A.; Sharei, E.; Stark, A.; Will, N.; van der Woerd, J. D.: Die Leichtigkeit des Betons – Dünnwandige Schalenträgerwerke aus hochleistungsfähigen zementartigen Verbundwerkstoffen. *RWTH Themen – Bauingenieurwesen* (2015) 2, S. 42–45
- Chudoba, R.; van der Woerd, J. D.; Hegger, J.: ORICREATE: Modeling framework for design and manufacturing of folded plate structures. In: Miura, K.; Kawasaki, T.; Tachi, T.; Uehara, R.; Lang, R.; Wang-Iverson, P. (Hrsg.): *Proc. of Origami6 – Part II: Technology, Art, Education*, 10.–13.08.2014 in Tokio (Japan), Providence: American Mathematical Society, 2015, S. 523–536
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Design and construction of a thin barrel vault by folding. In: KIVI (Hrsg.): *Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp.* 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-527713, publ. auf USB-Stick, 13 S.
- Chudoba, R.; Claßen, M.; Hegger, J.; Rempel, S.; Stark, A.; Will, N.; van der Woerd, J. D.: Bauen mit Betonfertigteilen – Forschungsansätze für „das Bauen von morgen“. *RWTH Themen – Production Engineering* (2016) 1, S. 26–31
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Folded bike shell-ter: Application of oricrete design and manufacturing method. In: Kawaguchi, K.; Ohsaki, M.; Takeuchi, T. (Hrsg.): *Spatial Structures in the 21st Century – Proc. of the IASS Annual Symp.* 2016, 26.–30.09.2016 in Tokio (Japan), Madrid: IASS, 2016, publ. auf USB-Stick, 13 S.
- Scheerer, S.; Chudoba, R.; Garibaldi, M. P.; Curbach, M.: Shells made of Textile Reinforced Concrete – Applications in Germany. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures J.IASS* 58 (2017) 1 – special issue: new directions for shell structures, S. 79–93 – DOI: 10.20898/j.iass.2017.191.846
- van der Woerd, J. D.; Geßner, S.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Design, construction and strengthening of shell structures made by folding. In: IABSE (Hrsg.): *Engineering the Future – Proc. of 39th IABSE Symp.*, 21.–23.09.2017 in Vancouver (Kanada), 2017, S. 2898–2905
- van der Woerd, J. D.; Bonfig, C.; Hegger, J.; Chudoba, R.: Construction of a vault using folded segments made out of textile reinforced concrete by fold-in-fresh. 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. 9434, Book of Abstracts: S. 124, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Canopy – Doubly Curved Folded Plate Structure. In: Hordijk, D. A.; Luković, M. (Hrsg.): *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering meet – Proc. of Int. fib Symp.*, 12.–14.06.2017 in Maastricht (Niederlande), Springer Int. Publ., 2018, S. 2512–2520 – DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_286
- van der Woerd, J. D.; Hegger, J.; Chudoba, R.: Origami aus Beton. *DETAIL* (2018) 3, S. 16–18

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

Dissertation | Dissertation

- van der Woerd, J. D.: Eine Methodik zur Realisierung dünnwandiger Falwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen durch Faltung. 2018

Diplom- und Masterarbeiten | Diploma and Master's Theses

- Schmerl, M.: Entwicklung und Implementierung eines Simulationswerkzeugs zur Unterstützung der Herstellung von "Oricrete" Strukturen. Diplomarbeit, 2013
- Bonfig, C.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Verbindung von gefalteten Betonbauteilen. Masterarbeit, 2016
- Flunkert, L.: Numerische und experimentelle Untersuchung einer doppelt gekrümmten gefalteten Schale. Masterarbeit, 2016
- Weber, P.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Einbringung von Vorspannung in gefaltete Strukturen aus dünnen Textilbetonplatten. Masterarbeit, 2016

Bachelorarbeiten | Bachelor's Theses

- Felber, L.: Entwurf und Umsetzung von Falwerkprototypen aus zementartigen Verbundwerkstoffen. 2011
- Hiby, T.: Untersuchung von Fügemethoden für Falwerke aus Platten oder Segmenten. 2013
- Kolodzie, M.: Entwicklung und Erprobung eines Verfügunssystem für Oricrete-Platten. 2013
- Paul, S.: Überblick und Zusammenfassung von Verfahren und Konzepten zur Herstellung von Betonschalen ohne arbeitsintensive Schalung. 2013
- Schlichtholz, P.: Konstruktion einer Prüfvorrichtung für verfugte Faltkanten. 2013
- Taschenmacher, D.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Faltkanten in dünnwandigen Platten aus zementbasierten Verbundwerkstoffen. 2013
- de la Gala, T. R.: Entwurf und Untersuchung von Konzepten zur Faltung von Faltmustern aus Textilbeton. 2014
- Schwidder, S.: Untersuchung zum Zusammenhang von Form und Tragverhalten bei Falwerken. 2014
- Ringe, T.: Entwicklung und Implementierung eines Moduls zur Unterstützung der numerischen Analyse von „Oricrete“ Strukturen. 2015
- Boecker, S.: Experimentelle Untersuchungen zur Verstärkung von gefalteten Strukturen mit zusätzlichen Schichten Textilbeton. 2016
- Hartmann, F.: Experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von dünnen Textilbetonplatten. 2016
- Alsewailam, F.: Experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von verfugten Faltkanten. 2016
- Schneider, M.: Experimentelle Untersuchung von vorgespannten gefalteten Strukturen aus dünnen Textilbetonplatten. 2017
- Janiak, T.: Experimentelle Untersuchung zur Faltung von dünnwandigen Betonelementen aus Textilbeton im Grünzustand. 2017
- Borrmann, M.: Experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von gefalteten Kleinkörpern aus Textilbeton. 2017

Institutspraktika | Institute's internships

- Felber, L.: Ansätze zur Durchführung der Formgebung dünnwandiger textildbewehrter Falwerke. 2011
- Löw, M.: Ansätze zur Befestigung von Hebevorrichtungen auf dünnwandige Platten aus zementbasierten Verbundwerkstoffen – Klebesysteme. 2012
- Paul, S.: Ansätze zur Befestigung von Hebevorrichtungen auf dünnwandige Platten aus zementbasierten Verbundwerkstoffen – Unterdrucksysteme. 2012
- Bongardt, C.; Kolodzie, M.: Entwicklung und Herstellung eines Kuppelbauwerks aus doppelt gekrümmten Falwerksegmenten aus Textilbeton. 2013
- Brasienne, F.: Herstellung eines Blumenkübels durch Falten von Beton. 2013
- de la Gala, T. R.: Falten von Strukturen aus Textilbeton. 2013

- Schliehe-Diecks, F.: Import und Untersuchung von Falwerkgeometrien in InfoCAD. 2013
- Jarmolkovicus, V.: Modeling of concrete folded plate structures based on origami crease patterns and export into ABAQUS using open source software – Pyformex. 2014
- Kersten, K.: Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Anordnung der Falten auf das Tragverhalten gefalteter Bögen. 2014
- Natta, C.: The collapsible dome. 2014
- Alsewailern, F.: Experimentelle Untersuchungen zum Zugtragverhalten von vier Textilien. Sommersemester 2016
- Boecker, S.: Experimentelle Untersuchung der Momententragfähigkeit von Falbkanten. Sommersemester 2016
- Von Fournier, J.: Experimentelle Untersuchung der Tragfähigkeit von Textilbetonplatten unter Variation der Verankerung des Textils. Sommersemester 2016.
- Borrmann, C.: Ermittlung von Festigkeits- und Steifigkeitswerten von verfugten und unverfugten Textilbetonplatten. Sommersemester 2017
- Janiak, T.: Einfluss des Textils und des Betonalters auf im Grünzustand gefaltete Kleinkörper. Sommersemester 2017
- Seal, I.: Construction and analysis of a thin-walled folded plate structure made out of textile reinforced concrete. Sommersemester 2017
- Schneider, M.: Bau und Untersuchung eines gefalteten Bogens aus Textilbeton. Sommersemester 2017

Folgeprojekt | Follow-up project

- C04: Stabilität und Quasiduktilität von dünnwandigen Carbonbetonbauteilen | C04: Stability and quasi-ductility of carbon reinforced concrete structural members

Projektleiter Applicants:	Dr.-Ing. Rostislav Chudoba, Dr.-Ing. Frank Schladitz (TU Dresden)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 280
Förderzeitraum Funding period:	01.07.2020–30.06.2024

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Teilnahme am SPP-internen Hornbach Baumarkt Wettbewerb beim Jahrestreffen 2012 in Braunschweig. Die Beiträge entstanden in Zusammenarbeit mit studentischen Hilfskräften Lina Werker und Demian Taschenmacher. | Participation in the SPP internal Hornbach competition at the 2012 annual meeting in Braunschweig. The contributions were made in cooperation with student assistants Lina Werker and Demian Taschenmacher.
- Betreuung einer Studentengruppe für die Teilnahme bei der Betonkanuregatta 2013 mit dem Team The fast-and-the-foldious. Mit dem Kanu The Foldious wurde der dritte Platz in der Konstruktionswertung und der sechste Platz in der Gestaltungswertung erzielt. | Supervision of a group of students for the participation at the concrete canoe regatta 2013, team 'The fast-and-the-foldious'. With the canoe 'The Foldious' the third place in the construction category and the sixth place in the design competition was achieved.
- 1. Preis von einem Studierendenteam der RWTH Aachen beim Tudalit-Wettbewerb 2013 mit dem Beitrag Oridome. Die Mitglieder des Teams waren Christian Bonfig und Michael Kolodzie. Der Beitrag entstand im Rahmen eines Institutspraktikums. | 1st prize from a team of students of RWTH Aachen University at the Tudalit competition 2013 with 'Oridome'. The members of the team were Christian Bonfig and Michael Kolodzie. The contribution was made as part of an internship at the Institute of Concrete Structures, RWTH Aachen University.
- Organisation und Ausrichtung des Treffens der Arbeitsgruppe Modellierung in Aachen am 22.4.2015 | Organisation and execution of the meeting of the working group 'Modelling' in Aachen on 22.4.2015
- Organisation und Ausrichtung des 6. Jahrestreffens des SPP 1542 in Aachen, 4.–6.10.2016 | Organisation and execution of the 6th annual meeting of the SPP 1542 in Aachen, 4.–6.10.2016
- 3. Platz bei der fib Student Competition in Maastricht 13.6.2017 (S-C02DE) im Rahmen des fib-Symposiums 2017 mit dem Beitrag fold it green. Team: Christian Bonfig, Tamara Mansaray, Jan Dirk van der Woerd | 3rd place at the fib Student's Competition in Maastricht 13.6.2017 (S-C02DE) at fib Symposium 2017 with the contribution 'fold it green'. Team: Christian Bonfig, Tamara Mansaray, Jan Dirk van der Woerd